

การออกแบบและการสร้างเครื่องบรรจุจาระบีหลอด

DESIGN AND FABRICATION OF GREASE CARTRIDGE FILLING MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและการสร้างเครื่องบรรจุจาระบีหลอด

DESIGN AND FABRICATION OF GREASE CARTRIDGE FILLING MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND FABRICATION OF GREASE CARTRIDGE FILLING MACHINE



JIRAKIT SUPARATANAMETA
CHUTTRIN KASEMGITWATTANA
CHAIYATORN PERMPORNSAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและการสร้างเครื่องบรรจุงาษาปีหลอด

นายจิรกิตติ์	ศุภรัตน์เมธา	รหัสประจำตัว	59010201
นายฉัตริน	เกษมกิจวัฒนา	รหัสประจำตัว	59010247
นายชัยธร	เพิ่มพรสกุล	รหัสประจำตัว	59010310
ผศ.ดร.อุนนต์	พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2562			

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบเครื่องบรรจุงาษาปีและผลิตเป็นเครื่องต้นแบบ เพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตจาษาปีในรูปแบบจาษาปีหลอด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงต้องศึกษาพฤติกรรมของของไหลนอนนิวโตเนียน ระบบนิวแมติกในการอัดลม และการใช้โปรแกรมอาดูโนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดต้นทุนในการสร้าง และแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 หัวข้อด้วยกันคือ

1. การคำนวณหาสมการ System Curve
2. การออกแบบระบบนิวแมติกและคำนวณหาความดันในแต่ละกระบอกสูบ
3. การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง

จากการหาสมการ System Curve จะต้องใช้เวลาในการจ่ายจาษาปี 24 วินาทีต่อหลอดด้วยอัตราการไหลของลมคือ 0.26 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที โดยที่เวลาในการทำงานที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ 36 วินาทีต่อหลอด ซึ่งในการออกแบบแผนภาพนิวแมติก มีกระบอกสูบทั้งหมด 3 กระบอกด้วยกันและคำนวณได้ความดันที่ FRL เท่ากับ 4.14 บาร์ เนื่องจากความดันสูญเสียในระบบมีค่าน้อยมากทำให้ความดันของกระบอกสูบแต่ละกระบอกเท่ากับ 4.14 บาร์เช่นกัน หลังจากการสร้างได้ทำการทดลองแล้วพบว่าความดันจริงที่ใช้เท่ากับ 3 บาร์และเครื่องสามารถผลิตได้ทั้งหมด 108 หลอดต่อชั่วโมง โดยใช้พลังงานเฉลี่ยทั้งหมด 0.0149 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อหลอดและค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของปริมาณจาษาปีในการเติมอยู่ในมีค่าเท่ากับ 1.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND FABRICATION OF GREASE CARTRIDGE FILLING MACHINE

Jirakit	Suparatanameta	59010201
Chuttrin	Kasemgitwattana	59010247
Chaiyatorn	Permpornsakul	59010310
Asst.Prof.Dr.Unnat Pinsopon		Advisor
Year 2562		

ABSTRACT

This project designs a grease cartridge filling machine and also builds a conceptual machine for practical application in grease cartridge manufacturing industries. Therefore, researchers have to study the behaviors of non-Newtonian fluid, a pneumatic system and using the Arduino Program with electronic components to control the machine. Researchers, however, design this small-scale machine with low cost of production and separate the calculation to three topics as follow:

1. Calculation to find the system curve equation.
2. Design the pneumatic system and calculation to find pressures for each cylinder.
3. Calculation to find the efficiency of this machine.

According to the system curve equation, the grease discharging time is 24 seconds per unit, the air flow rate is 0.26 m³/min and the total time of the system is 36 seconds per unit. As result of the pneumatic diagram, there are three cylinders in this system and the value of the FRL pressure is 4.14 bars, since the amount of pressure loss can be neglected, the pressure for each cylinder are also 4.14 bars. After the construction and the experimentation, the actual pressure is 3 bars while this machine is capable of filling 108 units of grease per hour and the average energy utilization is 0.0149 kWh/unit with an average relative error of filling is 1.32 percent.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.อุนนต์ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายจิรกิตติ ศุภรัตน์เมธา
นายฉัตริน เกษมกิจวัฒนา
นายชัยธร เพิ่มพรสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จาระบี (Grease).....	4
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นจาระบี.....	4
2.1.2 การแบ่งประเภทของจาระบี.....	4
2.1.3 องค์ประกอบที่ผสมในจาระบี.....	5
2.2 ชนิดของของไหลนอนนิวโตเนียน.....	6
2.2.1 ของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา.....	7
2.2.2 ของไหลที่ขึ้นกับเวลา.....	7
2.3 การประมาณค่า Pressure Drop ในระบบการไหลของท่อ.....	8
2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของ Rheological ของสารหล่อลื่นจาระบี.....	9
2.4.1 พฤติกรรมของสารหล่อลื่นจาระบีในเงื่อนไขการไหลอย่างคงที่.....	9
2.5 กลศาสตร์ของของไหล.....	12
2.5.1 เสดความดัน (Pressure Head, H).....	12
2.5.2 เสดความเร็ว (Velocity Head, H).....	13
2.5.3 เสดสถิตย์ (Static Head).....	13

2.5.4	เสตสถิตย์รวม (Total Static Head)	13
2.5.5	เสตความฝืด (Friction Head, H_f)	14
2.5.6	เสตรวมของปั๊ม (Total Dynamic Head) หรือ TDH	15
2.6	การไหลในท่อปิด	15
2.6.1	นิยามของการไหล	15
2.6.2	การเสยเสตความฝืด	16
2.6.3	การเสยเสตเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ	16
2.6.4	กราฟเสตของระบบ (System Head Curve)	18
2.6.5	ระบบนิวแมติก (Pneumatic System)	19
2.7	Air Capacity Rating ของเครื่องอัดอากาศ	20
2.7.1	ขนาดที่เก็บลม (Air Receivers)	20
2.7.2	กำลังที่ใช้สำหรับการขับเครื่องอัดอากาศ	21
2.8	การสูญเสียความดันของอากาศในท่อ	21
2.9	การทำงานของระบบนิวแมติก	23
2.9.1	เครื่องอัดลม	23
2.9.2	ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด	24
2.9.3	เกจวัดความดัน (Pressure gauge)	25
2.9.4	วาล์วควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	25
2.9.5	กระบอกสูบทำงานสองทางโดยใช้ลม (double acting pneumatic cylinder)	26
2.10	ปั๊ม (Pump)	26
2.10.1	ประเภทของปั๊ม	26
2.10.2	ปั๊มของลูกสูบชักแบบขับเคลื่อนโดยตรง (Reciprocating pump)	27
2.10.3	ปั๊มจาระบีที่ทำงานด้วยลมอัด (Air operated grease pump)	28
บทที่ 3	การนำทฤษฎีมาใช้	30
3.1	การออกแบบเครื่องบรรจุจาระบี	30
3.1.1	ลำเลียงหลอดเข้าสู่เครื่อง (Station 1)	30
3.1.2	บรรจุจาระบีเข้าหลอด (Station 2)	31
3.1.3	ลำเลียงฝาและวางฝา (Station 3)	31
3.1.4	ปิดฝาหลอดให้สนิท (Station 4)	32
3.2	การคำนวณหาสมการเสตของระบบเพื่อหาจุดทำงานของปั๊มจาระบี	33
3.2.1	พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการหา System Head Curve	33
3.2.2	การคำนวณหาเสตที่ท่อด้านดูด	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การคำนวณหาเฮดที่ท่อด้านจ่าย	37
3.2.4 การคำนวณหาเฮดที่หัวจาระบีส่วนรับ	38
3.2.5 การคำนวณหาเฮดที่หัวจาระบีส่วนจ่าย.....	39
3.2.6 หาสมการเฮดของระบบ (system head curve) ของอุปกรณ์.....	40
3.2.7 วิเคราะห์ข้อมูลสมการเฮดของระบบ (system head curve)	41
3.3 การคำนวณความดันที่สูญเสียในระบบท่อและอัตราการไหล.....	45
3.2.1 ออกแบบวงจรวินวมติก.....	45
3.2.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบลม (Pneumatic Systems)	46
3.2.3 การหาขนาดของกระบอกสูบแต่ละกระบอก.....	47
3.2.4 การคำนวณหาแรงดันที่สูญเสียของลมในท่อ.....	52
3.2.5 คำนวณหาความดันที่ FRL เพื่อใช้ในการส่งลมไปยังกระบอกสูบที่ 3.....	56
3.2.6 ปริมาณลมที่ใช้ใน 1 หลอด.....	59
3.2.7 การเลือกปั๊มที่เหมาะสม.....	61
3.3 การคำนวณค่าไฟและความสามารถในการทำงานของเครื่อง.....	61
3.3.1 พลังงานที่ใช้ของปั๊มลม	61
3.3.2 พลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุจาระบี.....	62
3.3.3 พลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด.....	64
3.3.4 การคำนวณความสามารถในการผลิตของเครื่องบรรจุจาระบี.....	64
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	65
4.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	65
4.2 การทดลองเพื่อหาความดันของลมอัดที่เหมาะสมกับปั๊มลม.....	68
4.2.1 วิธีการทดลอง.....	68
4.2.2 การคำนวณค่าที่ได้จากผลการทดลอง.....	72
4.2.3 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของจุดทำงานจากการทดลองเทียบกับทฤษฎี.....	78
4.2.4 การใช้พลังงานจริงของเครื่องบรรจุจาระบี.....	79
4.2.5 ผลการทดลองความคลาดเคลื่อนน้ำหนักรับที่ปั๊มลมน้ำ.....	81
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย	82
5.1 สรุปงานวิจัย	82
5.2 การเปรียบเทียบการบรรจุจาระบีแบบดั้งเดิม แบบสำเร็จรูป และการใช้เครื่องบรรจุจาระบีแบบหลอด.....	83
5.3 ปัญหาที่พบในการทดลอง	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต.....	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	89
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	98
ภาคผนวก จ.....	101
ภาคผนวก ฉ.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงเส้นโค้งทางทฤษฎีตามที่ระบุในสมการที่ 2.9 และ 2.10 สำหรับจาระบีที่มีความเข้มข้น 4-9%	10
2.2 วาล์วเรียงที่เส้นผ่าศูนย์กลาง d และ $d^{5.31}$ สำหรับตาราง 40 common pipe sizes.....	22
2.3 ค่าความยาวสมมูลของข้อต่อลมในแต่ละชนิด (ฟุต)	22
3.1 ตารางแสดงขนาดของส่วนประกอบท่อส่งจาระบี.....	34
3.2 ตารางค่าตัวแปรของจาระบีที่มีความเข้มข้น 4% จากตารางที่ 2.1.....	35
3.3 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในท่อด้านจ่าย.....	38
3.4 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในหัวจาระบีส่วนรับ.....	39
3.5 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในหัวจาระบีส่วนจ่าย.....	40
3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับเฮดรวมของจาระบี.....	41
3.7 แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความดันรวมของจาระบี.....	42
3.8 แสดงค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและความยาวสมมูลของข้อต่อลมในแต่ละชนิด	55
3.9 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณหาปริมาณลมที่ใช้	56
4.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการหาความดันของลมอัดใช้งานที่เหมาะสม	71
4.2 ตารางแสดงอัตราการไหลของลมที่ใช้และอัตราการไหลของจาระบีที่ความดันต่างๆ ณ จุจ่าย จาระบี ซึ่งได้จากการทดลอง	73
4.3 ตารางแสดงอัตราการไหลจริงที่ความดันต่างๆ	76
4.4 ตารางแสดงอัตราการไหลจริงที่ความดันต่างๆและเวลาที่ผลิตได้ต่อหลอด	77
4.5 ตารางเปรียบเทียบค่าระหว่างการคำนวณและการทดลอง.....	80
4.6 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการชั่งน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง 20 หลอด.....	81
5.1 การเปรียบเทียบการบรรจุจาระบีแบบดั้งเดิม แบบสำเร็จรูป และการใช้เครื่องบรรจุจาระบีแบบหลอด.....	83
1ข รายการวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้างเครื่องบรรจุจาระบีหลอดทั้งหมด.....	89
1ง รายการวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้างเครื่องบรรจุจาระบีหลอดทั้งหมด	98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กราฟค่าแรงเฉือนสำหรับของไหลนิวโตเนียนและของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดที่ไม่ขึ้นกับเวลา... 6
2.2	(a) กราฟที่ขึ้นกับความเค้นเฉือนและ (b) กราฟที่ขึ้นกับ structural viscosity ที่มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันของอัตราการเฉือนสำหรับจาระบีลิเทียมที่มีฐานเป็นน้ำมันธรรมชาติกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งรูปภาพดังกล่าวค่อนข้างเป็นรูปแบบที่ชัดเจนซึ่งไม่มี ความแปรปรวนในเชิงข้อมูล..... 11
2.3	ค่าจำกัดความของเฮดสถิตย์ (Static Head)..... 13
2.4	ตำแหน่งที่เกิดการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในระบบท่อและอุปกรณ์ 14
2.5	สภาวะทางเข้า (entrance flow condition) และสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss coefficient) 17
2.6	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย K_L ที่ทางเข้าเป็นฟังก์ชันของการลบมุมที่ทางเข้า r/D 17
2.7	สภาวะทางออก (exit flow condition) และสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (loss efficient)..... 17
2.8	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย K_L ของท่อขยายขนาดอย่างฉับพลัน..... 18
2.9	กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)..... 19
2.10	การหาอัตราการสูบและเฮดที่ปั๊มจะทำงานโดยใช้กราฟเฮดของระบบและกราฟ H-Q 19
2.11	ปั๊มลมแบบลูกสูบอัดแบบสายพาน 23
2.12	ภาพตัดขวางของปั๊มลมแบบสกรูขั้นเดียว..... 24
2.13	อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพลมอัด..... 25
2.14	ส่วนประกอบของกระบอกสูบทำงานสองทาง 26
2.15	กราฟแสดงอัตราการไหลของน้ำปั๊มลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดจิ้งหะเดี่ยว 27
2.16	กราฟแสดงอัตราการไหลของน้ำปั๊มลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดจิ้งหะสองจิ้งหะ 27
2.17	การทำงานของปั๊มจาระบีแบบลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอีกสองจิ้งหะ 28
2.18	อธิบายความหมายของอัตราส่วนการอัดของปั๊ม (Pump compression ratio)..... 28
2.19	หลักการการทำงานของปั๊มจาระบีแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจิ้งหะ..... 29
3.1	ชุดอุปกรณ์ป้องกันหอบอดจาระบีเปล่า..... 30
3.2	ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางการไหลจาระบี..... 30
3.3	ตัวประกอบหลอด 31
3.4	ชุดอุปกรณ์ป้องกันจาระบี..... 31
3.5	ชุดอุปกรณ์ลำเลียงฝา 31
3.6	ชุดอุปกรณ์ปิดฝาจาระบี..... 32
3.7	ต้นแบบเครื่องจาระบีแบบหลอด 32

3.8 องค์ประกอบทั้งหมดของเครื่องบรรจุาระปีหลอด.....	33
3.9 แสดงส่วนประกอบของท่อส่งจาระปี.....	34
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรและเฮดรวม.....	42
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับเฮดรวม.....	43
3.12 กราฟเฮดของระบบที่ตัดค่าเริ่มต้นเพื่อหาสมการแนวโน้ม.....	43
3.13 กราฟ Pump Curve และจุดทำงานของปั๊มจาระปีที่ความดัน 4 bar.....	44
3.14 วงจรนิวแมติก(Pneumatic Circuits)ของเครื่องจักร.....	45
3.15 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่(step motion diagram).....	46
3.16 รูปอธิบายการทำงานของขั้นตอนการใส่จาระปีลงหลอดจาระปี.....	46
3.17 แสดงตารางของขนาดกระบอกสูบตัวที่ 1 และตัวที่ 3.....	48
3.18 แสดงตารางขนาดของกระบอกสูบตัวที่ 2.....	50
3.19 รูปภาพแสดงข้อมูลโมเดลต่างๆของวาล์วโซลินอยด์ 3/2 ของ AirTAC.....	54
3.20 รูปภาพแสดงข้อมูลโมเดลต่างๆของวาล์วโซลินอยด์ 5/2 กับ 5/3 ของ AirTAC.....	57
3.21 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของปั๊มจากหนังสือสินค้าของ puma.....	61
4.1 ปั๊มจาระปี Ecodora Series 600.....	65
4.2 ปั๊มลม Puma PP-32.....	65
4.3 มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า 1 เฟส.....	66
4.4 ชุดบริการลมอัด (FRL).....	66
4.5 โซลินอยด์วาล์ว Airtac 3V-220-08.....	67
4.6 กระบอกจ่ายจาระปี.....	67
4.7 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	68
4.8 แผนผังการทดลองเพื่อหาความดันของลมอัดที่เหมาะสมกับปั๊มลม.....	70
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของลมอัดกับความดันของลมอัดที่ใช้งาน.....	74
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของจาระปีกับความดันของลมอัดที่ใช้งาน.....	74
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของจาระปีต่ออัตราการไหลของลมอัด.....	75
1ก น้ำหนักน้ำรวมกับภาชนะบรรจุที่ชั่งด้วยตาชั่ง.....	88
2ก น้ำหนักน้ำรวมกับภาชนะบรรจุที่ชั่งด้วยตาชั่ง.....	88
3ก น้ำหนักจาระปีรวมกับภาชนะบรรจุชั่งด้วยตาชั่ง.....	88
1ค ส่วนประกอบของปั๊มจาระปี.....	93
2ค แผ่นกดจาระปี (Follower Plate) ที่อยู่ในถัง.....	94
3ค การใส่ฝาครอบถัง (Drum Cover).....	94
4ค การใส่ตัวปั๊มจาระปี (Grease Pump) ที่รูของฝาครอบถัง (Drum Cover).....	95
5ค การต่อท่อไฮดรอลิกต่อระหว่างปั๊มจาระปีกับกระบอกจ่ายจาระปี.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6ค การต่อปี่มจาระปี	96
7ค การต่อลมที่ทางออกของโซลินอยด์ A	96
8ค การต่อลมที่ปี่มลม	97
9ค การต่อลมที่ FRL	97
1ง มอเตอร์ วาล์วโซลินอยด์และเซนเซอร์จับวัตถุ เมื่อติดตั้งแล้ว.....	100
2ง แผนผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	100
1จ แผงควบคุมการทำงานของเครื่อง.....	101
2จ ชุดอุปกรณ์ป้องกันหลอดจาระปีเปล่า.....	102
3จ ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางหลอดจาระปี.....	102
4จ ชุดอุปกรณ์ป้องกันจาระปี.....	103
5จ ชุดอุปกรณ์ป้องกันฝาจาระปี	104
6จ อุปกรณ์ปิดฝาจาระปี.....	104
1ฉ แผนผังการออกแบบการทำงานของเครื่อง.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จาระบี (Grease) คือ สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งกึ่งของเหลวและกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (oil base) เพื่อเพิ่มคุณภาพทางเคมีและสปู โดยน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ทำจาระบี โดยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นำไปใช้ในการทำจาระบีมักมีลักษณะคือความหนืดสูงเพื่อการใช้งานที่มีช่วงอุณหภูมิที่กว้างได้ทั้งอุณหภูมิสูงและต่ำ เพราะอาจเกิดการรั่วไหล ฝุ่นเข้าหรือปัญหาเรื่องสิ่งแปลกปลอมเข้าไปทำให้การหล่อลื่นไม่ได้ผล ซึ่งระดับความหนืดสามารถแสดงอยู่ในรูปของตัว NLGI เบอร์ต่างๆ ขึ้นกับลักษณะการใช้งาน โดยผลิตภัณฑ์หล่อลื่นที่มีความคงตัว จะมีคุณสมบัติในการจับติดส่วนที่ต้องการได้ดีกว่าน้ำมันหล่อลื่น

ซึ่งจาระบีเป็นสารหล่อลื่นที่จำเป็นในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลผลิตมาจากน้ำมันพื้นฐานผสมกับสารที่ทำให้เข้มข้น (Thickener) และปรับปรุงคุณสมบัติของจาระบีด้วยสารเคมีเพิ่มคุณภาพ (Additives) ในปัจจุบันผู้ผลิตรวมถึงผู้จัดจำหน่ายมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของสินค้าจะสูงตามปริมาณของเครื่องจักร เนื่องจากวิธีการใช้จาระบีส่วนใหญ่ของผู้ปฏิบัติงานในประเทศนั้นเป็นวิธีที่เกิดปัญหาดังนี้

1. ทำให้จาระบีเกิดการปนเปื้อนเนื่องจากการบรรจุที่ใช้การตักจากบรรจุขนาดใหญ่ใส่กระบอกอัดจาระบี (Grease Gun) ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อจุดที่ถูกลูบ ทำให้อายุการใช้งานของลูกปืนลดลง
2. เนื้อจาระบีเกิดช่องว่างจากการตักใส่
3. สิ้นเปลืองเวลาในการทำงาน
4. อุปกรณ์เครื่องมือไม่สะอาดซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของจาระบี

แต่ในต่างประเทศแก้ปัญหาเหล่านี้ด้วยการใช้จาระบีแท่ง (Grease Cartridge) ขนาด 400 กรัม ที่สามารถนำมาใส่กระบอกอัดจาระบีมาตรฐานได้ทันที โดยไม่มีความเสี่ยงจากการปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดความสกปรกและยังช่วยเพิ่มความรวดเร็ว ความสะอาดสบายและความสะอาดของผู้ใช้งาน แต่ข้อเสียของจาระบีแท่งคือราคาแพงกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า

ในปัจจุบันปริมาณการใช้จาระบีหลอดในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายอย่างในต่างประเทศทำให้การนำเข้าเครื่องที่มีราคาสูงนั้นไม่คุ้มค่า ทางคณะผู้จัดทำเล็งเห็นถึงความสำคัญในเรื่องของการลดต้นทุนการผลิตเพื่อให้ตลาดผู้บริโภคระดับกลางรวมไปถึงโรงงานที่ต้องการผลิตจาระบีหลอดในปริมาณที่ลดลงและต้องการทำให้ชิ้นงานทำงานอย่างครบวงจร เพื่อความสะดวกในการผลิต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา

1. ออกแบบและสร้างเครื่องบรรจุจาระบีหลอดที่ใช้งานได้จริง
2. เพิ่มความรวดเร็วในการผลิตเมื่อเทียบกับการวิธีการใช้มือในการบรรจุจาระบี
3. ลดราคาต้นทุนของจาระบีหลอดสำเร็จรูปในการนำมาใช้จริง
4. ทำการบรรจุจาระบีหลอดให้ได้ 100 หลอดภายในเวลา 1 ชั่วโมง

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ต้นทุนในการสร้างเครื่องอัดจาระบีแบบหลอดไม่สูงจนเกินความคุ้มค่าทางธุรกิจและยังสามารถใช้งานได้อย่างไม่มีข้อบกพร่อง โดยคุณภาพของจาระบียังคงเหมือนกับที่อยู่ใกล้บรรจุ กล่าวคือไม่มีการปนเปื้อนไปสู่จาระบีที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรในอนาคต

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อที่จะออกแบบเครื่องให้ตรงตามวัตถุประสงค์ ผู้จัดทำต้องศึกษาในเรื่อง

1. การไหลของจาระบีซึ่งเป็นของไหลแบบ นอน-นิวตันเนียน (Non-Newtonian) ในท่อซึ่งพฤติกรรมการไหลจะไม่เหมือนน้ำซึ่งเป็นของไหลแบบ นิวตันเนียน (Newtonian) กล่าวคือความหนืดของของไหลนั้นไม่คงที่ตามอัตราเร็วของการไหลของของไหลในท่อ
2. การหาความดันที่สูญเสียในท่อและคำนวณขนาดของปั๊มจาระบีที่ทำงานด้วยลม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดของเครื่องอัดจาระบีแบบหลอด โดยใช้ความรู้และการคำนวณจากวิชา Fluid Machinery ในเรื่องของการหาความดันที่สูญเสียในท่อและการหาจุดทำงานของปั๊มจาระบี
3. คำนวณขนาดของปั๊มลมที่เหมาะสมกับปั๊มจาระบีและระบบลำเลียงในการบรรจุ
4. ออกแบบและคำนวณกำลังงานในระบบลำเลียงในการบรรจุ โดยลักษณะของระบบลำเลียงในการบรรจุนั้นใช้กำลังลมอัดโดยคำนวณระบบลมได้จากวิชา Fluid Power และมอเตอร์ในการทำงาน ซึ่งพลังงานที่จ่ายให้เครื่องจะจ่ายให้กับปั๊มลมและแหล่งจ่ายขนาด 12 Volt
5. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่อง รวมไปถึงการปรับแต่งเครื่องให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อความคุ้มค่าทางธุรกิจ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับจาระบี
2. ศึกษากระบวนการผลิตจาระบีหลอดในต่างประเทศ
3. ออกแบบเครื่องอัดจาระบีแบบหลอด ที่มีคุ้มค่าทางธุรกิจ
4. สร้างเครื่องอัดจาระบีแบบหลอดที่สามารถใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในช่วงแรกของการสร้างเครื่องอัดจาระบีแบบหลอดผู้จัดทำต้องสำรวจราคาปั๊มจาระบีและปั๊มลมที่ต้องการสำหรับปั๊มจาระบี ในประเทศไทยเพื่อที่จะได้ทราบความคุ้มค่าในเบื้องต้นว่าเป็นไปได้ที่จะสร้างหรือไม่ หลังจากนั้นทำการหาความดันที่สูญเสียในระบบท่อจาระบีเพื่อที่จะนำไปเลือกปั๊มจาระบี เมื่อได้รุ่นของปั๊มจาระบีแล้วนำไปเลือกขนาดของปั๊มลม และทำงานทดสอบหาความดันที่สูญเสียในระบบท่อว่าใกล้เคียงกับการคำนวณหรือไม่ หลังจากนั้นทำการออกแบบระบบลำเลียงในการบรรจุและทำการสร้างเครื่องจริง พร้อมกับสร้างโปรแกรมควบคุมระบบลำเลียงในการบรรจุ และทำงานทดสอบและปรับแต่งเครื่องให้สามารถใช้งานได้อย่างไม่มีข้อบกพร่อง รวมทั้งทำการเปรียบเทียบการใช้การบรรจุด้วยมือ การใช้จาระบีหลอดสำเร็จรูปและการใช้เครื่องบรรจุจาระบีแบบหลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ3อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 จาระบี (Grease) [10]

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นจาระบี

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นมีหลากหลายต่างชนิดกัน ซึ่งชนิดของน้ำมันหล่อลื่นนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการใช้งานและจาระบี(Grease)เองก็เป็นหนึ่งในน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด โดยพื้นฐานการนำมาใช้ของจาระบีแล้วส่วนใหญ่จะนำน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(oil base)น้ำมันแร่กับกลุ่มสังเคราะห์นำมาควั่นเข้ากับสารเพิ่มความข้น(Thickener)อย่างอื่นเช่น สารที่ทำให้เป็นไขสบู่เพื่อความข้นที่มากกว่าจนทำให้กลายเป็นสารหล่อลื่นกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว(Semi-Solid Lubricant)

โดยส่วนใหญ่แล้วจาระบีมักจะใช้ในรูปแบบไขสบู่รูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่น แบบแซนเชื่อมโยงยาว(Long Chain) แซนเชื่อมโยงสั้น(Short Chain) หรือแบบเชิงซ้อน(Complex Soap) โดยองค์ประกอบของไขสบู่จะทำให้เกิดโครงข่ายเส้นใยที่สามารถอุ้มน้ำมันหล่อลื่นไว้ได้ ส่วนจาระบีที่ใช้ตัวทำให้เป็นไขชนิดไม่ได้เป็นกรดไขมันมักถูกนำมาใช้กับการใช้งานในลักษณะพิเศษ เช่น กลุ่มของตัวทำให้เป็นไขประเภทอนินทรีย์ เช่น ออแกโนฟิลิก เบนโทไนท์ มอนท์มอรีโอไลท์ และวัสดุประเภทไร้เล้า(Ash-less) โพลียูเรีย สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ

2.1.2 การแบ่งประเภทของจาระบี

โดยปกติแล้วสามารถแบ่งประเภทของจาระบีได้หลากหลายแนวทาง เช่น

1.) แบ่งตามชนิดของสารอุ้มน้ำมัน หรือสารทำให้เป็นไข

- ตามชนิดของการอุ้มน้ำมันหรือทำให้เป็นไข
 - จาระบีที่ใช้ไขสบู่โซเดียม ลิเทียมและแคลเซียม
 - จาระบีที่ใช้ไขสบู่เชิงซ้อนของโซเดียม ลิเทียมและแคลเซียม
 - จาระบีที่ใช้ตัวทำให้เป็นไขจากโพลียูเรียและเบนโทไนท์

● แบ่งประเภทตามชิ้นส่วนอุปกรณ์

- จาระบีที่ใช้หล่อลื่นร่องลื่นแบบกลิ้งตัว แบบลื่นไถล
- จาระบีหล่อลื่นจุดเชื่อมโยงและจุดเฟืองทด
- จาระบีหล่อลื่นแอสซีส์รถยนต์

● แบ่งตามประเภทของชิ้นส่วนอุปกรณ์

- แบ่งตามสภาวะการใช้งาน
- จาระบีสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ปานกลางหรือสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จาระบีพิเศษที่ใช้งานปกติหรือ การใช้งานหนัก
 - จาระบีใช้งานเมื่อแรงกดสูง (EP : Extreme Pressure)
 - จาระบีสำหรับรางเลื่อน

2.1.3 องค์ประกอบที่ผสมในจาระบี

โดยทั่วไปจาระบีจะมีไขสบู่อยู่ 4 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในทำนองเดียวกันจะมี น้ำมันหล่อลื่นเป็นฐานอยู่ 75 - 90 เปอร์เซ็นต์รวมไปถึงสารปรุงแต่ง(Additive) 0 - 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง อัตราส่วนขององค์ประกอบทั้งสามอย่างทำให้ผลิตจาระบีที่มีคุณสมบัติต่างชนิดกันขึ้นกับสถานการณ์ ที่ใช้งาน

1. ไขสบู่ (Soap)

ขี้ลวบในสบู่ (Cation) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดไขของจาระบี การทนทานต่อการชะล้างด้วยน้ำและการต่อต้านความร้อน (จุดหยดตัวของจาระบี) สำหรับความยาวของแขนเชื่อมโยงของ ขี้ลวบ (Chain Length Anions) มีผลต่อคุณสมบัติของการผสมรวมตัวเข้ากับน้ำมันฐานได้มากน้อย เพียงใด ความมีเสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและคุณสมบัติในขอบเขตการหล่อลื่น(Boundary) การเพิ่มสัดส่วนของปริมาณไขสบู่จะทำให้เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับจาระบี

2. น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นฐาน (Base Oil)

จาระบีทั่วไปใช้น้ำมันหล่อลื่นกลุ่มน้ำมันแร่ชนิดพาราฟินิกและแนพทาณิกเป็นฐานน้ำมัน สำหรับน้ำมันแร่แนพทาณิกมีความต้องการไขสบู่ที่เป็นตัวทำให้เป็นไขหรือสารอุ้มน้ำมันในปริมาณที่ต่ำกว่าน้ำมันแร่แบบพาราฟินิก โดยทั่วไปน้ำมันแร่ที่ใช้มีความหนืดอยู่ระหว่าง 20 ถึง 3,400 cSt หรือ 20°C โดยน้ำมันฐานที่มีความหนืดต่ำมีคุณสมบัติที่ดีในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำส่งถ่ายไปตามท่อ ขนาดเล็กๆได้ง่ายและใช้งานที่ความเร็วรอบสูงๆ ได้ ในทางตรงข้ามน้ำมันฐานที่มีความหนืดสูงจะมี โอกาสที่น้ำมันจะแยกตัวออกไปจากตัวอุ้มน้ำมันค่อนข้างยาก มีการระเหยของตัวน้ำมันน้อย ยึดเกาะ ได้ดี และเหมาะกับการใช้งานหล่อลื่นร่องลื่นที่มีความเร็วต่ำและอุณหภูมิใช้งานสูงๆ ในกรณีของ จาระบีสังเคราะห์สำหรับการใช้งานเงื่อนไขพิเศษ ใช้น้ำมันหล่อลื่นกลุ่มสังเคราะห์ชนิดโพลีไกลคอล และ ซิลิโคนเป็นส่วนใหญ่

3. สารปรุงแต่ง (Additives)

คุณสมบัติต่อไปนีของจาระบีสามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยการใช้สารปรุงแต่งผสมลงไป เสถียรภาพต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน การปกป้องการกัดกร่อน การทนต่อการชะล้างจากน้ำ คุณสมบัติ การยึดเกาะผิว และปกป้องการสึกหรอ

2.2 ชนิดของของไหลนอนิวโตเนียน [11]

จากความหมายของของไหลนิวโตเนียน ซึ่งหมายถึงของไหลที่เป็นไปตามกฎของนิวตันดังสมการที่ 2.1

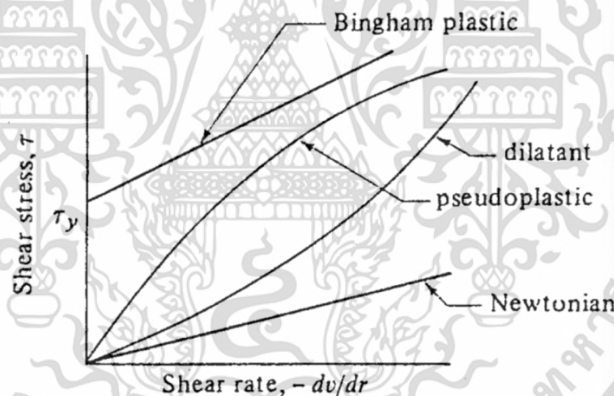
$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

โดยที่ μ หมายถึง ความหนืดซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าอัตราเฉือน (shear rate)

v หมายถึง ความเร็ว

y หมายถึง ระยะทางที่วัดจากผิวอ้างอิงและมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล

จากรูปที่ 2.1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับอัตราการเฉือน (shear rate) โดยที่ของไหลนิวโตเนียน คือ ของไหลที่แสดงด้วยเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดและจะมีความชันเป็น μ ตามสมการที่ 2.1 ของไหลใดที่ไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.1 ของไหลดังกล่าวจัดอยู่ในพวกของไหลนอนิวโตเนียนนั่นคือ กราฟระหว่าง τ และ $\frac{dv}{dy}$ จะไม่เป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นตรงที่ไม่ผ่านจุดกำเนิด



รูปที่ 2.1 กราฟค่าแรงเฉือนสำหรับของไหลนิวโตเนียนและของไหลนอนิวโตเนียนชนิดที่ไม่ขึ้นกับเวลา [10]

ของไหลนอนิวโตเนียนถูกจำแนกออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติของค่าแรงเฉือนและอัตราการเฉือนกล่าวคือ พวกแรกเป็นของไหลที่มีค่าแรงเฉือนไม่ขึ้นกับระยะเวลาซึ่งเรียกว่า time dependent fluids อีกพวกเป็นของไหลที่ขึ้นอยู่กัระยะเวลาเรียกว่า time dependent fluids นอกเหนือจากคุณสมบัติของค่าแรงเฉือนที่ผิดไปจากของไหลนิวโตเนียนแล้ว ยังมีของไหลนอนิวโตเนียนอีกบางจำพวกที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ (elastic behavior) คุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กัเวลาด้วย เรียกว่าของไหลพวกนี้ว่า viscoelastic fluids แต่โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อพูดถึงของไหลนอนิวโตเนียนมักจะหมายถึงพวกของไหลที่มีค่าแรงเฉือนไม่ขึ้นกับระยะเวลา ซึ่งพบมากที่สุดในจำนวนของไหลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ 6 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

Bingham plastic fluids ของไหลจำพวกนี้จะมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับของไหลนิวโตเนียนแต่ไม่ผ่านจุดกำเนิดเท่านั้น ค่าแรงเฉือนที่จุดตัดเรียกว่า ความเค้นเฉือนคราก (yield shear stress) สัญลักษณ์ τ_y มีหน่วย N/m^2 ของไหลจะต้องได้รับแรงเท่ากับ τ_y ถึงจะเริ่มไหลได้ ตัวอย่างของไหลจำพวกนี้ได้แก่ โคลนตม ถั่วขึ้น (peat slurry) นำผลไม้ขึ้น หรืออาหารที่ทำจากไขมันสัตว์ (margarine) ช็อคโกแลต สบู่ ยาสีฟัน เยื่อกระดาษ (paper pulp) และตะกอนน้ำเสีย (sewage sludge) เป็นต้น

Pseudoplastic fluids ของไหลนอนิวโตเนียนส่วนใหญ่จัดอยู่ในจำพวกนี้ เส้นกราฟลักษณะการไหลแสดงอยู่ในรูปที่ 2.1 โดยเส้นกราฟแสดงได้ด้วยสมการของ Ostwald-de Waele ซึ่งเป็นสมการกฎยกกำลัง (Power law equation) ดังแสดงในสมการที่ (2.2) คือ

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n ; (n < 1) \quad (2.2)$$

โดยที่ K หมายถึง ค่า consistency index หน่วย $N \cdot s^n / m^2$ หรือ $lb_f \cdot s^n / ft^2 \theta$

n หมายถึง flow behaviour index ซึ่งเป็นตัวแปรไม่มีหน่วย

ของไหลพวกนี้จะมีค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ลดลงตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างได้แก่ สารละลายยาง กาว สารละลายโพลิเมอร์ ไขมันบางชนิด น้ำแป้ง เซลลูโลสอะซีเตท มายองเนส (Mayonnaise) สบู่ เสลอรี่ของผงซักฟอก เยื่อกระดาษ สีและของไหลชีวภาพ (biological fluids) เป็นต้น

Dilatant fluids ของไหลพวกนี้มีคุณสมบัติต่างจากพวก pseudoplastic เพียงเล็กน้อย คุณสมบัติการไหลแสดงอยู่ในรูปที่ 2.1 ค่าความหนืดปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการเฉือน สมการกฎยกกำลังนำมาใช้ได้โดยที่ค่า $(n > 1)$

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n ; (n > 1) \quad (2.3)$$

ถ้ากรณีที่เป็นของไหลนิวโตเนียน n จะเท่ากับ 1 ตัวอย่างของไหลนอนิวโตเนียนพวกนี้ได้แก่ สารละลายของข้าวโพดในน้ำตาล สารละลายของแป้งในน้ำ สารละลายของโพแทสเซียมซิลิเกตในน้ำ การกระจายตัวของผงเหล็กในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ เป็นต้น

2.2.2 ของไหลที่ขึ้นกับเวลา

Thixotropic fluids ที่ค่าอัตราการเฉือนที่คงค่าหนึ่งของไหลจำพวกนี้จะมีค่าแรงเฉือนลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จงกระทั่งแรงเฉือนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (limiting value) ซึ่งจะเท่ากับค่าไต้นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือน ตัวอย่างได้แก่ สารละลายโพลิเมอร์บางชนิด สารทำให้กรอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ 7 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(shortening) วัสดุอาหารบางชนิด ทฤษฎีการไหลของสารพวกนี้ยังไม่ได้รับการพัฒนาและเผยแพร่มากนัก

Rheoplectic fluids คุณสมบัติการไหลจะตรงข้ามกับพวก thixotropic fluids โดยที่อัตราการไหลที่ค่าหนึ่ง แรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น bentonite clay suspensions, gypsum suspensions การออกแบบการไหลในท่อ (steady flow in pipe) ของสารพวกของไหลที่ขึ้นอยู่กับเวลาทั้ง 2 ชนิดนี้บางครั้งจะใช้ค่าคุณสมบัติการไหลที่ถูกกำหนด ณ สภาวะค่าอัตราการไหลที่ค่าหนึ่ง

Viscoelastic fluids ของไหลจำพวกนี้สามารถคืนรูปได้หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปไปในระหว่างที่มีการไหลนั้นคือของไหลพวกนี้จะแสดงคุณสมบัติ 2 อย่างพร้อมกัน คือ คุณสมบัติของความหนืด และ คุณสมบัติการยืดหยุ่น การคืนรูปของของไหลจะเกิดขึ้นได้หลังจากที่เราหยุดให้แรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป ตัวอย่างได้แก่ flour dough, napalm, polymer melt, bitumen.

2.3 การประมาณค่า Pressure Drop ในระบบการไหลของท่อ [7]

สำหรับการไหลแบบ fully developed steady ที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ของของไหลแบบนิวโตเนียนในระบบไหลเวียนของท่อ โดยที่เราสามารถคำนวณค่าความดันลด (pressure drop) ได้จากสมการข้างล่าง

$$\Delta P = \frac{128\mu LQ}{\pi D^4} \quad (2.4)$$

โดยที่ μ หมายถึง ความหนืดของของไหลแบบนิวโตเนียน

L หมายถึง ความยาวท่อ

Q หมายถึง อัตราการไหล

D หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ

ในทางปฏิบัติของการประมาณค่าความดันลดของการไหลของจาระบีจากมุมมองของคนในโรงงานคือการแทนค่าความหนืดที่ปรากฏเป็น η_a สำหรับค่าความหนืดของของไหลแบบนิวโตเนียน μ จะได้สมการคือ

$$\Delta P = \frac{128\eta_a LQ}{\pi D^4} \quad (2.5)$$

ในการใช้สมการดังกล่าว ค่า wall shear rate นิวโตเนียนที่ไม่ถูกต้องโดยกำหนดว่า

$$\dot{\gamma}_N = \frac{8V}{D} = \frac{32Q}{\pi D^3} \quad (2.6)$$

เป็นการคำนวณที่ขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราการไหล Q และเส้นผ่าศูนย์กลาง D ในระบบท่อ ดังนั้นค่าความหนืดที่ปรากฏที่สอดคล้องกับ $\dot{\gamma}_N$ ซึ่งหามาจากกราฟความหนืดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน (Rotating Viscometer)

แม้ว่าวิธีการประมาณ pressure drop นี้จะถูกใช้มาแล้วเป็นเวลา 40 ปีมาแล้ว แต่ก็ยังมีอุปสรรคในการใช้หัวข้อนี้ เมื่อใช้สมการ power law

$$\tau = m(\dot{\gamma})^n \quad (2.7)$$

ค่า wall shear rate ที่ถูกต้องสามารถหาได้จาก

$$\dot{\gamma} = \frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \quad (2.8)$$

โดยที่ n หมายถึง เลขยกกำลังของ power law

m หมายถึง ค่าคงที่ของความหนืด

**ในการคำนวณ ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ เลขยกกำลังของ power law คือ m

ค่าของ uncorrected wall shear rate ที่สอดคล้องกับการไหลของจากระบีในท่อขนาดใหญโดยยกตัวอย่างในช่วง $0.1 - 20 \text{ s}^{-1}$ โดยที่เลขยกกำลังจะอยู่ที่ $0.1 - 0.2$ และจากการแก้ไข non-Newtonian $\frac{3n+1}{4n}$ ในสมการที่ (2.8) จะได้ค่าในช่วง $3.25-2.0$ เป็นค่าที่มากเกินไปกว่าที่จะเพิกเฉยค่า wall shear rate ซึ่งถูกประมาณค่าไว้มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์สำหรับจากระบีเกรด 2 โดยมีเลขยกกำลังของ power-law ในช่วง $0.1-0.3$ ดังนั้นเราสามารถหาเลขยกกำลังของ power-law ได้ ง่ายๆจากกราฟความหนืดซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนซึ่งมีความเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราเฉือนต่างๆในช่วงที่เราสนใจ ในการใช้ค่า corrected wall shear rate เพื่อที่จะหาค่า ความหนืดที่ปรากฏควรใช้ในเชิงปฏิบัติเพื่อที่จะประมาณค่าการสูญเสียความดันได้อย่างแม่นยำ

2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของ Rheological ของสารหล่อลื่นจากระบี [7]

2.4.1 พฤติกรรมของสารหล่อลื่นจากระบีในเงื่อนไขการไหลอย่างคงที่

จากระบีขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างว่าเป็น shear-thinning (pseudoplastic) และเป็น Rheo-unstable fluids ที่มีจุดคราก (yield point) หรือไม่ ซึ่งจะแสดงถึงคุณสมบัติของ Rheological ที่ซับซ้อน สารหล่อลื่นจากระบีที่อัตราเฉือนต่างๆ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลนิวโตเนียนที่มีค่าความหนืดคงตัว η_0 ซึ่งเป็นความชันของเส้นสัมผัสของเส้นโค้งการไหลและมีค่าเท่ากับอัตราเฉือนที่มีค่าเข้าใกล้

ศูนย์ ($\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})$) และที่อัตราเฉือนเข้าใกล้อนันต์สารหล่อลื่นจะเปลี่ยนเป็นของไหลแบบนิวโตเนียนด้วย แต่ที่ความหนืด η_∞ เข้าใกล้ระยะการกระจายตัวซึ่งจะถูกเรียกว่าน้ำมันพื้นฐานหรือ base oil ($\eta_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$) ที่ความหนืด η_∞ ซึ่งเป็นความชันของเส้นตรงที่เป็นเส้นกำกับ (asymptote) ของเส้นโค้งการไหล โดยประเภทของอัตราเฉือนทางอ้อม (indirect shear rates) กราฟของเส้นโค้งการไหลสารหล่อลื่นจะอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.9)$$

โดยที่ η หมายถึง ค่าความหนืดพลวัต (dynamic viscosity)

τ หมายถึง ค่าความเค้นเฉือน (shear stress)

$\dot{\gamma}$ หมายถึง อัตราเฉือน (shear rate)

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงผลของการวัดการไหลที่สร้างมาจากจาระบีลิเทียมที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ และแสดงถึงค่าความหนืดที่เปลี่ยนไปรวมถึง structural viscosity เป็นฟังก์ชันของอัตราเฉือน (shear rate) จากทฤษฎีเส้นโค้ง ได้นำเสนอในเรื่องของความไม่เป็นอิสระกล่าวไว้ว่าค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนดเส้นโค้งทางทฤษฎีตามที่อ้างอิงข้างต้นสำหรับจาระบีที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ และแสดงข้อมูลในตารางที่ 2.1 จาระบีทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้นโดยใช้ lithium 12-hydroxystearate และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานใช้เป็นน้ำมันแร่ เส้นโค้งการไหลถูกจำกัดให้เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C โดยที่ทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งและผลลัพธ์ทางสถิติอย่างละเอียดที่มีค่าความแปรปรวน $p=0.95$ รวมไปถึงการคำนวณค่าคงตัวความสัมพันธ์ (correlation coefficient values) ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ Physica Anton-Paar MCR 101 ที่เป็นเครื่องวัดความหนืดชนิดหมุน (Rotational viscometer) และสามารถใช้อุปกรณ์วัดความหนืดชนิดโคนและแผ่นเรียบ (CP-25-1, 25 mm, 1°) ที่มีค่าคงที่ช่องว่างการวัดเท่ากับ 49 μm .

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงเส้นโค้งทางทฤษฎีตามที่ระบุในสมการที่ 2.9 และ 2.10 สำหรับจาระบีที่มีเปอร์เซ็นต์ความข้น(Thickener Content) 4-9% [6]

Thickener Content (%)	Herschel-Bulkley model				Carreau-Yasuda model					
	τ (Pa)	k_c (Pas)	m	R_{xy}	$\eta_0 - \eta_\infty$ (Pas)	η_∞ (Pas)	λ (s)	a	n	R_{xy}
4.0	120.27	5.826	0.66964	0.99983	1852.4	0.38843	47.456	2	0.20073	0.99600
5.0	190.52	83.155	0.37458	0.99958	4189.5	0.20014	47.457	2	0.23465	0.99668
6.0	216.00	83.867	0.38633	0.99973	4742.5	0.26093	47.939	2	0.22985	0.99811
6.5	241.47	212.430	0.29112	0.99982	9090.5	0.18576	47.940	2	0.20100	0.99919
7.0	672.60	148.930	0.35189	0.99750	15225.0	0.26328	47.455	2	0.17468	0.99696

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่องค์กรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.0	712.54	285.550	0.28687	0.99592	21453.0	0.25487	47.423	2	0.16048	0.99944
9.0	785.29	230.630	0.37532	0.99956	16023.0	0.54032	47.458	2	0.21285	0.99743

Herschel-Bulkley ในสมการที่ (2.10) ใช้หลักการพิจารณาค่า yield stress τ_0 ซึ่งค่าความเค้นเฉือนของสารหล่อลื่นจาระบีสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = \tau_0 + (k_c \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{m}} \quad (2.10)$$

โดยที่ τ_0 หมายถึง yield stress

k_c หมายถึง consistency factor ของความเข้มข้นในจาระบี

m หมายถึง nondimensional index exponent

จากสมการที่ (2.11) ของ Carreau-Yasuda สามารถประมาณการเปลี่ยนรูปแบบในโครงสร้างความหนืดในรูปฟังก์ชันอัตราการเฉือนกับความหนืด η_∞ และ η_0

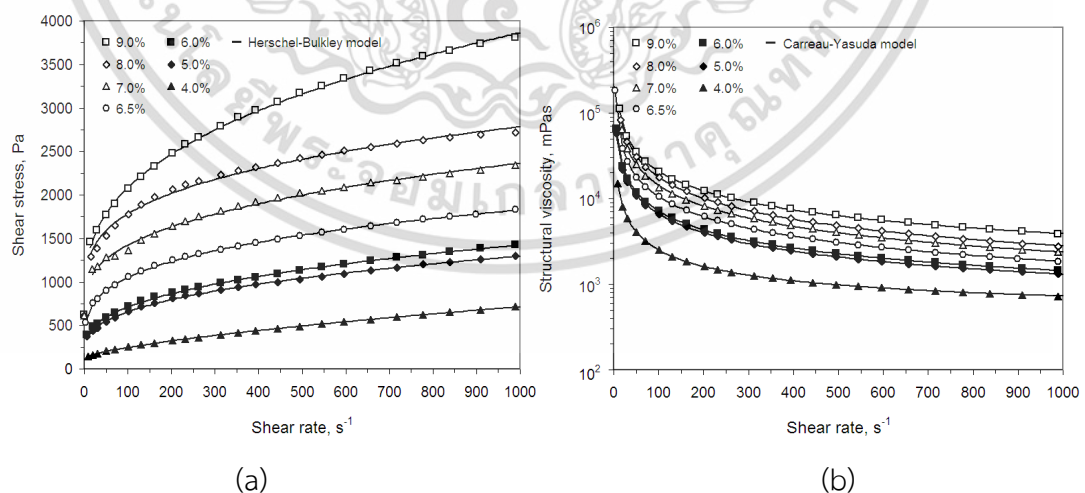
$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \cdot \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (2.11)$$

โดยที่ $\eta_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})$, $\eta_0 = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})$

λ หมายถึง เวลาที่คงที่

a และ n หมายถึง non-dimensional parameters

กำหนดให้ shear-thinning fluids และ พารามิเตอร์ a เท่ากับ 2



รูปที่ 2.2 (a) กราฟความเค้นเฉือนและ (b) กราฟ structural viscosity ที่มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันของอัตราการเฉือนสำหรับจาระบีเลียนที่มีฐานเป็นน้ำมันธรรมชาติกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ

ซึ่งรูปภาพดังกล่าวค่อนข้างเป็นรูปแบบที่ชัดเจนซึ่งไม่มีความแปรปรวนในเชิงข้อมูล [6]

เส้นโค้งการไหลแสดงให้เห็นถึงความจริงที่ว่าจาระบีมีคุณสมบัติเป็น pseudoplastic เป็นผลมาจากการย่อยสลายของโครงสร้างในระดับจุลภาคของสารหล่อลื่นจาระบีและจากการวางแนวการกระจายตัวของอนุภาคของไขสบู่ ในระหว่างการลดลงของความเค้นในจาระบีได้พบสิ่งเจือปนจำนวนมากของไขสบู่ อย่างไรก็ตามความเค้นของจาระบีนั้นได้พบว่าว่าอนุภาคมีการคลายเส้นใยและทำให้ตรงขึ้นเป็นไปตามลักษณะปัจจุบัน ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนทำให้มีผลกระทบเป็นอย่างมาก การลดลงของแรงเสียดทานภายในเป็นผลมาจากการสั่นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและการดำเนินการระหว่างอนุภาค ที่มีอัตราเฉือนสูงๆ อนุภาคมีการวางตัวอย่างสมบูรณ์ ที่ระดับอัตราเฉือนต่ำๆ จะมีแรงเสียดทานคงที่ ดังนั้น structural viscosity ของจาระบีจะใกล้เคียงกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

จากรูปที่ 2.2 เราพบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลที่มีขนาดใหญ่พอดี ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของสารเพิ่มความข้นอาจก่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคเชิงพื้นที่ (spatial microstructure resistant) ต่อความเค้นเฉือนซึ่งจะมีค่าไม่เกินค่าในรูปอย่างแน่นอน ภายใต้ค่าดังกล่าวทำให้จาระบีมีคุณสมบัติคล้ายวัสดุยืดหยุ่น เมื่อเข้าใกล้ค่า yield stress τ_0 (Yield Point) โครงสร้างจุลภาคจะได้รับความเสียหายและทำให้จาระบีมีคุณสมบัติคล้ายของเหลวหนืด แต่ถ้าความเค้นเฉือนในจาระบีมีค่าต่ำกว่าค่าจำกัดโครงสร้างจุลภาคจะฟื้นฟูทันที การกำหนดค่า yield stress สำหรับจาระบีเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะเราสามารถกำหนดความได้เปรียบสำหรับการใช้งานในระบบหล่อลื่นของเครื่องจักรหรือในโหนดความเสียดทาน

2.5 กลศาสตร์ของของไหล [9]

2.5.1 เฮดความดัน (Pressure Head, H)

โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความดันความหมายคือแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่มีหน่วยคือ นิวตันต่อตารางเมตรหรือพาสคัล(N/m², Pa) ในหน่วย SI และปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือพีเอสไอ(lbf/in², PSI) ในหน่วยอังกฤษ ซึ่งความดันที่บอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่เกิดบนหน้าผิวนองรับของของเหลว นั้น เราจะเรียกว่า เฮดความดัน(Pressure Head) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และเฮดความดัน H คือ

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (2.12)$$

โดยที่ γ หมายถึง น้ำหนักจำเพาะและ $\gamma = \rho g$

ρ หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลว

g หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

2.5.2 เสดความเร็ว (Velocity Head, H)

ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใด ๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเสด คือ

$$H = \frac{V^2}{2g} \quad (2.13)$$

โดยที่ V หมายถึง ความเร็วของการไหล

g หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

เสดความเร็วอาจจำกัดความได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นความสูงที่ของเหลวตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลกจนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

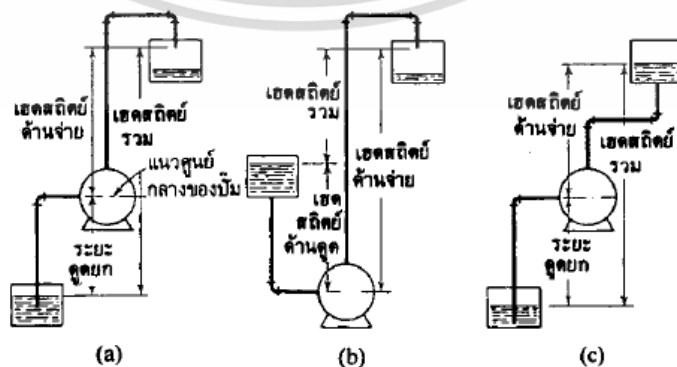
2.5.3 เสดสถิตย์ (Static Head)

ในการทำงานของปั๊มโดยทั่วๆ ไปของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงาน เพื่อให้มันไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งอยู่สูงกว่าดังรูปที่ 2.3 ความดันซึ่งคิดเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่กระทำต่อศูนย์กลางของปั๊มทั้งทางด้านดูดและด้านจ่ายในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบเป็นศูนย์เรียกว่า เสดสถิตย์ (Static Head)

จากรูปที่ 2.3 ระยะทางในแนวตั้งที่บอกเป็นแท่งความสูงของของเหลว หรือเสด จากศูนย์กลางของปั๊มถึงปลายของท่อจ่ายเรียกว่า เสดสถิตย์ด้านจ่าย (Static Discharge Head) ระยะจากจุดศูนย์กลางของปั๊มถึงระดับผิวของของเหลวที่ปลายของท่อดูดซึ่งอยู่สูงกว่า (รูป b) เรียกว่า เสดสถิตย์ด้านดูด (Static Suction Head) ถ้าผิวของของเหลวอยู่ต่ำกว่า (รูป a และ c) ความดันที่ศูนย์กลางของปั๊มจะมีค่าเป็นลบ ในกรณีนี้จะเรียกว่า ระยะดูดยก (Static Suction Lift) แทน

2.5.4 เสดสถิตย์รวม (Total Static Head)

คือผลต่างทางพีชคณิตของเสดสถิตย์ด้านจ่าย (Static Discharge Head) กับเสดสถิตย์ด้านดูด (Static suction Head) ค่าดังกล่าวนี้ เป็นเสดค่าสุดที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวก่อนที่จะมีการไหลเกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 ค่าจำกัดความของเสดสถิตย์ (Static Head) [9]

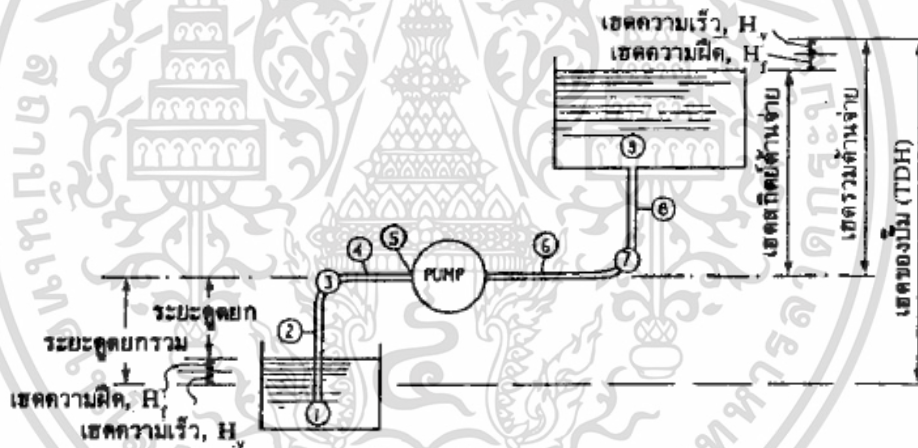
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 เฮดความฝืด (Friction Head, H_f)

ในขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบท่อทั้งทางด้านดูดและด้านจ่ายพลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังของท่อและส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งรวมเรียกว่าเฮดความฝืด (Friction Head)

ในระบบสูบน้ำทั่ว ๆ ไป การเสียเฮดเนื่องมาจากความฝืดอาจเกิดขึ้นได้หลายจุด ดังรูปที่ 2.4 การเสียเฮดทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลผ่านระบบท่อซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นในขณะที่ปั๊มกำลังทำงาน ระยะดูดยกรวมที่เกิดขึ้นจริงจะเท่ากับระยะดูดยก (Static Suction Lift) รวมกับเฮดความฝืดทางด้านดูดทั้งหมดตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง 5 ในกรณีที่ของเหลวทางด้านดูดอยู่สูงกว่าศูนย์กลางของปั๊ม เฮดด้านดูดรวม (Total Suction Head) ที่เกิดขึ้นจริงจะเท่ากับเฮดสถิตย์ด้านดูด (Static Suction Head) ลบด้วยเฮดความฝืดทั้งหมดทางด้านดูด

สำหรับทางด้านจ่ายก็เช่นเดียวกัน คืออาจจะรวมการเสียเฮดที่จุดที่ 6 ถึง 9 เข้าด้วยกันเป็นเฮดความฝืด และเฮดรวมด้านจ่าย (Total Discharge Head) ที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ปั๊มทำงาน จะเท่ากับเฮดสถิตย์ด้านจ่ายรวมกับเฮดความฝืดทั้งหมดทางด้านจ่าย



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งที่เกิดการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในระบบท่อและอุปกรณ์ [9]

- จุดที่ 1 เป็นการเสียเฮดความเร็วเนื่องจากการไหลเข้าท่อ (Entrance loss) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงและอุปกรณ์ที่ปลายท่อดูด
- จุดที่ 2 เป็นการเสียเฮดเนื่องมาจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังของท่อ
- จุดที่ 3 เป็นการเสียเฮดเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหล
- จุดที่ 4 เป็นการเสียเฮดในเส้นท่อเหมือนจุดที่ 2
- จุดที่ 5 เป็นการเสียเฮดที่อุปกรณ์ทางด้านดูดของปั๊ม

2.5.6 เสดรรวมของปั้ม (Total Dynamic Head) หรือ TDH

ก็คือพลังงานทั้งหมดที่บอกในรูปของเสดที่ปั้มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อให้ของเหลวนั้นไหลผ่านระบบท่อด้วยอัตราที่กำหนด หรือ

เสดรรวมของปั้ม (TDH) = เสดสถิตย์รวม (Total Static Head) + เสดความฝืดรวม (Friction Head)

จะเห็นได้ว่า ในส่วนของเสดสถิตย์นั้นมีค่าคงที่ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งของระบบ แต่เสดความฝืดจะผันแปรไปตามอัตราการไหลผ่าน

2.6 การไหลในท่อปิด [9]

2.6.1 นิยามของการไหล

ลักษณะของการไหลในท่อ ถูกจำแนกออกด้วยการพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลเมื่อเทียบกับเวลา สถานที่ และแรงเฉื่อย (Forces of inertia) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของเหลวเมื่อเทียบกับแรงหนืด (Forces of viscosity) เมื่อความเร็วของการไหลที่จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การไหลนั้นเรียกว่า การไหลคงที่ หรือ Steady Flow ถ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาก็เรียกว่า การไหลที่ไม่คงที่ หรือ Unsteady Flow ถ้าความเร็วของการไหลในขณะใดขณะหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางตลอดระยะทางตามเส้นสายน้ำ (Streamline) การไหลนั้นเรียกว่า Uniform flow ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า Non-Uniform flow

สำหรับการเปรียบเทียบแรงเฉื่อยกับแรงหนืดนั้นก็เพื่อดูว่ามวลของของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อนั้นมีการไหลวนและกระแทกกระทั้นกันมากน้อยอย่างไร ถ้าหากแรงหนืดมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลของของเหลวก็จะมีลักษณะคล้ายเป็นแผ่นขนานกันไป การไหลในลักษณะดังกล่าวก็เรียกว่า การไหลแบบราบเรียบ หรือ Laminar Flow แต่ถ้าหากแรงหนืดมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลก็จะปั่นป่วน มวลของของเหลวจะมีการไหลวนการไหลในลักษณะนี้เรียกว่า Turbulent Flow ซึ่งการที่จะบอกว่าการไหลในท่อใด ๆ เป็น Laminar Flow หรือ Turbulent Flow ก็ให้พิจารณาจาก Reynolds Number, Re คือ

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.14)$$

โดยที่ ρ หมายถึง ความหนาแน่นของของเหลว

V หมายถึง ความเร็วของการไหล

D หมายถึง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

μ หมายถึง ค่าความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity)

ในทางปฏิบัติเราถือว่า ถ้า Re มีค่าไม่เกิน 2,000 การไหลเป็นแบบ Laminar Flow ถ้ามากกว่านี้เป็น Turbulent Flow

2.6.2 การเสียดความฝืด

เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าการเสียดเนื่องจากความฝืด (Friction head loss) ในเส้นท่อตรง ไม่ว่าจะการไหลนั้นจะเป็นแบบ Laminar Flow หรือ Turbulent Flow สามารถคำนวณได้จากสมการของ Darcy-Weisbach คือ

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.15)$$

โดยที่ h_f หมายถึง การเสียดเนื่องจากความฝืด บอกเป็นความสูงของของเหลว

f หมายถึง สัมประสิทธิ์ของความฝืด

L หมายถึง ความยาวของท่อ

D หมายถึง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

V หมายถึง ความเร็วของการไหลในท่อ

g หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด (f) ขึ้นอยู่กับทั้งคุณสมบัติของท่อและลักษณะการไหล ในกรณีของ Laminar Flow ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวอาจจะหาได้จากสูตร

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Laminar Flow, } Re \leq 2000) \quad (2.16)$$

ขอให้สังเกตว่า : กรณีที่เป็น Laminar Flow การเสียดจะขึ้นอยู่กับ Reynolds Number เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของผนังท่อ

2.6.3 การเสียดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ ประตูน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียส่วนน้อย (Minor Loss) อาจจะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (2.17)$$

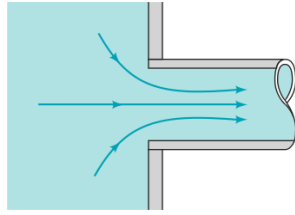
โดยที่ h_L หมายถึง การเสียดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

K_L หมายถึง สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์

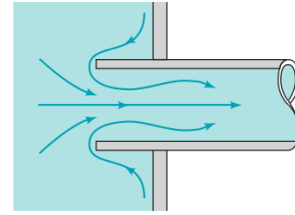
V หมายถึง ความเร็วของการไหล

g หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

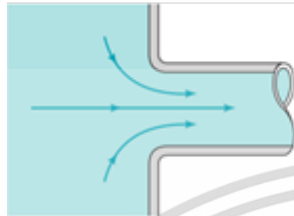
โดยที่ K_L ขึ้นกับคุณสมบัติของของไหลและรูปร่างที่พิจารณาโดยอ้างอิงได้จากรูปที่ 2.5 - 2.8



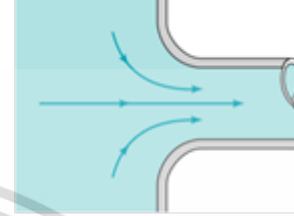
(a) Re-entrant, $K_L = 0.8$



(b) Sharp-Edged, $K_L = 0.5$

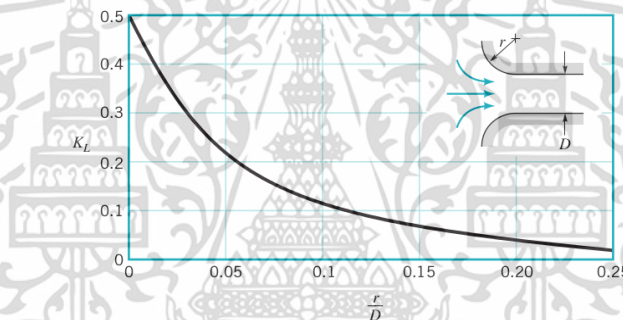


(c) Slightly Rounded, $K_L = 0.2$

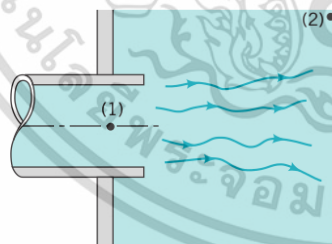


(d) Well-Rounded, $K_L = 0.04$

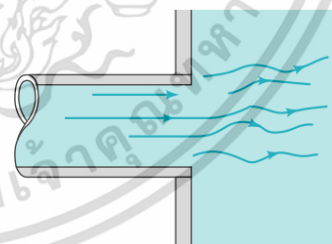
รูปที่ 2.5 สภาวะทางเข้า (Entrance Flow Condition) และสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss Coefficient) [3]



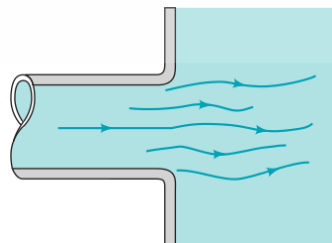
รูปที่ 2.6 สัมประสิทธิ์การสูญเสีย K_L ที่ทางเข้าเป็นฟังก์ชันของการกลมมนที่ทางเข้า r/D [3]



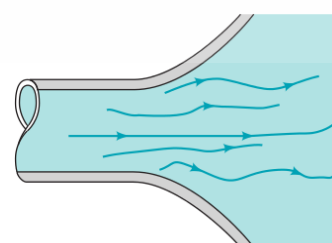
(a) Re-entrant, $K_L = 1.0$



(b) Sharp-Edged, $K_L = 1.0$

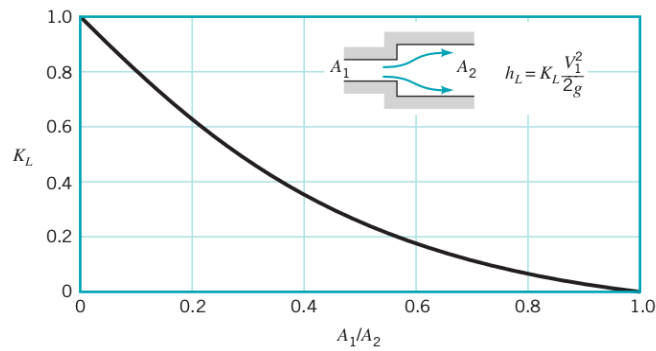


(c) Slightly Rounded, $K_L = 1.0$



(d) Well-Rounded, $K_L = 1.0$

รูปที่ 2.7 สภาวะทางออก (Exit Flow Condition) และสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss Efficient) [3]



รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การสูญเสีย K_L ของท่อขยายขนาดอย่างฉับพลัน [3]

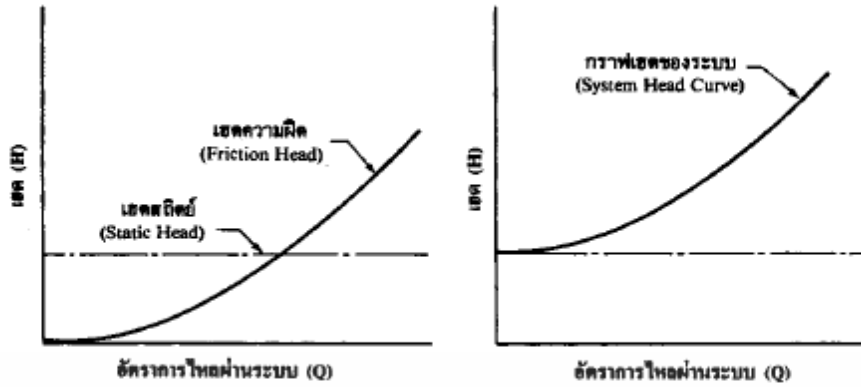
2.6.4 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

คือกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเฮดรวม (TDH) หรือพลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหลนั้น พลังงานที่ปั๊มจะต้องให้ซึ่งบอกเป็นความสูงของแท่งของเหลว หรือเฮด มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกันคือ

- (1) ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูดและท่อจ่าย หรือ เฮดสถิตย (Static Head)
- (2) พลังงานที่สูญเสียไปในการไหลผ่านระบบเนื่องจากความฝืดในเส้นท่อ (Friction Head Loss) รวมกับการสูญเสียในอุปกรณ์ของระบบท่อ และการสูญเสียอื่น ๆ (Minor Head Loss) เช่น การสูญเสียที่ปากทางเข้าและทางออก การสูญเสียที่ช่วงต่อที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ เป็นต้น การสูญเสียพลังงานส่วนนี้รวมเรียกว่า เฮดความฝืด (Friction Head)

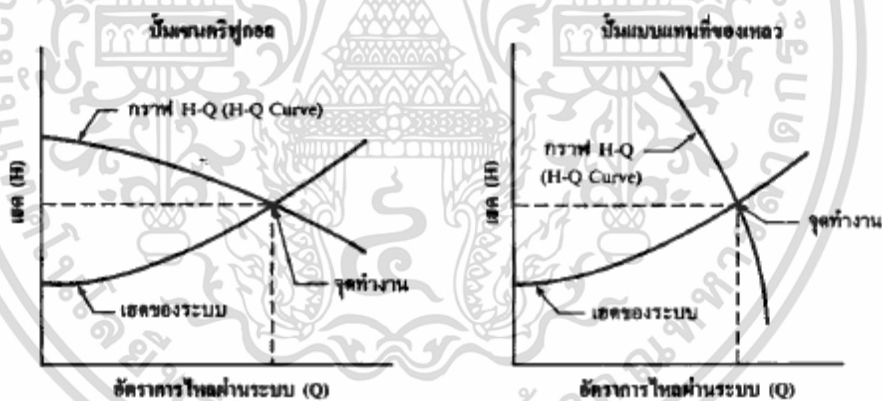
โดยทั่ว ๆ ไปแล้วความต่างระดับของของเหลวที่ปลายทั้งสองของระบบจะมีค่าคงที่ ยกเว้นมีการเปลี่ยนแปลงระดับที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้าง เช่น การสูบน้ำจากแม่น้ำซึ่งมีน้ำขึ้น-น้ำลง เป็นต้น การเขียนกราฟเฮดของระบบอาจจะแยกเขียนพลังงานที่ปั๊มจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวตามข้อ (1) และ (2) ข้างต้น ในกรณีที่ความต่างระดับของของเหลวมีค่าคงที่ กราฟของพลังงานส่วนนี้ก็จะ เป็นเส้นราบขนานไปกับแกน X ซึ่งแทนอัตราการไหล สำหรับการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในข้อ (2) นั้นจะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของอัตราการไหล ดังนั้นลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา เมื่อมีการเขียนแยกกัน

กราฟของข้อ (1) เรียกว่า กราฟเฮดสถิตย (Static Head Curve) และกราฟข้อ (2) เรียกว่า กราฟเฮดความฝืด (Friction Head Curve หรือ Dynamic Head Curve) เมื่อรวมกราฟทั้งสองเข้าด้วยกันก็จะได้เป็น กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve) [9]

กราฟเฮดของระบบที่มีช่วงอัตราการไหลครอบคลุมทุกสภาวะการทำงานจะช่วยให้เลือกปั๊มที่เหมาะสม กล่าวคือ เมื่อนำกราฟดังกล่าวไปเขียนบนสเกลเดียวกันกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบลับกับเฮดหรือกราฟ H-Q ของปั๊ม จุดที่กราฟ H-Q ตัดกับกราฟเฮดของระบบจะเป็นจุดที่ปั๊มทำงาน ดังรูปที่ 2.10 โดยปกติกราฟ H-Q ของปั๊มจะมีเส้นแสดงประสิทธิภาพที่อัตราการสูบลับขนาดต่าง ๆ ไว้ด้วย ดังนั้น กราฟเฮดของระบบจะช่วยให้สามารถเลือกปั๊มให้การทำงานของปั๊มนั้นมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับสูงตลอดช่วงการทำงานที่ต้องการได้



รูปที่ 2.10 การหาอัตราการสูบลับและเฮดที่ปั๊มจะทำงานโดยใช้กราฟเฮดของระบบและกราฟ H-Q [9]

2.6.5 ระบบนิวแมติก (Pneumatic System)

ระบบนิวแมติกใช้การอัดตัวของแก๊สเพื่อส่งผ่านและควบคุมกำลัง โดยปกติแล้วจะใช้อากาศเป็นตัวกลางเพราะอากาศมีความปลอดภัย ราคาถูก และเป็นของไหลที่หาได้ง่าย มีเหตุผลหลายประการในการพิจารณาใช้ระบบนิวแมติกแทนระบบไฮดรอลิก ดังนี้

1. ของเหลวมีความหนืดมากกว่าแก๊ส โดยระบบไฮดรอลิกน้ำหนักของน้ำมันเป็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อแอกทูเอเตอร์ (Actuators) ทำงาน และเมื่อเปิดและปิดวาล์ว จากกฎการเคลื่อนที่

- ของของนิวตัน (แรงเท่ากับมวลคูณด้วยความเร่ง) แรงที่ต้องใช้ในการเร่งหรือขับเคลื่อนน้ำมันมีค่ามากกว่าหลายเท่าที่ต้องใช้ในการเร่งหรือขับเคลื่อนอากาศในปริมาณที่เท่ากัน
2. ของเหลวที่มีความหนืดมากกว่าก๊าซด้วยเช่นกัน ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานแรงเสียดทานและการสูญเสียพลังงานมากขึ้น
 3. เนื่องจากไฮดรอลิกเป็นระบบใช้ของเหลว มันต้องการแหล่งกักเก็บและการออกแบบระบบไม่รั่วไหล แต่ระบบนิวแมติกใช้อากาศและสามารถปล่อยสู่สภาพแวดล้อมโดยรอบได้เลยทันที
 4. ระบบนิวแมติกราคาถูกลงกว่าระบบไฮดรอลิก

2.7 Air Capacity Rating ของเครื่องอัดอากาศ [2]

โดยทั่วไปแล้วเครื่องอัดอากาศใช้หน่วย cfm of free air หรือลูกบาศก์ฟุตต่อนาที โดยให้นิยามที่เงื่อนไขของ actual atmospheric ซึ่งหน่วย cfm of free air เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า scfm โดยที่เงื่อนไขความดันบรรยากาศของอากาศทางเข้าเครื่องอัดอากาศ (compressor inlet air) คือ 14.7 psia และ 68°F ซึ่ง scfm ย่อมาจาก standard cubic feet per minute ดังนั้นการคำนวณเป็นสิ่งจำเป็นในการเลือกความจุของเครื่องอัดอากาศในหน่วย cfm หรือ scfm เพื่อเลือกใช้สำหรับการใช้งาน ในอีกทางหนึ่งเพื่อใช้ในการคำนวณในหน่วยเมตริกคือ m³/min โดยที่เงื่อนไขความดันบรรยากาศ คือ 101,000 Pa และ 20°C

สมการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้จากการแก้สมการทั่วไปของแก๊สโดยใช้สมการ (2.18)

$$V_1 = V_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (2.18)$$

จากสมการดังกล่าว เลข 1 แทนบรรยากาศทางเข้าของเครื่องอัดอากาศ (standard หรือ actual) และ เลข 2 แทนช่องจ่ายอากาศของเครื่องอัดอากาศ เมื่อหารด้วยเวลา (t) ทั้งสองข้างของสมการข้างต้นซึ่งปริมาตร V_1 และ V_2 หารด้วยเวลาจะได้อัตราการไหล Q_1 และ Q_2 ดังนั้นเราจะได้สมการคือ

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (2.19)$$

หมายเหตุ จากสมการ (2.19) ต้องใช้ความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิวาล์วในการคำนวณ

2.7.1 ขนาดที่เก็บลม (Air Receivers)

ขนาดของที่เก็บลมต้องพิจารณาตัวแปรหลายอย่างเช่น สิ่งที่เป็นต่อระบบความดันและอัตราการไหล ประสิทธิภาพการส่งอากาศอัด (compressor output capability) และประเภทของหน้าที่ในระบบการทำงาน โดยปกติแล้วที่เก็บลมคือถังเก็บลม air reservoir หน้าที่ของมันก็คือจ่ายลมที่ความดันคงที่เป็นหลัก ซึ่งจ่ายให้กับ dampen pressure pulse เช่นกันที่มาจากถังเก็บลมหรือไม่ก็ระบบนิวเมติกระหว่างวาล์วเลื่อนและส่วนการทำงาน บ่อยครั้งที่ระบบนิวแมติกต้องการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศที่อัตราการไหลเกินความสามารถของคอมเพรสเซอร์ ซึ่งที่เก็บลมต้องสามารถจัดการความต้องการชั่วขณะนี้ได้

2.7.2 การควบคุมอัตราการไหลของอากาศผ่านรูเปิด (Air flow-rate control with orifices)

อัตราการไหลผ่านรูเปิด(orifice)

เนื่องจากวาล์วเป็นออริฟิสที่มีความผันผวนจึงเป็นเรื่องสำคัญเพื่อที่จะหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านรูเปิด อย่างไรก็ตามเนื่องจากสภาพการอัดตัวของอากาศที่อธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ซับซ้อนมากขึ้น

สมการที่ (2.24) และ (2.25) เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านรูเปิดด้วยหน่วย SI และ หน่วยเมตริก

$$Q = 22.7C_V \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)(p_2)}{T_1}} ; \text{US Unit} \quad (2.20)$$

$$Q = 0.0698C_V \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)(p_2)}{T_1}} ; \text{SI Unit} \quad (2.21)$$

2.8 การสูญเสียความดันของอากาศในท่อ [2]

ในกรณีของของเหลว เมื่ออากาศไหลผ่านท่อจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นการสูญเสียความดัน (pressure loss) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Harris

$$p_f = \frac{cLQ^2}{3600(CR) \cdot d^5} \quad (2.22)$$

โดยที่ p_f หมายถึง การสูญเสียความดัน (pressure loss) หน่วย พีเอสไอ (psi)

c หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

L หมายถึง ความยาวของท่อ หน่วย ฟุต (ft.)

Q หมายถึง อัตราการไหล หน่วย ลูกบาศก์ฟุตมาตรฐานต่อนาที (scfm)

CR หมายถึง อัตราส่วนของการอัด หรืออัตราส่วนระหว่างความดันในท่อกับความดันบรรยากาศ

d หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ หน่วย นิ้ว (in)

จากตาราง 40 commercial pipe ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลองสามารถแทนด้วยฟังก์ชันของเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ

$$C = \frac{0.1025}{d^{0.31}} \quad (2.23)$$

แทนสมการที่ (2.23) ลงในสมการของ Harris สำหรับการคำนวณการสูญเสียความดัน (pressure loss) ในท่ออากาศจะได้ว่า

$$p_f = \frac{0.1025LQ^2}{3600(CR) \cdot d^{5.31}} \quad (2.24)$$

วาล์วเรียงที่เส้นผ่าศูนย์กลาง d และ $d^{5.31}$ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับตาราง 40 common pipe sizes

ตารางที่ 2.2 วาล์วเรียงที่เส้นผ่าศูนย์กลาง d และ $d^{5.31}$ สำหรับตาราง 40 common pipe sizes[1]

Nominal pipe size (in)	Inside Diameter d (in)	$d^{5.31}$	Nominal pipe size (in)	Inside Diameter d (in)	$d^{5.31}$
3/8	0.493	0.0234	1 1/2	1.610	12.538
1/2	0.622	0.0804	2	2.067	47.256
3/4	0.824	0.3577	2 1/2	2.469	121.419
1	1.049	1.2892	3	3.068	384.771
1 1/4	1.380	5.5304	3 1/2	3.548	832.550

ตารางที่ 2.3 ค่าความยาวสมมูลของข้อต่อลมในแต่ละชนิด (ฟุต) [1]

FITTING	NOMINAL PIPE SIZE (in)						
	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2
GATE VALVE (FULLY OPEN)	0.30	0.35	0.44	0.56	0.74	0.86	1.10
GLOBE VALVE (FULLY OPEN)	14.0	18.6	23.1	29.4	38.6	45.2	58.0
TEE (THROUGH RUN)	0.50	0.70	1.10	1.50	1.80	2.20	3.30
TEE (THROUGH BRANCH)	2.50	3.30	4.20	5.30	7.00	8.10	10.44
90° ELBOW	1.40	1.70	2.10	2.60	3.50	4.10	5.20
45° ELBOW	0.50	0.78	0.97	1.23	1.60	1.90	2.40

การสูญเสียจากความเสียดทานในข้อต่อลมสามารถคำนวณโดยใช้สมการของ Harris ถ้าเรารู้ความยาวสมมูลของข้อต่อลม ตัวแปร L ในสมการของ Harris จะใช้แทนค่าความยาวสมมูลทั้งหมดของท่อที่รวมข้อต่อด้วย จากตารางที่ 2.3 ให้ค่าความยาวสมมูลในหน่วยฟุตสำหรับข้อต่อในแต่ละชนิด

2.9 การทำงานของระบบนิวแมติก [8]

2.9.1 เครื่องอัดลม (Compressor)

ระบบนิวแมติกใช้การอัดตัวของแก๊สเพื่อส่งผ่านและควบคุมกำลัง โดยปกติแล้วจะใช้อากาศเป็นตัวกลางเพราะอากาศมีความปลอดภัย ราคาถูก และเป็นของไหลที่หาได้ง่าย อุปกรณ์ที่สร้างลมอัดได้แก่เครื่องอัดลม(Compressor) โดยทั่วไปเรียกว่าปั๊มลมมีหน้าที่อัดและจ่ายอากาศให้เพียงพอต่อการใช้งานของระบบนิวแมติกที่ได้ออกแบบไว้ ประเภทของเครื่องอัดลมนั้นมีหลายประเภท เช่น

1.) ปั๊มลมแบบลูกสูบ (Piston Compressor)

ทำงานโดยการอัดอากาศในกระบอกสูบให้มีปริมาตรลดลงเพื่อทำให้มีความดันเพิ่มมากขึ้น จำนวนชั้นของการอัดอากาศขึ้นอยู่กับความดันที่ต้องการใช้งาน เช่น ชนิดลูกสูบอัดชั้นเดียว (Single stage) ความดัน 4-10 บาร์ ชนิดลูกสูบอัด 2 ชั้น (Double stage) ความดัน 15-30 บาร์ โดยปั๊มลมแบบลูกสูบลูกสูบมี 2 แบบ คือแบบใช้สายพานในรูปที่ 2.11 และแบบโรตารี ซึ่งปั๊มลมลูกสูบแบบใช้สายพานจะให้เสียงเงียบกว่าแบบโรตารีที่มีมอเตอร์ในตัว แต่ข้อดีของปั๊มลมลูกสูบแบบโรตารีคือได้ลมใช้งานที่เร็วกว่าแบบสายพาน



รูปที่ 2.11 ปั๊มลมแบบลูกสูบอัดแบบสายพาน [1]

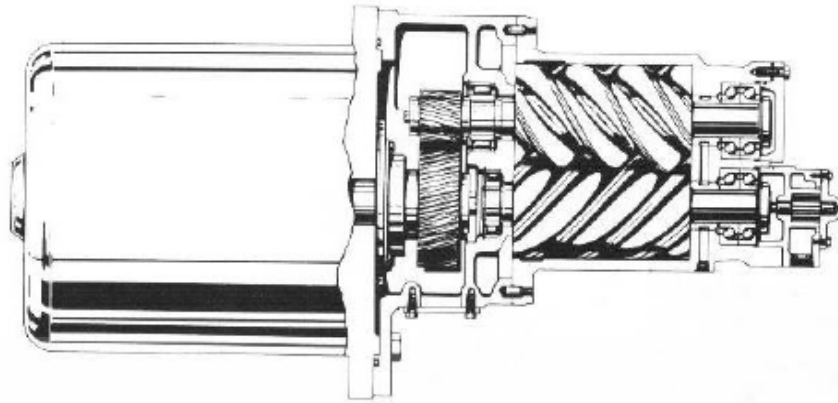
หลักการทำงาน

จังหวะดูด เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลง ลิ้นของวาล์วไอดีจะเปิดออก ทำให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าทางด้านลมดูดเข้ามาในห้องลูกสูบ ลิ้นทางด้านไอเสียจะปิด

จังหวะอัด เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น ทำให้อากาศที่อยู่ในห้องลูกสูบถูกอัด และลิ้นไอเสียจะเปิดออก ทำให้ลมที่ถูกอัดออกไปทางด้านลมออก ส่วนลิ้นไอดีจะปิด

2.) ปั๊มลมแบบสกรู (Screw compressor)

ทำงานโดยการอัดอากาศจากเพลาสกรูสองเพล่าที่ขบกันดังรูปที่ 2.13 ทิศทางการหมุนเข้าหากัน โดยตัวหนึ่งมีฟันเป็นสันนูน อีกตัวเป็นสันเว้า เครื่องอัดลมชนิดนี้ไม่มีเสียงดัง ไม่มีการหล่อลื่น แต่น้ำมันหล่อลื่นต้องใช้เพื่อช่วยในการระบายความร้อนและป้องกันการรั่วไหลของอากาศในขณะอัด



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของปั๊มลมแบบสกรูชั้นเดียว [2]

3.) ปั๊มลมแบบไดอะแฟรม (Diaphragm compressor)

เครื่องอัดลมชนิดนี้เป็นชนิดลูกสูบเหมือนกัน เพียงแต่ระหว่างลูกสูบและส่วนที่อัดอากาศถูกปิดกันด้วยแผ่นไดอะแฟรม เหมาะกับอากาศอัดอากาศที่ไม่มีสิ่งเจือปน ไม่ต้องการน้ำมันหล่อลื่น เรียกโดยทั่วไปว่า ปั๊มลมแบบ Oil Free

2.9.2 ชุดปรับปรุงคุณภาพลมอัด

อุปกรณ์ทำงานในระบบนิวแมติกต้องการลมที่ปราศจากสิ่งสกปรกต่างๆ รวมถึงน้ำอีกด้วย อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพลมอัด (Service Unit) จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบนิวแมติก ซึ่งประกอบด้วย

1.) ตัวกรองหรือฟิลเตอร์ (Filter) คือ อุปกรณ์ที่ใช้กรองเศษฝุ่นผง โดยลมอัดที่เข้ามาจากเครื่องอัดลมจะไหลผ่านตัวกรองรูปกรวยและเกิดการหมุนวน จนสิ่งสกปรกและน้ำหลุดออกจากลม โดยน้ำจะไหลลงด้านล่าง และฝุ่นจะคงอยู่ในไส้กรอง

2.) วาล์วลดความดันลมอัดหรือเรกูเลเตอร์ (Regulator) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความดันลม ซึ่งโดยปกติลมอัดที่เข้ามาจากเครื่องอัดลมมีความดันสูงกว่าความดันใช้งานของอุปกรณ์นิวแมติก โดยมีหลักการทำงาน คือ ความดันของลมที่เข้ามาจะส่งแรงไปยังสปริงที่ปรับโดยมือหมุน เมื่อสปริงเกิดการยก วาล์วจะเปิดให้ลมจากทางเข้าไหลเข้ามายังห้องลมใต้แผ่นไดอะแฟรมออกปทางด้านใช้งาน เมื่อความดันสูงถึงระดับที่ต้องการ ลมอัดทางด้านใช้งานจะมีความดันย้อนกลับมากกระทำต่อแผ่นไดอะแฟรม ทำให้เกิดแรงยกจนเมื่อแรงมากพอชนะแรงกดของสปริงและแผ่นไดอะแฟรมจะเลื่อนขึ้นจากระดับเดิมทำให้วาล์วปิดบ่าวาล์วกั้นไม่ให้ลมไหลผ่านวาล์วไปได้ จนกระทั่งความดันใช้งานในระบบต่ำกว่าที่กำหนดแผ่นอะแฟรมจะเลื่อนกลับลงมาอีกครั้ง สลับกันไปมา

3.) อุปกรณ์หล่อลื่นลมอัดหรือลูบริเคเตอร์ (Lubricator) คือ อุปกรณ์ที่ช่วยในการหล่อลื่นของอุปกรณ์ทำงานโดยมีสัญลักษณ์ FRL ดังรูปที่ 2.17 เพื่อลดความฝืดของชิ้นส่วนภายใน ลดการเสียดสีและการสึกหรอ ป้องกันการกัดกร่อนของสนิมกรณีมีอากาศรั่วซึมเข้าไป การทำงานใช้ความดัน

ที่แตกต่างของคอคอดหรือช่องแคบ เมื่อลมอัดไหลผ่านคอคอดจะทำให้ความดันลดลง จึงเกิดความแตกต่างระหว่างความดันของลมอัดและน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากอัดลมที่ผ่านคอคอดนั้นมีความเร็วสูงเพียงพอที่จะพาน้ำมันหล่อลื่นไปเป็นละอองเล็กๆ ที่ละเอียดมากๆ จนไปถึงอุปกรณ์ทำงาน

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในระบบนิวแมติก

- 1.เป็นประเภทเดียวกับน้ำมันไฮดรอลิก
- 2.ความหนืด SAE 10



Figure 10-24. Combination filter, regulator, lubricator unit. (Courtesy of C. A. Norgren Co., Littleton, Colorado.)

รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพลมอัด [2]

2.9.3 เกจวัดความดัน (Pressure gauge)

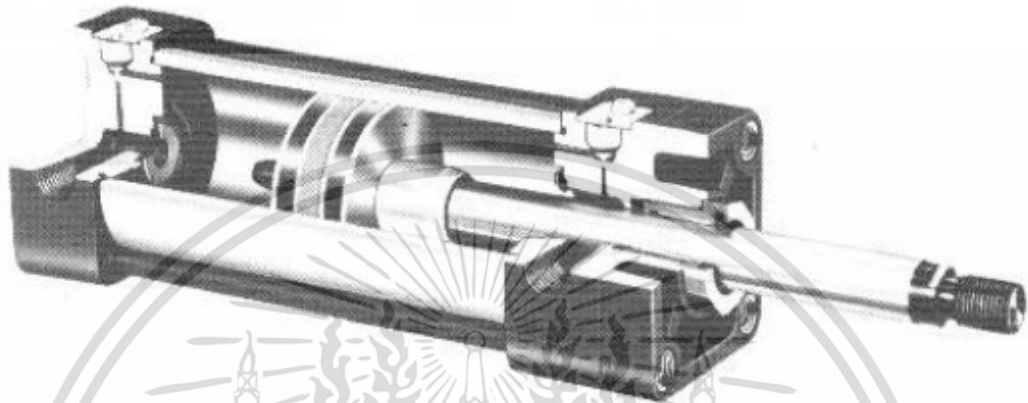
อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันในระบบนิวแมติก ซึ่งมีความดันไม่เกิน 10 บาร์ มีหลักการทำงานคือเมื่อลมอัดเข้าผ่านท่อบูร์ตองทิวบ์ (Bourdon tube) ซึ่งเป็นรูปตัว V คว่ำประกบกัน ภายในกลวงรูปร่างเป็นขดกลม ปลายปิด โดยสามารถยืดออกได้เมื่อได้รับความดัน ความดันภายในท่อจะพยายามดันให้ตัวเองยืดตรง ส่วนปลายอีกด้านของท่อโค้งจะติดกับชุดฟันเฟืองรูปสี่เหลี่ยมและฟันเฟืองของเข็มชี้ เพื่อเป็นตัวแสดงการเคลื่อนที่ของความดันภายในท่อโค้ง ถ้าความดันมากท่อจะยืดตัวมาก เข็มชี้จะชี้ค่ามาก ถ้าความดันน้อยท่อจะยืดตัวน้อย เข็มชี้จะชี้ค่าน้อย ช่องแคบจะทำหน้าที่เป็นเบาะกันกระแทกของความดันที่เข้ามาไม่สม่ำเสมอ

2.9.4 วาล์วควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

วาล์วควบคุมทิศทาง หรือ D.C.V มีหน้าที่ควบคุมทิศทางของลมอัดให้ไหลไปยังทิศทางที่ต้องการ สัญลักษณ์ที่ใช้ ใช้ในระบบ DIN 24300 และ ISO 1219 หลักการทำงาน เมื่อกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะดูดแกนเหล็กของวาล์วขึ้น ซึ่งทำให้ลิ้นวาล์วเกิดการเลื่อนตรงข้ามกับฝั่งของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์

2.9.5 กระบอกลูกสูบทำงานสองทางโดยใช้ลม (double acting pneumatic cylinder)

จากรูปที่ 2.14 การทำงานโดยใช้อัดลมเข้าทางด้านลูกสูบและออกทางด้านก้านสูบนั้น ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ออก กลับกันถ้าใช้อัดลมเข้าทางด้านก้านสูบและออกทางด้านลูกสูบ ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่เข้า ซึ่งทำให้ได้แรงทั้งสองทิศทาง กระบอกลูกสูบทำงานสองทางมีหลายชนิด เช่น ชนิดไม่มีเบาะลมกันกระแทก และแบบมีเบาะลมกันกระแทก



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของกระบอกลูกสูบทำงานสองทาง [2]

2.10 ปั๊ม (Pump)

เครื่องมือกลที่ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวนั้นไหลผ่านระบบท่อปิด จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ตามความต้องการ โดยพลังงานที่นำมาเพิ่มให้แก่ของเหลวนั้นอาจจะได้มาจากเครื่องยนต์ มอเตอร์ แรงลม หรือพลังงานแหล่งอื่นๆ ก็ได้

2.10.1 ประเภทของปั๊ม

ประเภทของปั๊มถ้าแบ่งตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว สามารถแบ่งได้ 4 ประเภทดังนี้

1. ประเภทเซนตริฟูกอล (Centrifugal)

ทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดหรืออิมเพลเลอร์ (Impeller) ที่ได้รับการถ่ายเทกำลังจากต้นกำลัง เมื่อใบพัดหมุนพลังงานจากเครื่องยนต์ก็จะถูกถ่ายเทโดยการผลัดกันของครีบบใบพัด (Vane) ต่อของเหลวที่อยู่รอบๆ ทำให้เกิดการไหลในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวง เมื่อมีการไหลในลักษณะดังกล่าวก็จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และเป็นผลให้มีการไหลจากจุดศูนย์กลางของพัดออกไปสู่แนวเส้นรอบวงทุกทิศทาง (Radial flow) ดังนั้นของเหลวที่ถูกใบพัดผลัดกันออกมาจะมีทิศทางการไหลที่เป็นผลรวมของแนวทั้งสอง

2. ประเภทโรตารี (Rotary)

เป็นแบบที่ทำงานโดยของเหลวถูกดูดเข้าและอัดปล่อยออกโดยการหมุนรอบจุดศูนย์กลางของเครื่องมือกลซึ่งมีช่องว่างให้ของเหลวไหลเข้าทางด้านดูดและเก็บอยู่ระหว่างผนังของห้องสูบกับ

ขึ้นส่วนที่หมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) จนกว่าจะถึงด้านจ่าย การหมุนของโรเตอร์จะก่อให้เกิดการแทนที่เป็นการเพิ่มปริมาตรของของเหลว (Positive Displacement) ให้ทางด้านจ่าย

3. ประเภทลูกสูบชัก (Reciprocating pump)

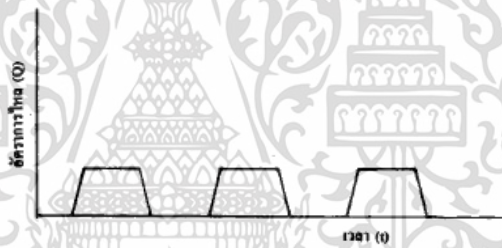
เป็นแบบที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยการเคลื่อนที่ของลูกสูบเข้าไปอัดของเหลวให้ไหลไปสู่ทางจ่าย ปริมาตรของของเหลวที่สูบได้ในแต่ละครั้งจะเท่ากับผลคูณของพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบกับช่วงชักของกระบอกสูบนั้น โดยแตกต่างจากแบบโรตารีตรงที่แบบลูกสูบชักการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง

4. ประเภทนอกแบบ (Special) สามารถจัดอยู่ใน 3 ประเภทด้านบนได้

2.10.2 ปัมประเภทลูกสูบชักแบบขับเคลื่อนโดยตรง (Reciprocating pump)

1.) ลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดจังหวะเดียว (Single-acting)

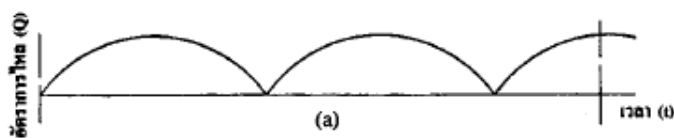
เป็นแบบง่ายที่สุดคล้ายกระบอกสูบของรถยนต์ เมื่อมีการอัดของเหลวไปสู่ทางจ่ายก็จะต้องมีการดูดของเหลวสูบเข้ามาแทนที่ ในช่วงดังกล่าวนี้ของของเหลวก็จะขาดตอนจนกว่าจะถึงจังหวะอัดในรอบถัดไป ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงอัตราการไหลของปั๊มลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดจังหวะเดียว (Single-acting) [9]

2.) ลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ (Double-acting)

ดัดแปลงกระบอกสูบจากแบบที่ 1 ให้ทำงานได้ทั้งในจังหวะอัดและจังหวะดูด ดังรูปที่ 2.16 โดยเพิ่มความยาวของกระบอกสูบขึ้น จังหวะอัดของปลายกระบอกสูบด้านหนึ่งก็จะกลายเป็นจังหวะดูดของปลายกระบอกสูบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งการดัดแปลงดังกล่าวจะทำให้อัตราการไหลของของเหลวต่อเนื่อง

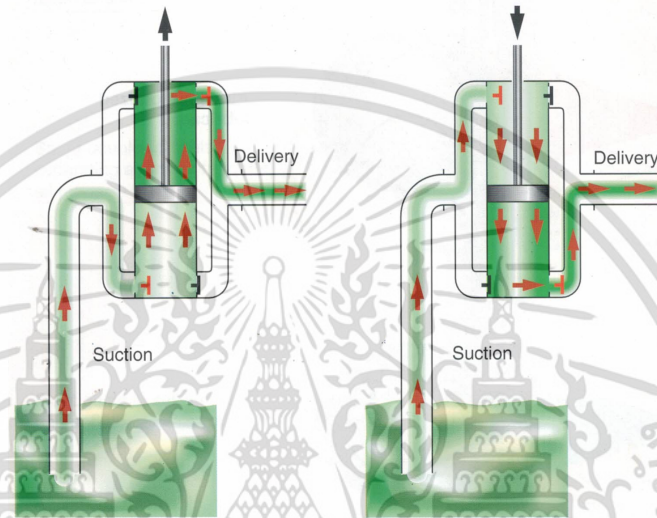


รูปที่ 2.16 กราฟแสดงอัตราการไหลของปั๊มลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ (Double-acting) [9]

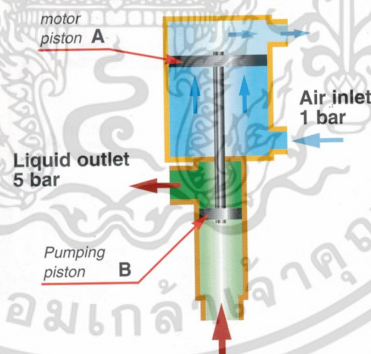
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 ป้อนจาระบีที่ทำงานด้วยลมอัด (Air operated grease pump)

ป้อนจาระบีที่มีขายตามท้องตลาดเป็นแบบลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ (Double-acting) ดังรูปที่ 2.17 และเป็นแบบหล่อลื่นตัวเอง (Self-lubricating) ไม่ต้องการการซ่อมบำรุงด้วยการหล่อลื่น โดยใช้พลังงานที่ใช้มาจากลมอัดที่จะส่งผ่านพลังงานไปให้กับจาระบี ซึ่งอัตราส่วนการอัดคือ อัตราส่วนของพื้นที่ของลมกับจาระบี ดังรูปที่ 2.18 ถ้าอัตราส่วนการอัดมากจะทำให้ความดันของจาระบีสูงสามารถเอาชนะความดันที่สูญเสียในท่อได้มากทำให้ส่งจาระบีได้ไกลและสามารถใช้กับจาระบีที่มีความหนืดเบอร์สูงๆได้ แต่จะได้อัตราการไหลที่น้อยและสิ้นเปลืองลมอัด



รูปที่ 2.17 การทำงานของป้อนจาระบีแบบลูกสูบชักแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ [4]



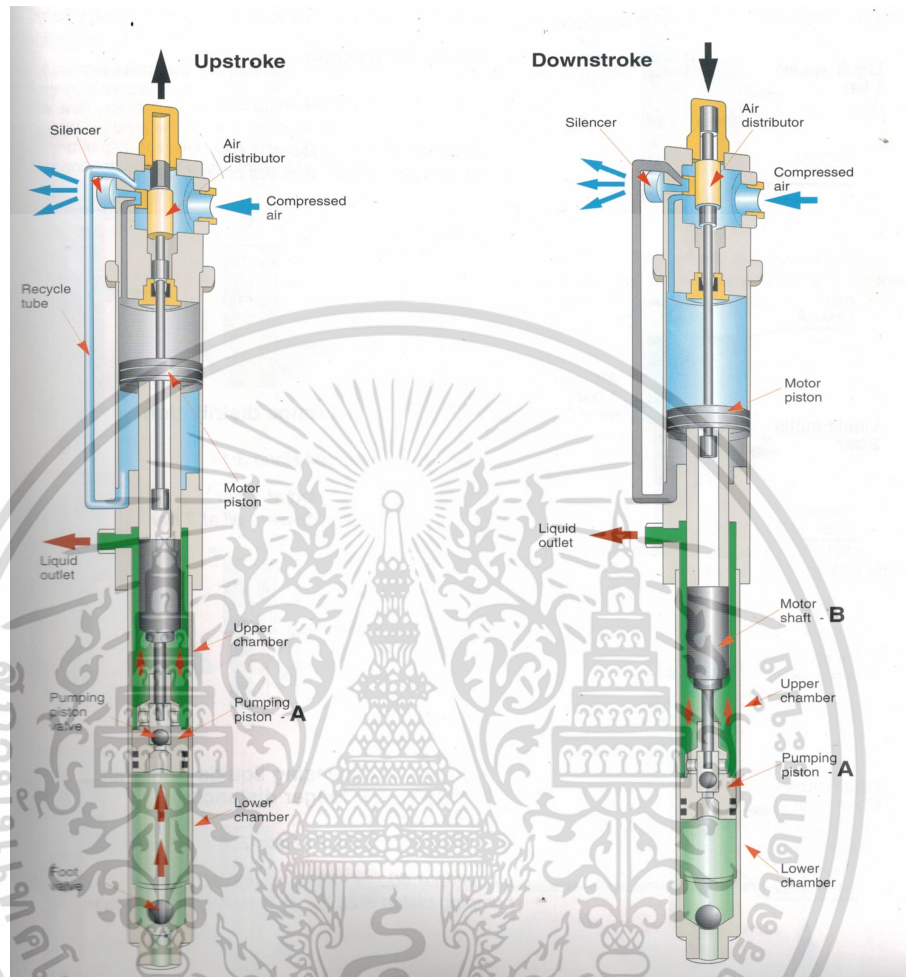
รูปที่ 2.18 อธิบายความหมายของอัตราส่วนการอัดของปั๊ม (Pump compression ratio) [4]

1. หลักการทำงานของปั๊มจาระบีแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ (Double-acting)

ปั๊มแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ (Double-acting) สามารถจ่ายจาระบีได้ทั้ง 2 แนวการเคลื่อนที่ (ขึ้นและลง) โดยอาศัยหลักการความแตกต่างในปริมาตรระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ A และเพลลา B

ในจังหวะขึ้น การจ่ายจะขึ้นอยู่กับ ลูกสูบ A (รูปที่ 2.19 ด้านซ้าย) เมื่อลูกสูบ A ดันขึ้นจะทำให้เกิดการอัดจาระบีออกไปยังทางออก

ในจังหวะลง การจ่ายจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาตรระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา B และ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลูกสูบ A (ดังรูปที่ 2.19 ด้านขวา) ทำให้เกิดการอัดจาระบีออกไปยังทางออก



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของปั๊มจาระบีแบบลูกสูบเดี่ยวและอัดสองจังหวะ [4]

2. ความสามารถในการดูด

ความสามารถในการดูดของปั๊มขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างที่มีความซับซ้อนซึ่ง ตัวแปรที่จะส่งผลมีดังนี้

- 1.) ความดันบรรยากาศ
- 2.) ความถ่วงจำเพาะของจาระบี
- 3.) ความหนืดของจาระบี
- 4.) ความสามารถในการระเหยของจาระบี
- 5.) ขนาดของท่อด้านดูดและอื่นๆ

ซึ่งท่อด้านดูดของปั๊มจาระบีในเครื่องบรรจุจาระบีไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเนื่องจาก เป็นท่อที่มากับปั๊มจาระบีซึ่งสามารถใช้งานได้ทันที โดยไม่เกิดปัญหาการดูดไม่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การนำทฤษฎีมาใช้

3.1 การออกแบบเครื่องบรรจุจาระบีหลอด

ก่อนที่จะทำการคำนวณเพื่อเลือกใช้ปั๊มจาระบีและปั๊มลมจะต้องทำการออกแบบเครื่องก่อน และเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบ จึงเริ่มต้นจากการสร้างลำดับการทำงานซึ่งได้ทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

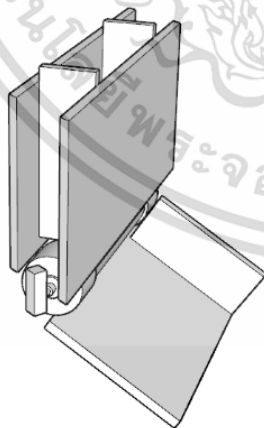
1. ลำเลียงหลอดเข้าสู่การทำงานของเครื่อง (Station 1)
2. บรรจุจาระบีเข้าหลอด (Station 2)
3. ลำเลียงฝาและวางฝา (Station 3)
4. ปิดฝาหลอดให้สนิท (Station 4)

โดยในแต่ละขั้นตอนการทำงานจะมีลักษณะการออกแบบดังนี้

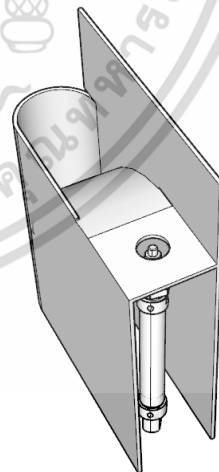
3.1.1 ลำเลียงหลอดเข้าสู่การทำงานของเครื่อง (Station 1)

การออกแบบในส่วนของขั้นตอนแรกจะมี 2 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ

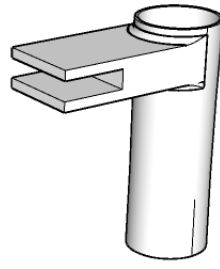
1. ชุดอุปกรณ์ป้อนหลอดจาระบีเปล่าดังรูปที่ 3.1 เพื่อทำการลำเลียงหลอดเปล่าของจาระบีเข้าส่วนการทำงานของเครื่อง
2. ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางหลอดจาระบีดังรูปที่ 3.2 เพื่อรับหลอดจากส่วนที่ 1 ลงบนช่องว่างและกระบอกสูบจะดันหลอดจาระบีผ่านหลุมไปสู่ตัวประกอบหลอดดังรูปที่ 3.3 เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ป้อนหลอดจาระบีเปล่า



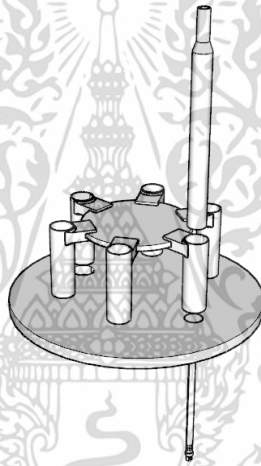
รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางหลอดจาระบี



รูปที่ 3.3 ตัวประกอบหลอด

3.1.2 บรรจุงาจาระปี่เข้าหลอด (Station 2)

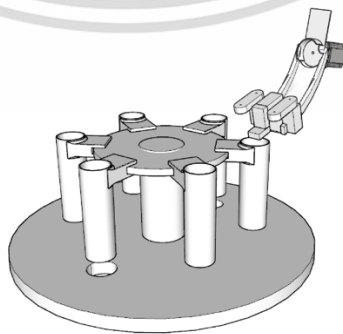
การออกแบบในขั้นตอนนี้ เป็นการเติมจาระปี่เข้าสู่อหลอดโดยจะส่วนประกอบหลักคือ กระจบอกรจ่ายจาระปี่เพื่อเติมจาระปี่และกระจบอกรสูบด้านล่างของฐานรองช่วยดันหลอดจาระปี่เข้าไปใน กระจบอกรจ่ายจาระปี่



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ป้อนจาระปี่

3.1.3 ลำเลียงฝาและวางฝา (Station 3)

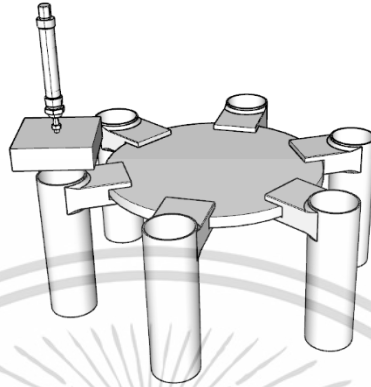
การออกแบบในขั้นตอนนี้ เป็นการป้อนฝาเข้าสู่ระบบจากชุดอุปกรณ์ลำเลียงฝาดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ลำเลียงฝา

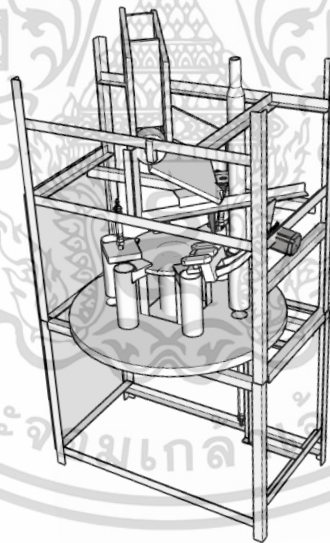
3.1.4 ปิดฝาหลอดให้สนิท (Station 4)

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบชุดอุปกรณ์ปิดฝาจาระบีดังรูปที่ 3.6 เพื่อใช้แรงกดจากกระบอก ลูกสูบส่งผ่านทางแผ่นไม้สี่เหลี่ยมที่ติดอยู่ปลายกระบอกเพื่อให้ฝาปิดสนิท



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์ปิดฝาจาระบี

หลังจากทำการออกแบบแต่ละขั้นตอน จึงทำออกแบบตัวเครื่องที่รวมทุกขั้นตอนเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ต้นแบบเครื่องบรรจุจาระบีหลอด

เนื่องจากการมีจ่ายจาระบีในขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณจาระบีที่เหมาะสมและหาจุดทำงานของปั๊มจาระบีในหัวข้อที่ 3.2

และเช่นเดียวกัน เนื่องจากการใช้ลมในการทำงานทั้งจากการจ่ายจาระบีและกระบอกสูบจึงจำเป็นต้องคำนวณเพื่อหาความดันสูญเสียและความดันที่ FRL โดยจะคำนวณในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งระบบการทำงานทั้งหมดของการบรรจุจาระบีหลอดนี้จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 องค์ประกอบทั้งหมดของเครื่องบรรจุจากระบบปิด

3.2 การคำนวณหาสมการเฮดของระบบเพื่อหาจุดทำงานของปั๊มจากระบบ

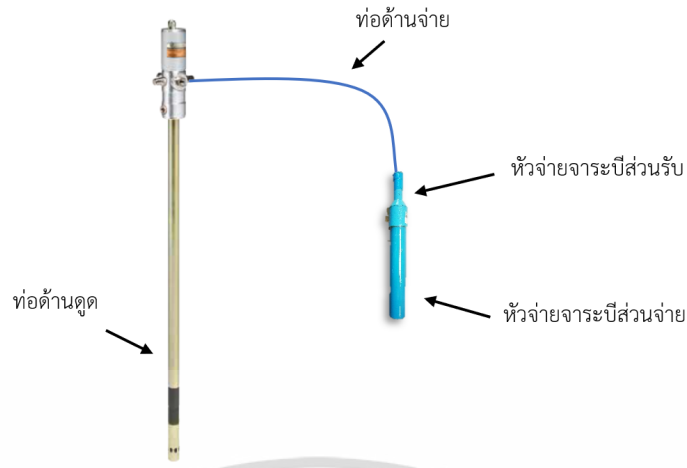
การคำนวณเฮดสูญเสียในท่อส่งโดยเขียนออกมาในรูปของกราฟเฮดของระบบหรือ System Head Curve เพื่อที่จะนำไปหาจุดทำงาน (Operation Point) โดยการเทียบกับ Pump Curve จากหนังสือรายการสินค้า (Catalog) ถ้าจุดทำงานที่ได้นั้นตรงกับที่ต้องการ นั้นหมายความว่า ปั๊มจากระบบตัวนั้นสามารถใช้งานได้ แต่ถ้าจุดทำงานที่ได้น้อยกว่าที่ต้องการให้ทำการเพิ่มความดันลมอัดที่ส่งไปปั๊มจากระบบซึ่งถ้าเพิ่มแล้วยังไม่เพียงพอ ควรที่จะเปลี่ยนปั๊มให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

3.2.1 พารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการหา System Head Curve

ในการเริ่มต้นคำนวณหา System Head Curve จะต้องรู้ขนาดและความยาวของท่อทั้งระบบ ซึ่งในส่วนของท่อด้านดูด หาได้จากหนังสือรายการสินค้า แต่ในส่วนขนาดของท่อด้านจ่ายนั้น จำเป็นต้องออกแบบเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมกับงาน สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.9

1. ท่อด้านจ่าย (ช่วง Discharge)
2. ท่อด้านดูด (ช่วง Suction)
3. หัวจ่ายจากระบบรับ (กระบอกจ่ายจากระบบ)
4. หัวจ่ายจากระบบจ่าย (กระบอกจ่ายจากระบบ)

ท่อแต่ละส่วนมีขนาดต่างกันดังตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของท่อส่งจากระเบี

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดของส่วนประกอบท่อส่งจากระเบี

	เส้นผ่านศูนย์กลาง(m.)	ความยาว(m.)
ท่อด้านจ่าย (ช่วง Discharge)	9.525×10^{-3}	2.00
ท่อด้านดูด (ช่วง Suction)	0.030	0.94
หัวจ่ายจากระเบีส่วนรับ	0.018	0.06
หัวจ่ายจากระเบีส่วนจ่าย	0.045	0.30

หมายเหตุ :

- ท่อด้านจ่าย ใช้ความยาว 2 m. เนื่องจากเป็นระยะห่างที่เหมาะสมกับการวางเครื่อง
- หัวจ่ายจากระเบีส่วนรับ ใช้ความยาว 0.06 m. เนื่องจากเป็นความยาวของท่อเกลียวทองเหลืองรวมกับตัวขยายขนาดท่อ
- หัวจ่ายจากระเบีส่วนจ่าย ใช้ความยาว 0.3 m. ระยะใกล้เคียงกับหลอดจากระเบี

ในการคำนวณกับจาระบีเบอร์ 0 จะใช้เปอร์เซ็นต์ความชื้น(Thickener Content) ที่ 4% ดังนั้นเริ่มจากการอ่านค่าพารามิเตอร์ที่จะต้องได้จากตารางที่ 2.1 จะได้ค่าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าตัวแปรของจาระบีที่มีความเข้มข้น 4% จากตารางที่ 2.1

ตัวแปร	ค่าที่อ่านจากตาราง
m	0.6696
η_{∞}	0.3884
$\eta_0 - \eta_{\infty}$	1852.4
λ	47.456
a	2
n	0.2007

3.2.2 การคำนวณหาเสดที่ท่อด้านดูด

ในการหา System Head Curve ของท่อ จะต้องอาศัยการคำนวณค่าเสดรวม(TDH; Total dynamics Head)ของท่อ

จากตัวแปรในตารางที่ 3.1

- ความยาวท่อด้านดูด (L_1) เท่ากับ 0.94 m.
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านดูด (D_1) เท่ากับ 0.03 m.

จะได้ว่า

$$Q = Av$$

$$= \left(\frac{\pi}{4}(0.03)^2\right) \times v$$

$$v = 1414.7Q \text{ m/s}$$

เนื่องจากจาระบีมีคุณสมบัติเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ในการหาอัตราความเฉือน จึงต้องใช้สมการ wall shear rate ในการหาโดยใช้สมการที่คำนวณด้วยเลขยกกำลังที่ถูกระบุ(power law index) ไว้ในตารางที่ 2.1 ตามค่าความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้สมการที่ 2.8 โดยที่ m คือ เลขยกกำลังของ power law

$$\dot{\gamma} = \frac{3m+1}{4m} \cdot \frac{8v}{D}$$

เมื่อ $m = 0.6696$ จะได้ว่า

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{3(0.6696) + 1}{4(0.6696)} \cdot \frac{8(1414.7Q_1)}{0.03}$$

$$\dot{\gamma}_1 = 4.24 \times 10^5 Q_1$$

ตามทฤษฎีแล้วจาระบีนั้นมีทั้ง 2 คุณสมบัติคือ จาระบีที่มีอัตราเฉือนที่ต่ำทำให้ความหนืดคงตัว(η_0) และจาระบีที่มีโครงสร้างคล้ายกับ base oil ที่มีอัตราเฉือนเข้าใกล้อนันต์(η_∞) ดังนั้น จึงใช้สมการที่ 2.11 ในการคำนวณหาความหนืดพลวัต(dynamics viscosity) ตามด้านล่าง

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \cdot [1 + (\lambda + \dot{\gamma})^a]^{-\frac{n-1}{a}}$$

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 3.2 มาแทนค่าจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \eta &= 0.3884 + 1852.4 \left[1 + 2252.0719 \cdot (4.2384 \cdot 10^5 \cdot Q)^2 \right]^{\frac{0.2007-1}{2}} \\ &= 0.3884 + 1852.4 \left[1 + 4.0456 \cdot 10^{14} \cdot Q^2 \right]^{-0.3996} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าความหนืดพลวัตไปแทนลงในสมการที่ 2.14 โดยที่ μ ในสมการคือความหนืดพลวัตเช่นเดียวกันกับตัวแปร η ในสมการที่กล่าวมา

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

เนื่องจากต้องการให้เป็นการไหลแบบ Laminar ดังนั้นค่า Re สูงสุดที่สามารถรับได้คือ 2000 และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 900 kg/m^3 และแทนลงในสมการดังกล่าวจะได้ว่า

$$\begin{aligned} 2000 &= \frac{900(1414.7Q_1)(0.03)}{0.3884 + 1852.4[1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}} \\ Q_1 &= 2.32 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

ในการทดลองใช้อัตราการไหลเพียง $2.78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ดังนั้นจึงจัดอยู่ในเกณฑ์ Laminar Flow

เริ่มจากการคำนวณการสูญเสียส่วนใหญ่หรือ Major Loss จากสมการที่ 2.15

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

โดยที่ f คือสัมประสิทธิ์ความฝืดหาได้จากสมการที่ 2.16

$$f = \frac{64}{Re}$$

ซึ่งจากการคำนวณ Reynold Number จะได้ว่า

$$Re_1 = \frac{38197.2Q_1}{0.3884 + 1852.4[1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความฝืดมีค่าเท่ากับ

$$f_1 = \frac{64}{\frac{38197.2Q_1}{0.3884 + 1852.4[1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{24.86 + 1.19 \times 10^5 [1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}}{3.82 \times 10^4 Q_1}$$

และเอาค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดลงไปแทนในสมการที่ 2.15 เพื่อหาการเสียดความฝืด(Friction Head Loss)

$$h_{f1} = \frac{0.94}{0.03} \left(\frac{(1414.7Q_1)^2}{2 \cdot 9.81} \right) \left(\frac{24.86 + 1.19 \times 10^5 [1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}}{3.82 \times 10^4 Q_1} \right)$$

$$= \left(\frac{2080.15 + 9.92 \times 10^6 [1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2]^{-0.3996}}{Q_1} \right) Q_1^2$$

หลังจากนั้นหาการสูญเสียส่วนน้อยหรือ Minor Loss (h_L) โดยใช้สมการที่ 2.17

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

เนื่องจากการไหลในท่อด้านดูดเป็นการไหลแบบ Re-entrant โดยมีค่า $K_L = 0.8$ ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.5 และแทนค่าตัวแปรลงในสมการดังกล่าวจะได้ว่า

$$h_L = \frac{0.8(1414.7Q_1)^2}{2 \cdot 9.81} = 8.16 \times 10^4 Q_1^2$$

ดังนั้นจะได้เสียดความฝืดรวม(Total Friction Head)คือ Major Loss รวมกับ Minor Loss

$$h_{suction} = h_{total} = h_{major} + h_{minor}$$

แทนค่าลงในสมการจะได้ว่า

$$h_{suction} = \left(\frac{2080.15 + 9.92 \times 10^5 (1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2)^{-0.3996}}{Q_1} + 81606.8 \right) Q_1$$

จากสมการความดัน

$$P = \rho_{grease} g h$$

แทนค่าลงไปในสมการได้ว่า

$$P = (900) \left(\frac{2080.15 + 9.92 \times 10^5 (1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2)^{-0.3996}}{Q_1} + 81606.8 \right) (9.81) Q_1$$

$$P = \left(\frac{1.84 \times 10^7 + 8.76 \times 10^5 (1 + 4.05 \times 10^{14} \cdot Q_1^2)^{-0.3996}}{Q_1} + 7.21 \times 10^8 \right) Q_1^2 \quad \text{Pascal}$$

3.2.3 การคำนวณหาเสียดที่ท่อด้านจ่าย

ทำการคำนวณเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา เพียงแต่เปลี่ยนพารามิเตอร์ตามอุปกรณ์ท่อ

จากตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

- ความยาวของท่อด้านจ่าย (L_2) 2 m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านจ่าย (D_2) 9.525×10^{-3} m.

ทำการคำนวณโดยใช้สมการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.2 จะได้ค่าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในท่อด้านจ่าย

ตัวแปร	ค่าที่ได้
ความเร็ว	$3.930 \times 10^3 Q_3$
อัตราเฉือน	$1.96 \times 10^6 Q_3$
ความหนืดพลวัต	$0.3884 + 1852(1 + 3.95 \times 10^7 Q_2^2)^{-0.3996}$
Reynold Number	$\frac{1.2 \times 10^5 Q_2}{0.3884 + 1852(1 + 3.95 \times 10^7 Q_2^2)^{-0.3996}}$ เมื่อแทน Re = 2000 จะได้ค่า $Q_2 = 6.62 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
สัมประสิทธิ์ความฝืด	$\frac{24.86 + 1.186 \times 10^5 (1 + 3.95 \times 10^{17} Q_2^2)^{-0.3996}}{1.2 \times 10^5 Q_2}$
Major Loss	$\left(\frac{4.36 \times 10^5 + 2.08 \times 10^9 (1 + 3.95 \times 10^{17} Q_2^2)^{-3.996}}{Q_2} \right) Q_2^2$
K_L	$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = \left(\frac{9.525 \cdot 10^{-3}}{0.018} \right)^2 = 0.28$ จากรูปที่ 2.8 $K_L = 0.5$
Minor Loss	$5.02 \times 10^6 Q_2^2$
เฮดความฝืดรวม	$\left(\frac{4.36 \times 10^5 + 2.08 \times 10^9 (1 + 3.95 \times 10^{17} Q_2^2)^{-3.996}}{Q_2} \right) Q_2^2$ $+ 5.02 \times 10^6 Q_2^2$
ความดัน	$\left(\frac{3.85 \times 10^9 + 1.83 \times 10^{13} (1 + 4.05 \times 10^{14} Q_2^2)^{-3.996}}{Q_2} + 4.4 \times 10^{10} \right) Q_2^2$

3.2.4 การคำนวณหาเฮดที่หัวจาระปีส่วนรับ

จากตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยาวของท่อด้านจ่าย (L_3) 0.06 m.
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านจ่าย (D_3) 0.018 m.

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในหัวจาระบีส่วนรับ

ตัวแปร	ค่าที่ได้
ความเร็ว	$1.4 \times 10^4 Q_3$
อัตราเฉือน	$1.96 \times 10^6 Q_3$
ความหนืดพลวัต	$0.3884 + 1852(1 + 8.67 \times 10^{15} Q_3^2)^{-0.3996}$
Reynold Number	$\frac{6.366 \times 10^4 Q_3}{0.3884 + 1852(1 + 8.671 \times 10^{15} Q_3^2)^{-0.3996}}$ เมื่อแทน $Re = 2000$ จะได้ค่า $Q_3 = 0.013 \text{ m}^3/s$
สัมประสิทธิ์ความฝืด	$\frac{24.86 + 1.186 \times 10^5 (1 + 8.671 \times 10^{15} Q_3^2)^{-3.996}}{6.37 \times 10^4 Q_3}$
Major Loss	$\left(\frac{1024.5 + 4.886 \times 10^6 (1 + 8.671 \times 10^{15} Q_3^2)^{-3.996}}{Q_3} \right) Q_3^2$
K_L	จากรูปที่ 2.7 $K_L = 1$
การเสียดเนื่องจากอุปกรณ์	$7.871 \times 10^5 Q_3^2$
Minor Loss	$\left(\frac{1024.5 + 4.886 \times 10^6 (1 + 8.671 \times 10^{15} Q_3^2)^{-3.996}}{Q_3} + 7.871 \times 10^5 \right) Q_3^2$
ความดัน	$\left(\frac{9.05 \times 10^6 + 4.314 \times 10^{13} (1 + 8.671 \times 10^{15} Q_3^2)^{-3.996}}{Q_3} + 6.95 \times 10^9 \right) Q_3^2$

3.2.5 การคำนวณหาเฮดที่หัวจาระบีส่วนจ่าย

จากตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

- ความยาวของท่อด้านจ่าย (L_4) 0.3 m.
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อด้านจ่าย (D_4) 0.045 m.

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณในหัวจาระบีส่วนจ่าย

ตัวแปร	ค่าที่ได้
ความเร็ว	$628.76Q_4$
อัตราเฉือน	$1.256 \times 10^5 Q_4$
ความหนืดพลวัต	$0.3884 + 1852(1 + 3.552 \times 10^{13} Q_4^2)^{-0.3996}$
Reynold Number	$\frac{2.54 \times 10^5 Q_4}{0.3884 + 1852(1 + 3.552 \times 10^{13} Q_4^2)^{-0.3996}}$ เมื่อแทน Re = 2000 จะได้ค่า $Q_4 = 0.0381 \text{ m}^3/s$
สัมประสิทธิ์ความฝืด	$\frac{24.86 + 1.186 \times 10^5 (1 + 3.55 \times 10^{13} Q_4^2)^{-0.3996}}{2.54 \times 10^5 Q_4}$
การเสียดความฝืด	$\left(\frac{131.14 + 6.354 \times 10^5 (1 + 3.552 \times 10^{13} Q_4^2)^{-0.3996}}{Q_4} \right) Q_4^2$
K_L	$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = \left(\frac{0.045}{0.052} \right)^2 = 0.7489$ จากรูปที่ 2.8 $K_L = 1$
การเสียดเนื่องจากอุปกรณ์	$2014.98 Q_4^2$
เฮดความฝืดรวม	$\left(\frac{131.14 + 6.354 \times 10^5 (1 + 3.552 \times 10^{13} Q_4^2)^{-0.3996}}{Q_4} + 2014.98 \right) Q_4^2$
ความดัน	$\left(\frac{1.16 \times 10^6 + 5.522 \times 10^9 (1 + 1.378 \times 10^{16} Q_4^2)^{-0.3996}}{Q_4} + 1.78 \times 10^7 \right) Q_4^2$

3.2.6 หาสมการเฮดของระบบ (system head curve) ของอุปกรณ์

ในการหาสมการเฮดของระบบ (system head curve) นั้นจะมาจากผลของการรวมกันระหว่างเฮดสถิตรวม(Total Static Head) + เฮดความฝืดรวม(Total Friction Head)

จากการคำนวณตั้งแต่หัวข้อ 3.2.2 ถึง 3.2.5 จะได้ค่าเฮดความฝืดรวมของแต่ละส่วน โดยที่เฮดสถิตรวมเท่ากับ 1 เมตรเนื่องจากหัวจ่ายจาระบีอยู่สูงกว่ากันถึงจาระบี 1 m. หรือ 8891 Pa (จากสมการความดัน) และเนื่องจาก

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) สมการเฮดของระบบ (System Head Curve) ในรูปของเฮดรวมของจากระบบ

$$\begin{aligned}
 h_{\text{system}} &= h_{\text{suction}} + h_{\text{discharge}} + h_{\text{หัวจ่ายจากระบบส่วนรับ}} + h_{\text{หัวรับจากระบบส่วนจ่าย}} + h_{\text{static}} \\
 &= \left(\frac{2080.15 + 9.92 \times 10^5 (1 + 4.05 \times 10^{14} Q^2)^{-3.996}}{Q} + 81606.8 \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{4.36 \times 10^5 + 2.08 \times 10^9 (1 + 3.95 \times 10^{17} Q^2)^{-3.996}}{Q} + 5.02 \times 10^6 \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{1024.5 + 4.89 \times 10^6 (1 + 8.67 \times 10^{15} Q^2)^{-3.996}}{Q} + 7.87 \times 10^5 \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{131.14 + 6.35 \times 10^9 (1 + 3.55 \times 10^{13} Q^2)^{-3.996}}{Q} + 2014.98 \right) Q^2 + 1
 \end{aligned}$$

2.) สมการเฮดของระบบ (system head curve) ในรูปของความดันรวมของจากระบบ

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\text{system}} &= \Delta P_{\text{suction}} + \Delta P_{\text{discharge}} + \Delta P_{\text{หัวจ่ายส่วนรับ}} + \Delta P_{\text{หัวจ่ายส่วนจ่าย}} + \Delta P_{\text{ความสูง}} \\
 &= \left(\frac{1.84 \times 10^7 + 8.76 \times 10^{11} [1 + 4.05 \times 10^{14} Q^2]^{-3.996}}{Q} + 7.21 \times 10^8 \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{3.85 \times 10^9 + 1.83 \times 10^{13} [1 + 4.05 \times 10^{14} Q^2]^{-3.996}}{Q} + 4.43 \times 10^{10} \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{9.05 \times 10^6 + 4.31 \times 10^{13} [1 + 8.67 \times 10^{15} Q^2]^{-3.996}}{Q} + 6.95 \times 10^9 \right) Q^2 \\
 &\quad + \left(\frac{1.16 \times 10^6 + 5.52 \times 10^9 [1 + 1.38 \times 10^{16} Q^2]^{-3.996}}{Q} + 1.78 \times 10^7 \right) Q^2 \\
 &\quad + 8829
 \end{aligned}$$

3.2.7 วิเคราะห์ข้อมูลสมการเฮดของระบบ

จากการสร้างสมการเฮดของระบบในหัวข้อที่ 3.2.6 นำสมการเหล่านั้นมาแทนค่าดังในตารางที่ 3.6 และ 3.7 เพื่อที่จะนำมาสร้างกราฟดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ จะได้กราฟดังต่อไปนี้

1.) สมการเฮดของระบบในรูปของเฮดรวมของจากระบบ

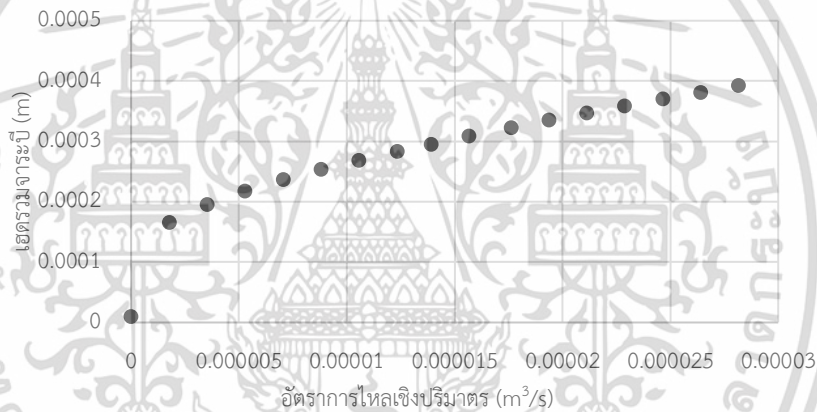
ตารางที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับเฮดรวมของจากระบบ

อัตราการไหลเชิงมวล (g/min)	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m ³ /sec)	เฮดรวมจากระบบ (m)
0	0	0.010×10 ⁻³
95	1.76×10 ⁻⁶	0.165×10 ⁻³
190	3.52×10 ⁻⁶	0.196×10 ⁻³
285	5.28×10 ⁻⁶	0.218×10 ⁻³
380	7.04×10 ⁻⁶	0.237×10 ⁻³
475	8.80×10 ⁻⁶	0.253×10 ⁻³
570	1.06×10 ⁻⁵	0.269×10 ⁻³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

665	1.23×10^{-5}	0.283×10^{-3}
750	1.39×10^{-5}	0.295×10^{-3}
845	1.56×10^{-5}	0.308×10^{-3}
950	1.76×10^{-5}	0.322×10^{-3}
1045	1.94×10^{-5}	0.335×10^{-3}
1140	2.11×10^{-5}	0.347×10^{-3}
1235	2.29×10^{-5}	0.358×10^{-3}
1330	2.46×10^{-5}	0.370×10^{-3}
1425	2.64×10^{-5}	0.381×10^{-3}
1520	2.81×10^{-5}	0.392×10^{-3}



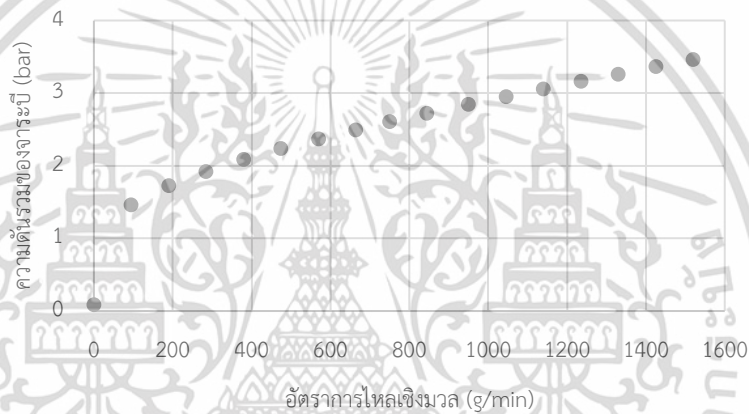
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรและเฮดรวมจากระบบ

2.) สมการเฮดของระบบในรูปของความดันรวมของจากระบบ

ตารางที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความดันรวมของจากระบบ

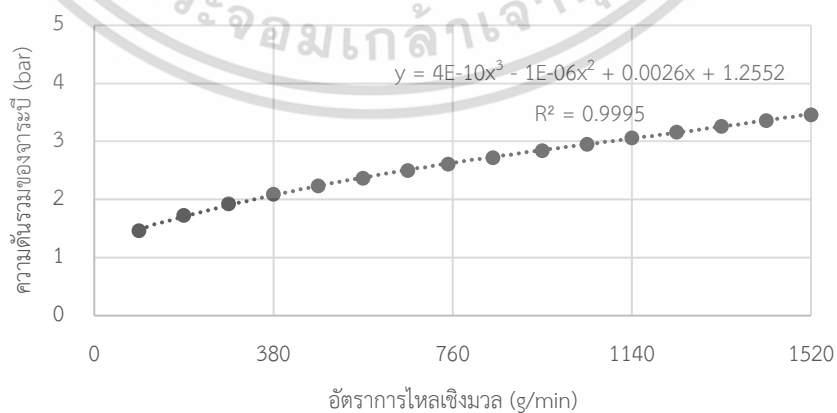
อัตราการไหลเชิงมวล (g/min)	ความดันรวมของจากระบบ (bar)
0	0.088
95	1.465
190	1.728
285	1.924
380	2.089
475	2.236
570	2.372

665	2.499
750	2.607
845	2.724
950	2.847
1045	2.956
1140	3.061
1235	3.164
1330	3.265
1425	3.364
1520	3.462

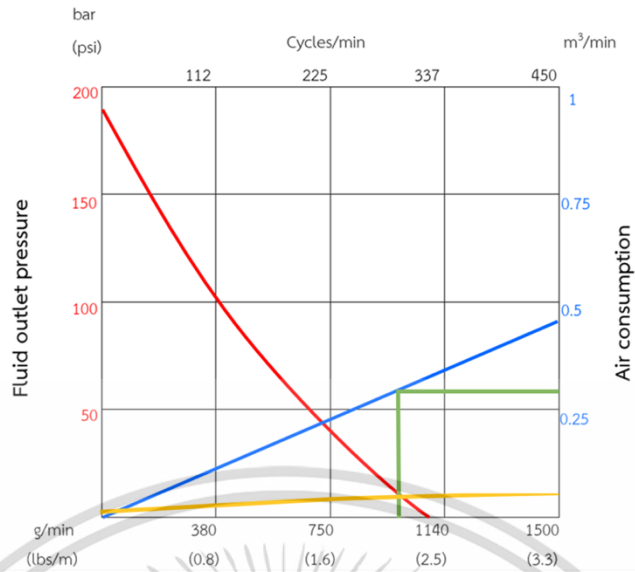


รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลกับความดันรวมของจากระบี

เนื่องจากค่าแรกเริ่มเท่ากับ 0 ซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากค่าอื่นๆจึงอาจจะเกิดค่าคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นเพื่อหาสมการจากแนวโน้มของเส้นกราฟ (Trending Line Equation) จึงตัดค่าแรกออกและวาดกราฟได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟเฮดของระบบที่ตัดค่าเริ่มต้นเพื่อหาสมการแนวโน้ม



รูปที่ 3.13 กราฟ Pump Curve และจุดทำงานของปั๊มจาระบีที่ความดัน 4 bar

นำกราฟเฮดของระบบในรูปความดัน (System Head Curve) ในรูปที่ 3.13 ไปเทียบบน Pump Curve จาก หนังสือรายการสินค้า เพื่อหาจุดทำงานของปั๊มจาระบีที่ความดัน 4 bar โดยวิธีการอ่านค่าจาก Pump Curve สามารถทำได้ดังนี้

- 1.) นำ กราฟเฮดของระบบในรูปความดัน (เส้นสีเหลือง) ที่ได้มาพล็อตลงบน Pump Curve
- 2.) จุดทำงานของปั๊มจาระบีนี้จะได้ค่าออกมา 2 ค่า คือ 1.อัตราการไหลจาระบี 2.อัตราการใช้ลมอัด ซึ่งอัตราการไหลจาระบีคือจุดที่ System Head Curve ตัดกับ Pump Curve (เส้นสีแดง) แล้วลากลงมาตัดกับแกนนอน และอัตราการใช้ลมอัด หากจากการลากเส้นจากจุดที่ System Head Curve ตัดกับ Pump Curve ขึ้นไปตัดกับเส้นอัตราการใช้ลม (เส้นสีฟ้า) แล้วแกนทางด้านขวาจะบอกอัตราการใช้ลมอัด

จากการอ่านกราฟ จะได้ค่าดังต่อไปนี้

- 1.) อัตราการไหลเชิงมวล : 1000 g/min
- 2.) อัตราการใช้ลม : 0.26 m³/min
- 3.) เวลาที่ใช้ในการเติมจาระบีเข้าหลอดได้ โดยให้จาระบี 1 หลอดมีปริมาตร 400 g

จะได้ว่า

$$t = \frac{400}{1000} = 0.4$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเติมจาระบีเท่ากับ 0.4 min หรือ 24 s

3.3 การออกแบบและคำนวณในระบบนิวแมติก

การเลือกปั๊มลมนั้นจะขึ้นอยู่กับปั๊มจากระยะปี ความดันและขนาดแต่ละกระบอกสูบซึ่ง เมื่อคำนวณได้แล้วจะสามารถหาความต้องการใช้ลมที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้รู้ขนาดของปั๊มลมที่เหมาะสม โดยอาจจะใส่ตัวคูณเพื่อให้ปั๊มลมพักการทำงานด้วย เพื่อให้ปั๊มลมไม่เสียหายจากความร้อนสะสม

3.3.1 ออกแบบวงจรนิวแมติก

เริ่มต้นด้วยการออกแบบฟังก์ชันการทำงานให้กับเครื่องเพื่อทำการออกแบบการทำงานของปั๊มลมในขั้นตอนต่อไป ซึ่งแบ่งการทำงานให้มี 4 ขั้นตอน

1. ลำเลียงไหลเข้าสู่การทำงานของเครื่อง (Station 1)
2. บรรจุน้ำมันเข้าไหล (Station 2)
3. ลำเลียงฝาและวางฝา (Station 3)
4. ปิดฝาไหลให้สนิท (Station 4)

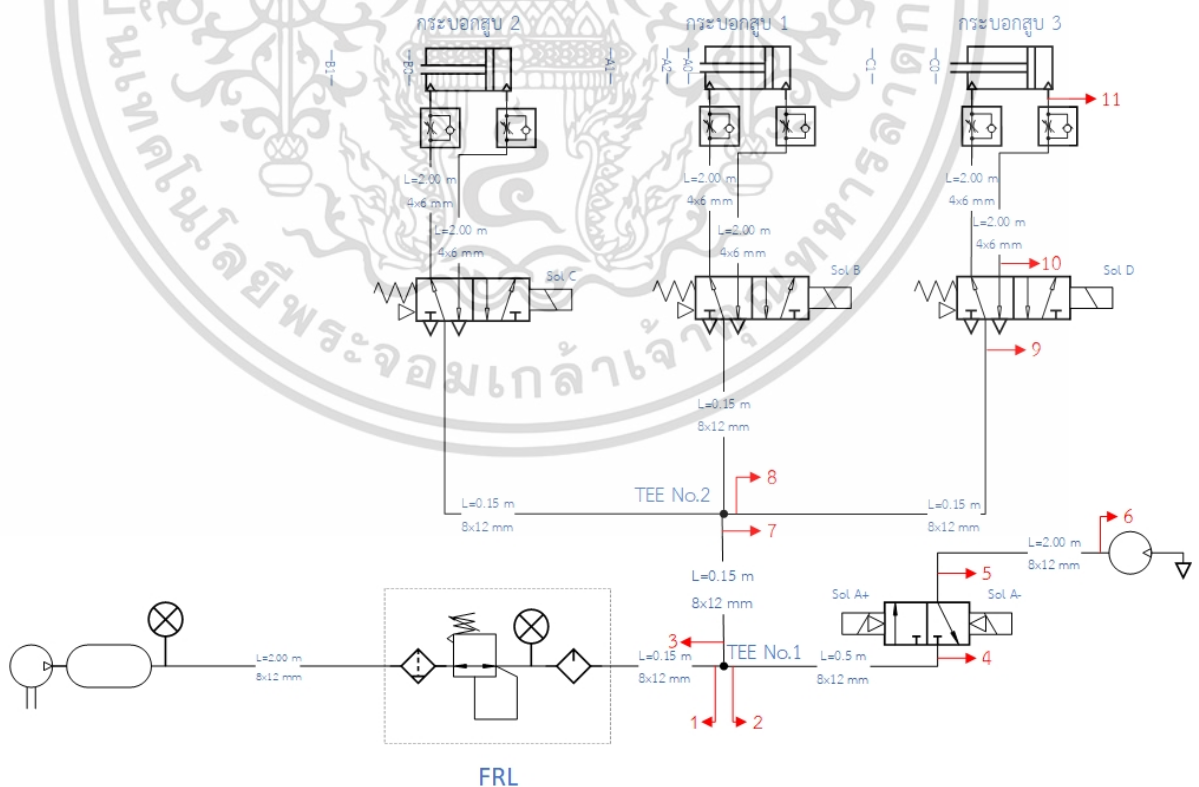
ซึ่งในกระบวนการทำงานเหล่านี้ต้องใช้กระบอกสูบทั้งหมด 3 กระบอก

ซึ่ง กระบอกที่ 1 จะใช้ในขั้นตอนที่ 2 ในการดันไหลจากระยะปีขึ้นไปยังหัวจ่ายจากระยะปี

กระบอกที่ 2 จะใช้ในขั้นตอนที่ 1 ในการดันไหลจากระยะปีให้ลงตัวประกอบ

กระบอกที่ 3 จะใช้ในขั้นตอนที่ 4 ในการกดฝาไหลให้สนิท

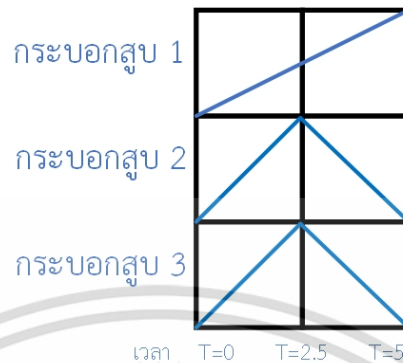
ดังนั้นได้ทำการออกแบบวงจรนิวแมติกและกำหนดจุดเพื่อการคำนวณ ดังนี้



รูปที่ 3.14 วงจรนิวแมติก(Pneumatic Circuits)ของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำวงจรนิวแมติกจากรูปที่ 3.14 มาเขียนเป็นแผนภาพแสดงการเคลื่อนที่(Step Motion Diagram)ดังรูปที่ 3.15 เพื่อทำการเทียบการทำงานของกระบอกสูบในแต่ละกระบอก ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยัดหดของกระบอกสูบและเวลาที่กระทำในระบบ

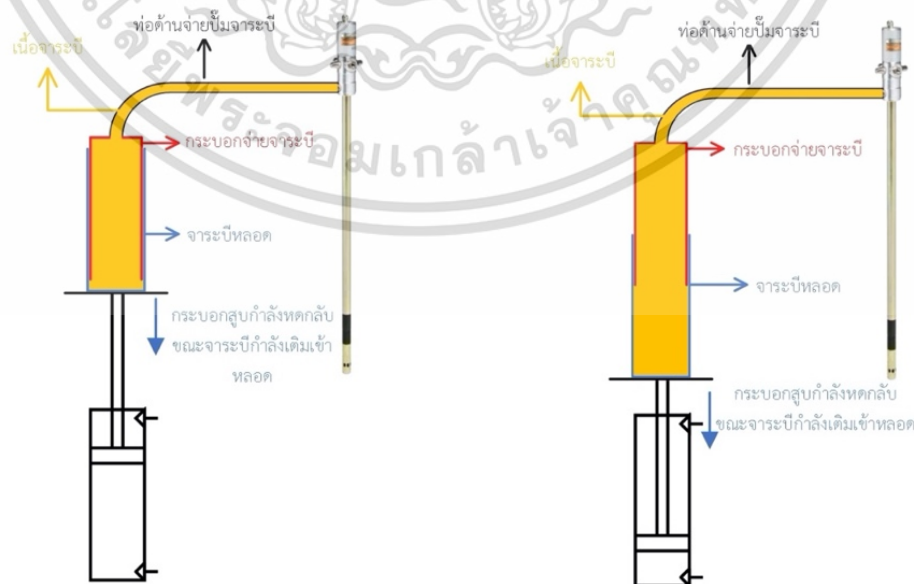


รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่(Step Motion Diagram)

3.3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบลม (Pneumatic Systems)

จากรูปที่ 3.15 ณ เวลาเริ่มต้นที่วินาทีที่ 0 กระบอกสูบทั้ง 3 ยืดออกมาซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง โดยโซลินอยด์ B C D จากรูปที่ 3.14 เริ่มต้นทำงานพร้อมกัน จะได้ว่า

1. กระบอกสูบตัวที่ 1 ดันหลอดจาระบี(grease cartridge) ไปยังหัวจ่ายจาระบี เป็นเวลา 5 วินาที
2. กระบอกสูบตัวที่ 2 ดันหลอดจาระบีให้ลงตัวประคอง โดยยืดออกและหดกลับเป็นเวลา 2.5 วินาที เท่ากัน
3. กระบอกสูบตัวที่ 3 ทำหน้าที่กดฝาให้สนิท โดยยืดออกและหดกลับ 2.5 วินาที เท่ากัน



รูปที่ 3.16 รูปอธิบายการทำงานของขั้นตอนการใส่จาระบีลงหลอดจาระบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หลังจาก 5 วินาที แล้ว solenoid A+ เริ่มทำงานเพื่อให้ลมจากระบบลมเข้าไปขับปั๊ม จาระบี ส่งผลให้จาระบีไหลไปยังหลอด ในขณะที่เดียวกันที่กระบอกสูบ 1 ก็ค่อยๆหดตัวเพื่อรองรับการดันตัวของจาระบีในหลอดที่ได้รับจากกระบอกจ่ายจาระบี
5. เมื่อกระบอกสูบผ่านสวิสต์ A2 หมายถึงจาระบีได้ปริมาณตามต้องการ solenoid ทำให้ A- ทำงาน ส่งผลให้จาระบีหยุดจ่าย แต่กระบอกสูบ 1 ยังคงหดตัวเรื่อยๆ จนชนสวิสต์ A0 และจบกระบวนการ

3.2.3 การหาขนาดของกระบอกสูบแต่ละกระบอก

- 1.) กระบอกสูบที่ 1 ใช้ดันหลอดจาระบีขึ้นไปยังกระบอกจ่ายจาระบี

โดยที่หลอดจาระบี มีน้ำหนัก 0.05 kg และแผ่นไม้ดันหลอดหนัก 0.04 kg โดยมีระยะชัก 0.3 m ยืดออกภายในระยะเวลา 5 s หรือ 0.083 min ให้แรงเสียดทานของกระบอกสูบเท่ากับ 1 N และ อัตราเร่งของกระบอกสูบสูงสุดเท่ากับ 1 m/s^2

- แรงที่กระบอกสูบ 1 ต้องการเพื่อดันหลอดขึ้น ($F_{cyl1, ext.}$) หาได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma F &= ma \\ F_{cyl1, ext.} - mg - friction &= ma \\ F_{cyl1, ext.} &= ((0.04 + 0.05) \times 9.81) + ((0.04 + 0.05) \times 1) + 1 \\ &= 1.973 \text{ N} \end{aligned}$$

ดังนั้น แรงที่กระบอกสูบ 1 ต้องการเพื่อดันหลอดขึ้น ($F_{cyl1, ext.}$) เท่ากับ 1.973 N

- แรงที่กระบอกสูบ 1 ต้องการเพื่อหดกระบอกสูบกลับ ($F_{cyl1, react}$)

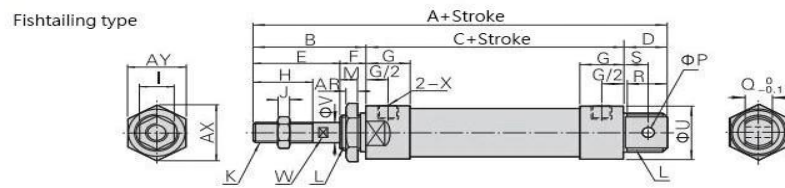
โดยกำหนดให้หดกลับด้วยอัตราเร่ง 1 m/s^2 และ น้ำหนักจาระบีเฉลี่ยเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำที่ ต้องการใน 1 หลอด(400 g) หรือ 200 g

$$\begin{aligned} \Sigma F &= ma \\ F_{cyl1, react} + mg + mg_{grease} - friction &= ma \\ F_{cyl1, react} &= -((0.04 + 0.05) \times 9.81) - (0.2 \times 9.81) \\ &\quad + ((0.04 + 0.05) \times 1) + 1 \\ &= -1.755 \text{ N} \end{aligned}$$

ดังนั้น แรงที่กระบอกสูบ 1 ต้องการเพื่อหดกระบอกสูบกลับ ($F_{cyl1, react}$) เท่ากับ -1.755 N

หมายถึงกระบอกสูบสามารถหดกลับได้เอง

เนื่องจากกระบอกสูบตัวที่ 1 ไม่ต้องการแรงจากกระบอกสูบมากนัก กระบอกสูบที่ต้องการ ควรจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบที่เล็กและระยะชัก 30 cm. ซึ่งข้อมูลสินค้าจะได้ว่ากระบอกสูบที่มีระยะชัก(stroke) 30 cm. จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบที่เล็กที่สุด(bore) คือ 16 mm. และจากรูปที่ 3.17 พบว่าที่ขนาดกระบอก(bore) เท่ากับ 16 mm. ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ก้านสูบเท่ากับ 8 mm.



Bore size\Item	A	A1	A2	B	C	D	D1	E	F	G	H	I	J	K
20	131	122	110	40	70	21	12	28	12	16	20	12	6	M8 x 1.25
25	135	128	114	44	70	21	14	30	14	16	22	17	6	M10 x 1.25
32	141	128	114	44	70	27	14	30	14	16	22	17	6	M10 x 1.25
16	103	101	89	37	52	14	12	23	14	11	16	10	6	M6 x 1

Bore size\Item	L	M	P	Q	R	R1	S	U	V	W	X	AR	AX	AY
20	M22 x 1.5	10	8	16	19	10	12	29	8	6	PT1/8	7	33	29
25	M22 x 1.5	12	8	16	19	12	12	34	10	8	PT1/8	7	33	29
32	M24 x 2.0	12	10	16	25	12	15	39.5	12	10	PT1/8	8	37	32
16	M16 x 1.5	12	6	12	12	12	9	22	8	6	M5	6	27	24

รูปที่ 3.17 แสดงตารางของขนาดกระบอกสูบตัวที่ 1 และตัวที่ 3 [1]

จากสมการที่ 2.19

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right)$$

โดยที่ Q_1 หมายถึง อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ

Q_2 หมายถึง อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆ

และให้อุณหภูมิของลมทั้งระบบเท่ากัน ($T_1 = T_2$)

1.1) คำนวณหาความดันและอัตราการไหลของลมที่ลูกสูบที่ 1 จากสมการอัตราการไหล โดยที่ยึดออกภายในระยะเวลา 5 sec หรือ เวลาเท่ากับ 0.083 min

โดยที่พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4} (\text{bore})^2 \\ &= \frac{\pi}{4} (0.016)^2 \\ &= 0.0002 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

ซึ่งความดันกระบอกสูบในการยกหลอดจาระบีเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= \frac{F_{\text{cyl1,ext.}}}{A} \\ &= \frac{1.9729}{0.0002} \\ &= 9864.5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

ซึ่งมีค่าความดันที่น้อยมาก จึงสรุปได้ว่ากระบอกสูบตัวที่ 1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ 16 mm นั้นสามารถใช้ได้

อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{2,\text{cyl1,Piston}}$)

อัตราการไหลหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 Q_{2,cyl1,Piston} &= Av \\
 &= A \cdot \frac{s}{t} \\
 &= 0.0002 \times \frac{0.3}{0.083} \\
 &= 0.0007 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

อัตราการไหลของมวลที่ความดันบรรยากาศ ของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl1,Piston}$)

หาได้จากสมการที่ 2.19 โดยที่อุณหภูมิของทั้งระบบเท่ากัน ($T_1 = T_2$)

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Q_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \\
 &= 0.0007 \times \left(\frac{101325 + 9864.5}{101325} \right) \\
 &= 7.682 \times 10^{-4} \text{ Sm}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

1.2) จำนวนที่ด้านก้านสูบของกระบอกสูบตัวที่ 1

จากหัวข้อที่ 3.1 จาระบีจะเติมภายใน 24 sec โดยที่หลอดจาระบีมีความยาว 24 cm. และจากอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ลงของหลอดจาระบีจะเท่ากับของกระบอกสูบ นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{s}{t} \\
 &= \frac{0.24}{24} \\
 &= 0.01 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

ถ้ากระบอกสูบยาว 0.3 m ใช้เวลา 30 sec หรือ 0.5 min ดังนั้นจะได้

อัตราการไหลของมวลที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{2,cyl1,Rod}$)

$$\begin{aligned}
 Q_{2,cyl1,Rod} &= Av \\
 &= \left[\frac{\pi}{4} (0.016^2 - 0.008^2) \right] \cdot \frac{0.3}{0.5} \\
 &= 9.05 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

อัตราการไหลของมวลที่ ความดันบรรยากาศ ของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{1,cyl1,Rod}$)

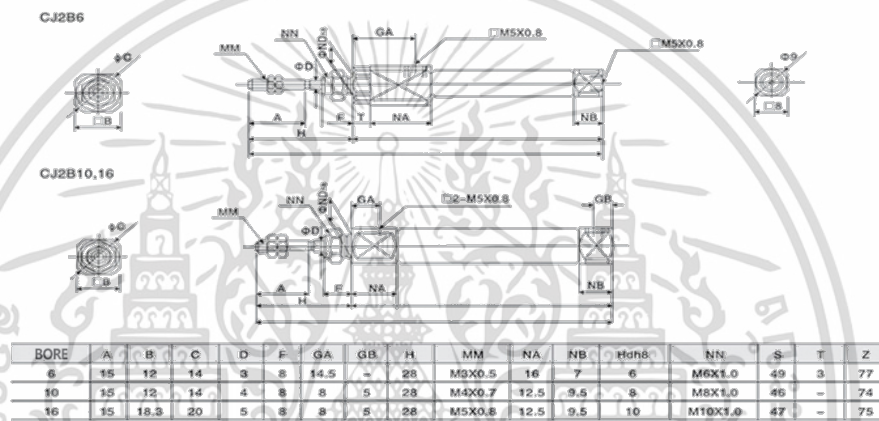
หาได้จากสมการที่ 2.19 โดยให้อุณหภูมิของทั้งระบบเท่ากัน ($T_1 = T_2$) และเนื่องจากไม่ต้องใช้แรงในการหดกลับให้ความดันในกระบอกสูบเท่ากับความดันบรรยากาศ

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Q_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \\
 &= 9.05 \times 10^{-5} \times \left(\frac{101325}{101325} \right) \\
 &= 9.05 \times 10^{-5} \text{ Sm}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

2.) กระบอกสูบที่ 2 ใช้ดันหลอดจาระบีไปยังหลุม

แรงที่ใช้ในการดันไปยังหลุมมีค่าน้อยมาก (ให้เท่ากับ 0) ต้องการให้กระบอกสูบขยายตัวเพื่อดันหลอดจาระบี ภายในระยะเวลา 2.5 sec หรือ 0.042 min โดยใช้ระยะทาง 0.1 m และหดกลับ 0.042 min และให้แรงเสียดทานในกระบอกสูบตัวที่ 2 น้อยมาก (เนื่องจากกระบอกสูบนี้มีขนาดเล็กมาก) ดังนั้นแรงที่กระบอกสูบต้องการมีค่าประมาณ 0

จากข้อมูลสินค้าในตลาดกระบอกสูบที่มีระยะชัก 10 cm ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกที่เล็กที่สุดคือ 0.01 m และจากรูปที่ 3.18 พบว่าที่ขนาดกระบอกสูบ (bore) เท่ากับ 10 mm จะทำให้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางก้านสูบ (D ในตารางรูปที่ 3.18) เท่ากับ 4 mm



รูปที่ 3.18 แสดงตารางขนาดของกระบอกสูบตัวที่ 2 [1]

2.1) คำนวณหาอัตราการไหลของลมที่ลูกสูบจากสมการอัตราการไหลโดยที่เวลาเท่ากับ 0.042 นาที โดยที่พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{4} (\text{bore})^2 \\
 &= \frac{\pi}{4} (0.010)^2 \\
 &= 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมินี้ๆของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{2,cyl2,Piston}$)

$$\begin{aligned}
 Q &= A \cdot \frac{s}{t} \\
 &= 7.85 \times 10^{-5} \times \frac{0.10}{0.042} \\
 &= 1.89 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากกระบอกสูบที่ 2 ต้องการแรงที่น้อยมาก ความดันที่ต้องใช้ในการดันจึงประมาณได้เท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl2,Piston}$) เท่ากับ อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมินี้ๆของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{2,cyl2,Piston}$)

2.2) จำนวนที่ด้านก้านสูบของกระบอกสูบตัวที่ 2

หาอัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{2,cyl2,Rod}$) จากรูปที่ 3.18 ระยะ D เส้นผ่าศูนย์กลางก้านสูบเท่ากับ 4 mm.

$$\begin{aligned}Q_{2,cyl2,Rod} &= Av \\&= \left[\frac{\pi}{4}(0.010^2 - 0.004^2)\right] \cdot \frac{0.1}{0.042} \\&= 1.58 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}\end{aligned}$$

เนื่องจากกระบอกสูบที่ 2 ต้องการแรงที่น้อยมาก ความดันที่ต้องใช้ในการหดกลับ จึงประมาณได้ว่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{1,cyl2,Rod}$) เท่ากับอัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{2,cyl2,Rod}$)

3.) กระบอกสูบที่ 3 - ใช้กดฝากระป๋องให้ปิดสนิท

3.1) จำนวนความดันที่ต้องใช้ในการกดปิดฝาหลอด

จากการทดลองน้ำหนักที่กดลงบนฝากระป๋องให้สนิทให้สนิทมีค่าประมาณ 5 kg หรือ 49.05 N ถ้าใช้กระบอกสูบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบเท่ากับกระบอกสูบ 1 โดยมีระยะชัก 5 เซนติเมตร ยึดออกภายในระยะเวลา 2.5 sec หรือ 0.042 min

คำนวณความดันที่ต้องการสำหรับกระบอกสูบเพื่อกดฝากระบอกจระบี

$$\begin{aligned}P_{min} &= \frac{F}{A} \\&= \frac{49.5}{0.0002} \\&= 2.44 \text{ bar}\end{aligned}$$

ซึ่ง 2.44 bar นั้นอยู่ในช่วงที่ระบบนิวแมติกส์ทำงาน จึงสามารถใช้กระบอกสูบขนาดเดียวกับกระบอกสูบที่ 1 ได้

อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{2,cyl3,Piston}$)

$$\begin{aligned}Q_{2,cyl3,Piston} &= Av \\&= A \cdot \frac{s}{t} \\&= 0.0002 \times \frac{0.05}{0.042} \\&= 2.40 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}\end{aligned}$$

อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ ของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl3,Piston}$)

หาได้จากสมการที่ 2.19 โดยให้อุณหภูมิของทั้งระบบเท่ากัน ($T_1 = T_2$)

$$\begin{aligned}
Q_{1,cyl3,Piston} &= Q_{2,cyl3,Piston} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \\
&= 2.4 \times 10^{-4} \times \left(\frac{101325 \times 2.44}{101325} \right) \\
&= 5.856 \times 10^{-4} Sm^3/min
\end{aligned}$$

3.2) จำนวนที่ด้านก้านสูบของกระบอกสูบตัวที่ 3

อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{2,cyl3,Rod}$) จากรูปที่ 3.18 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 16 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบมีขนาด 8 mm.

$$\begin{aligned}
Q_{2,cyl3,Rod} &= Av \\
&= \left[\frac{\pi}{4} (0.016^2 - 0.008^2) \right] \cdot \frac{0.5}{0.042} \\
&= 1.181 \times 10^{-4} m^3/min
\end{aligned}$$

และเนื่องจากกระบอกสูบที่ 3 ต้องการแรงในการหดกลับที่น้อยมาก ความดันที่ต้องใช้จึงประมาณความดันที่กระบอกสูบ 3 ขณะหดกลับ ได้ว่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{1,cyl3,Rod}$) เท่ากับ อัตราการไหลของลมที่ความดันและอุณหภูมิอื่นๆของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{2,cyl3,Rod}$)

3.2.4 การคำนวณหาแรงดันที่สูญเสียของลมในท่อ

เนื่องจากต้องการให้ปั๊มจาระบีมีความดัน 4 bar และเมื่อมีการไหลของลมอัดในท่อจึงเกิดการสูญเสียความดันในท่อ ดังนั้นจึงต้องหาความดันที่ตั้งที่ FRL เพื่อชดเชยการสูญเสียความดันในท่อ

1.) ความดันที่ต้องตั้งที่ FRL

คำนวณช่วงเวลาหลังจาก 5 sec ก่อน เนื่องจากต้องการหาความดันที่ FRL เพื่อที่จะทำให้ความดันที่ปั๊มจาระบีมีค่า 4 bar พอดี หลังจากลมอัดสูญเสียความดันในท่อแล้ว จากการแทนค่าคงที่ลงใน Harris formula ในบทที่ 2 สมการที่ (2.24)

$$P_f = \frac{0.1025 L Q^2}{CR d^{5.31} \cdot 3600}$$

โดยที่ P_f หมายถึง แรงดันที่สูญเสีย หน่วย psi

C หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

L หมายถึง ความยาวของท่อ หน่วย ft

Q หมายถึง อัตราการไหล หน่วย scfm

CR หมายถึง อัตราส่วนของการอัดหรืออัตราส่วนระหว่างความดันในท่อกับความดันบรรยากาศ

d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ หน่วย inch

ขณะปั๊มจากระบบทำงาน กระบอกสูบที่ 1 กำลังหดตัว คำนวณแรงดันที่สูญเสีย (pressure drop) ระหว่างชุดบริการลมอัด (FRL) ถึง ปั๊มจากระบบ โดยต้องการให้

- ปั๊มจากระบบมีความดัน $P_6 = 4 \text{ bar}$ หรือ 58 Psi
- ความยาวท่อจากปั๊มจากระบบไปยัง FRL (L) = 2.00 m หรือ 6.56 ft .
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (d) = 8 mm หรือ 0.315 inch .
- อัตราการไหลของปั๊มจากระบบที่ ความดันบรรยากาศ (Q_1) = $0.26 \text{ Sm}^3/\text{min}$ หรือ 9.18 scfm

ใช้วิธีคำนวณย้อนกลับ เริ่มต้นคำนวณจากปั๊มจากระบบ (จุดที่ 6 จากรูปที่ 3.14) ไปยัง FRL โดยความยาวของท่อ เท่ากับ 2 m หรือ 6.56 ft .

2.) การคำนวณหาความดันหลังจากผ่านวาล์วโซลินอยด์ A (P_5)

$$CR_5 = \frac{P_5 + 14.7}{14.7}$$

แทนค่าหาความดันหลังจากผ่านวาล์วโซลินอยด์ A

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_5 - 58 = \frac{(0.1025)(6.56)(9.18)^2}{\left(\frac{P_5+14.7}{14.7}\right)(0.315)^{5.31}(3600)}$$

ความดันหลังจากผ่านวาล์วโซลินอยด์ A (P_5) เท่ากับ 59.44 psi หรือ 4.10 bar

3.) คำนวณแรงดันที่สูญเสียที่วาล์วโซลินอยด์ A

จากสมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณอัตราการไหลของลมที่ผ่านรูเปิดสมการที่ (2.20) คือ

$$Q = 22.7C_v \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)(p_2)}{T_1}}$$

โดยที่ C_v หมายถึง ค่าคงที่การไหล

P_1 หมายถึง ความดันทางเข้า

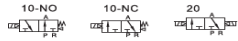
P_2 หมายถึง ความดันทางออก

T หมายถึง อุณหภูมิอ้างอิง

Solenoid valve(3/2 way)
3V200 Series



Symbol



Product feature

1. Pilot-oriented mode: internal pilot or external pilot.
2. Structure in sliding column mode: good tightness and sensitive reaction.
3. Double control solenoid valves have memory function.
4. Internal hole adopts special processing technology which has little attrition friction, low start pressure and long service life.
5. No need to add oil for lubrication.
6. Affiliated manual devices are equipped to facilitate installation and debugging.
7. Several standard voltage grades are optional.
8. Integrate with the manifold to save installation space.

Specification

Model	3V210-06	3V220-06	3V210-08	3V220-08
Fluid	Air (to be filtered by 40 μm filter element)			
Acting	Internal pilot or external pilot			
Port size [Note 1]	In=Out=1/8"		In=Out=1/4"	
Orifice size	14.0mm ² (Cv=0.78)		16.0mm ² (Cv=0.89)	
Valve type	3 port 2 position			
Lubrication [Note 2]	Not required			
Operating pressure	0.15-0.8MPa(21-114psi)			
Proof pressure	1.2MPa(175psi)			
Temperature	-20-70°C			
Material of body	Aluminum alloy			

[Note 1] PT thread, G thread and NPT thread are available.
[Note 2] Once lubricated air is used, continue with same medium to optimise valve life span. Lubricants like ISO VG32 or equivalent are recommended.

Coil specification

Item	specification				
Standard voltage	AC220V	AC110V	AC24V	DC24V	DC12V
Scope of voltage	AC: ±15% DC: ±10%				
Power consumption	4.5VA	4.5VA	5.0VA	3.0W	3.0W
Protection	IP65(DIN40050)				
Temperature classification	B Class				
Electrical entry	Terminal, Grommet				
Activating time	0.05 sec and below				
Max. frequency [Note1]	5 cycle/sec				

[Note 1] The maximum actuation frequency is in the no-load state.

รูปที่ 3.19 รูปภาพแสดงข้อมูลโมเดลต่างๆของวาล์วโซลินอยด์ 3/2 ของ AirTAC [1]

กำหนดให้อุณหภูมิลมเท่ากับ 30°C หรือ 23.25 R และเนื่องจากใช้วาล์วโซลินอยด์ 3/2 โมเดล 3V220 - 08 จากรูปที่ 3.19 ซึ่งจะมีค่าคงที่การไหล $C_v = 0.89$ แทนค่าในสมการที่ 2.20 จะได้ความดันก่อนเข้าวาล์วโซลินอยด์ A (P_4) คือ ความดันก่อนเข้าวาล์วโซลินอยด์ A (P_4) เท่ากับ 59.52 psi หรือ 4.10 bar

$$Q = 22.7C_v \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)(P_2)}{T_2}}$$

$$9.18 = 22.7 \times 0.89 \sqrt{\frac{(P_4 - 59.5)(59.5)}{23.25}}$$

4. คำนวณความดันที่ตกคร่อมช่วงก่อนท่อข้อต่อ 3 ทาง TEE No.1 (P_1) ถึงก่อนเข้าวาล์วโซลินอยด์ A (P_4)

- ความยาวของท่อ (L) = 0.5 m หรือ 1.64 ft
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (d) = 8 mm หรือ 0.315 inch
- อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ (Q_1) = 0.26 Sm³/min หรือ 9.18 scfm

จากวงจรนิวแมติกมีท่อข้อต่อ 3 ทาง 1 ตัว โดยทางเข้าและออกมีแนวการไหลทางเดียวกัน (Through run)

เนื่องจากตารางให้ค่าเป็น Nominal Pipe Size; NPS ซึ่งไม่เท่ากับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (Inside diameter) จึงเปิดหา และนำมา Interpreting Regression (การประมาณค่าแบบย้อนกลับ) กับค่าค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในที่และใช้ค่าจากตารางที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งสามารถนำมาเขียนได้เป็น ตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวสมมูลของข้อต่อลมในแต่ละชนิด

Nominal Pipe Size (inch)	Inside Diameter (inch)	Tee (Through run) Equivalent Length (ft)	Tee (Through run) Equivalent Length (ft)
3/8	0.493	0.5	2.5
1/2	0.622	0.7	3.3

จากการ Interpreting Regression ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.315 inch จะได้ค่า Equivalent length ได้เท่ากับ 0.224 ft

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ 2.24 เมื่อ

$$CR_2 = \frac{P_2 + 14.7}{14.7}$$

จะได้ว่า

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_2 - 59.52 = \frac{(0.1025)(1.64 + 0.224)(9.18)^2}{\left(\frac{P_2+14.7}{14.7}\right) (0.315)^{5.31}(3600)}$$

ดังนั้น ความดันก่อนที่จะผ่านท่อข้อต่อ TEE No.1 (P_2) = 59.93 psi หรือ 4.13 bar

5.) คำนวณอัตราการไหลลมรวมขณะเติมจาระบี

อัตราการไหลลมรวมขณะเติมจาระบี ($Q_{1,filling\ grease}$) = อัตราการไหลลมปั๊มจาระบี ($Q_{ลมอัดปั๊มจาระบี}$) +
อัตราการไหลลมขณะที่กระบอกสูบ 1 หดกลับ ($Q_{1,cyl, rod}$)

$$Q_{1,filling\ grease} = 0.26 + (9.05 \times 10^{-5})$$

$$= 0.2601 \text{ Sm}^3/\text{min} \text{ หรือ } 9.19 \text{ scfm}$$

6.) ความดันที่ FRL - ก่อนถึงท่อข้อต่อ TEE No.1 (จุดที่ 2)

- จากรูปที่ 3.14 ความยาวของท่อ (L) 0.49 ft
- จากรูปที่ 3.14 เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) 0.315 inch
- อัตราการไหลลมรวมขณะเติมจาระบีที่ ความดันบรรยากาศ (Q_1) 9.19 scfm
- ความดันก่อนเข้าท่อข้อต่อ TEE No.1 $P_1 = 59.93$ psi

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (2.20) เมื่อ P_{FRL} คือ ความดัน FRL ก่อนเข้าท่อข้อต่อ TEE No.1 เมื่อ

$$CR_{FRL} = \frac{P_{FRL} + 14.7}{14.7}$$

จะได้ว่า

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_{FRL} - 59.93 = \frac{(0.1025)(0.49)(9.19)^2}{\left(\frac{P_{FRL}+14.7}{14.7}\right)(0.315)^{5.31}(3600)}$$

$$P_{FRL} = 60.04 \text{ psi}$$

ดังนั้นจะได้ค่าความดันที่ FRL = 60.04 psi หรือ 4.14 bar ซึ่งจะต้องตั้งค่าความดันที่ชุดควบคุมแรงดันลม (Air Regulator) เท่ากับ 4.14 bar

ตารางที่ 3.9 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณหาปริมาณลมที่ใช้

ลำดับ	ตัวแปร	ปริมาณ
1	อัตราการไหลของลมอัดรวมระยะปั๊มจากระบบทำงาน	0.2601 Sm ³ /min
2	ระยะเวลาที่ปั๊มจากระบบทำงาน	0.4 min
3	ปริมาณลมที่ใช้ในการเติมจากระบบ	0.104 Sm ³ /round
4	อัตราการไหลของลมอัดขณะกระบอกสูบ 1 กำลังหด	9.05x10 ⁻⁵ Sm ³ /min
5	ระยะเวลาที่กระบอกสูบหดตัว	0.5 min
6	ปริมาณลมที่ใช้ในหดกระบอกสูบ 1	4.525x10 ⁻⁵ Sm ³ /round

3.2.5 คำนวณหาความดันที่ FRL ว่าเพียงพอหรือไม่เพื่อใช้ในการส่งลมไปยังกระบอกสูบ 3

เนื่องจากกระบอกสูบที่ 3 จำเป็นจะต้องได้ความดันไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.2.3 และกระบอกสูบที่ 1 และ 2 ใช้ความดันเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการหาความดัน FRL ที่น้อยที่สุดเพื่อจะทำให้กระบอกสูบที่ 3 ทำงานได้อย่างสมบูรณ์

เริ่มคำนวณที่จุดที่ 11 จากหัวข้อที่ 3.2.3 ความดันที่ต้องการสำหรับกระบอกสูบที่ 3 P₁₁ เท่ากับ 2.44 bar และอัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ ของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งลูกสูบ (Q_{1,cyl3,Piston}) = 5.856 x 10⁻⁴ Sm³/min หรือ 0.0207 scfm

- 1.) คำนวณความดันที่ตกรวมช่วงกระบอกสูบ 3 ถึง หลังจากผ่านโซลินอยด์ D
 - ต้องการให้ที่กระบอกสูบ 3 มีความดัน P₁₁ = 2.44 bar หรือ 35.4 psi
 - จากรูปที่ 3.14 ความยาวของท่อ L = 2 m หรือ 6.56 ft
 - จากรูปที่ 3.14 เส้นผ่านศูนย์กลาง D = 4 mm หรือ 0.157 inch
 - อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ = 0.0207 scfm

ใช้วิธีคำนวณย้อนกลับ (Reverse Calculation) โดยที่ P₁₀ คือ ความดันหลังจากผ่านวาล์วโซลินอยด์ D และ

$$CR_{10} = \frac{P_{10} + 14.7}{14.7}$$

และแทนในสมการได้เป็น

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_{10} - 35.40 = \frac{(0.1025)(6.56)(0.0207)^2}{\left(\frac{P_{10}+14.7}{14.7}\right) (0.157)^{5.31} (3600)}$$

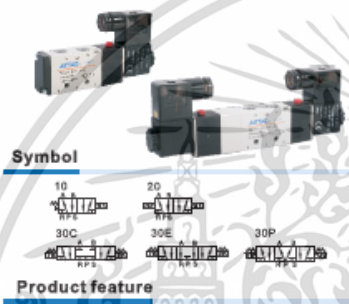
$$P_{10} = 35.40 \text{ psi}$$

ดังนั้นความดันหลังผ่านวาล์วโซลินอยด์ D (P_{10}) เท่ากับ 35.40 psi หรือ 2.44 bar

2.) จำนวนแรงดันที่สูญเสียที่วาล์วโซลินอยด์ D

Solenoid valve(5/2 way, 5/3 way) 4V200 Series

AIRTAC



specification				
Model	4V210-06 4V220-06	4V230C-06 4V230E-06 4V230F-06	4V210-08 4V220-08	4V230C-08 4V230E-08 4V230F-08
Fluid	Air(to be filtered by 40µm filter element)			
Acting	Internal pilot or external pilot			
Port size [Note1]	In=Out=Exhaust=1/8"		In=Out=1/4" Exhaust=1/8"	
Orifice size	14.0mm ² (Cv=0.76)	12.0mm ² (Cv=0.67)	16.0mm ² (Cv=0.89)	12.0mm ² (Cv=0.67)
Valve type	5 port 2 position	5 port 3 position	5 port 2 position	5 port 3 position
Operating pressure	0.15-0.8MPa(21-114psi)			
Operating pressure	1.2MPa(175psi)			
Temperature	-20-70°C			
Material of body	Aluminum alloy			
Lubrication [Note2]	Not required			
Max. frequency [Note3]	5 cycle/sec	3 cycle/sec	5 cycle/sec	3 cycle/sec
Weight (g)	4V210-06:220 4V220-06:320	360	4V210-08:220 4V220-08:320	360

รูปที่ 3.20 รูปภาพแสดงข้อมูลโมเดลต่างๆของวาล์วโซลินอยด์ 5/2 กับ 5/3 ของ AirTAC [1]

กำหนดให้อุณหภูมิลมเท่ากับ 30°C หรือ 23.25 R และเนื่องจากใช้วาล์วโซลินอยด์ 3/2 โมเดล 3V220 - 08 จากรูปที่ 3.20 ซึ่งจะมีค่าคงที่การไหล $C_v = 0.89$ แทนค่าในสมการที่ (2.20) จะได้ความดันก่อนเข้าวาล์วโซลินอยด์ D (P_9) คือ

$$Q = 22.7C_v \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)(P_2)}{T_2}}$$

$$0.0207 = 22.7 \times 0.89 \sqrt{\frac{(P_9 - 35.40)(35.40)}{23.25}}$$

ดังนั้นจะได้ความดันก่อนเข้าวาล์วโซลินอยด์ D เท่ากับ 35.40 psi หรือ 2.44 bar

3.) จำนวนช่วงก่อนข้อต่อ TEE No.2 ถึงวาล์วโซลินอยด์ D

- ความดันก่อนเข้าที่วาล์วโซลินอยด์ D $P_9 = 35.40$ psi
- จากรูปที่ 3.14 ความยาวของท่อ $L = 0.15$ m = 0.49 ft
- จากรูปที่ 3.14 เส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 8$ mm = 0.315 inch
- อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ = 0.0207 scfm

จากวงจรนิวแมติก(Pneumatic Circuits) มีท่อข้อต่อ TEE 1 ตัว โดยทางเข้าและออกมีแนว

การไหลที่ตั้งฉากกัน (Through Branch) และจากตารางที่ 3.8 ทำการ Interpreting Regression เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inside Diameter) 0.315 inch จะได้ค่า Equivalent length เท่ากับ 1.427 ft ดังนั้นความยาวรวมสมมูล เท่ากับ $0.49 + 1.427 = 1.917$ ft

$$CR_7 = \frac{P_7 + 14.7}{14.7}$$

และแทนในสมการได้เป็น

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_7 - 35.40 = \frac{(0.1025)(1.917)(0.0207)^2}{\left(\frac{P_7+14.7}{14.7}\right) (0.315)^{5.31}(3600)}$$

$$P_{10} = 35.40 \text{ psi}$$

ดังนั้นความดันก่อนข้อต่อ TEE No.2 P_7 เท่ากับ 35.40 psi หรือ 2.44 bar

4.) จำนวนอัตราการไหลรวมขณะกระบอกสูบทั้ง 3 ทำงาน

อัตราการไหลรวมขณะกระบอกสูบทั้ง 3 ทำงาน เท่ากับ

อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl1,piston}$) +
อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl2,piston}$) +
อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl3,piston}$)

ซึ่งเท่ากับ $7.6815 \times 10^{-4} + 1.89 \times 10^{-4} + 5.856 \times 10^{-4} = 1.543 \times 10^{-3} \text{ Sm}^3/\text{min}$ หรือ 0.0545 scfm

5.) จำนวนช่วงก่อนข้อต่อ TEE No.1 ถึงก่อนข้อต่อ TEE No.2

- ความดันก่อนเข้าที่ข้อต่อ TEE No.2 $P_7 = 35.40$ psi
- จากรูปที่ 3.14 ความยาวของท่อ $L = 0.15$ mm = 0.49 ft
- จากรูปที่ 3.14 เส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 8$ mm = 0.315 inch
- อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ = 0.0545 scfm

จากวงจรนิวแมติก(Pneumatic Circuits) มีท่อข้อต่อ TEE 1 ตัว โดยทางเข้าและออกมีแนวการไหลที่ตั้งฉากกัน (Through Branch) และจากตารางที่ 3.8 ทำการ Interpreting Regression กับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(Inside Diameter) 0.315 inch จะได้ค่า Equivalent length เท่ากับ 1.427 ft ดังนั้นความยาวรวมสมมูล เท่ากับ $0.49 + 1.427 = 1.917$ ft

$$CR_1 = \frac{P_1 + 14.7}{14.7}$$

และแทนในสมการได้เป็น

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_1 - 35.40 = \frac{(0.1025)(1.917)(0.0207)^2}{\left(\frac{P_1+14.7}{14.7}\right)(0.315)^{5.31}(3600)}$$

$$P_1 = 35.40\text{psi}$$

ดังนั้นความดันก่อนข้อต่อ TEE No.1 P_1 เท่ากับ 35.40 psi หรือ 2.44 bar

6.) จำนวนช่วง FRL ถึง ก่อนข้อต่อ TEE No.1

- ความดันก่อนเข้าท่อข้อต่อ TEE No.1 $P_1 = 35.40$ psi หรือ 2.44 bar
- ความยาวของท่อ (L) = 0.15 m หรือ 0.49 ft
- เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) = 8 mm หรือ 0.315 inch
- อัตราการไหลของลมที่ ความดันบรรยากาศ = 0.0207 scfm

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (2.20) เมื่อ P_{FRL} คือ ความดัน FRL ก่อนเข้าท่อข้อต่อ TEE No.1 เมื่อ

$$CR_{FRL} = \frac{P_{FRL} + 14.7}{14.7}$$

จะได้ว่า

$$P_f = \frac{0.1025LQ^2}{CRd^{5.31}3600}$$

$$P_{FRL} - 35.40 = \frac{(0.1025)(0.49)(0.0207)^2}{\left(\frac{P_{FRL}+14.7}{14.7}\right)(0.315)^{5.31}(3600)}$$

$$P_{FRL} = 35.40\text{psi}$$

ดังนั้นความดัน FRL ที่น้อยที่สุดเพื่อจะทำให้กระบอกสูบที่ 3 ทำงานได้ เท่ากับ 35.40 psi หรือ 2.44 bar

เนื่องจากความดันที่ FRL ที่น้อยที่สุดเพื่อจะทำให้กระบอกสูบที่ 3 ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ น้อยกว่าที่ตั้งไว้ที่ 4.14 bar แสดงว่าความดัน FRL ที่ตั้งไว้สามารถใช้งานได้ (เนื่องจากความดันที่ กระบอกสูบ 3 จะได้มากกว่าที่ต้องการ จะทำให้หลอดสามารถปิดได้อย่างสนิท)

3.2.6 ปริมาณลมที่ใช้ใน1หลอด

1.1) ปริมาณลมของกระบอกสูบทั้ง 3 วินาทีที่ 0 - 2.5

ซึ่งเท่ากับ

$$\text{อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งลูกสูบ } (Q_{1,cyl1,piston}) +$$

$$\text{อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งลูกสูบ } (Q_{1,cyl2,piston}) +$$

$$\text{อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งลูกสูบ } (Q_{1,cyl3,piston})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 7.682 \times 10^{-4} + 1.890 \times 10^{-4} + 5.856 \times 10^{-3} \frac{Sm^3}{min} \times \frac{1 min}{60 sec} \times 2.5 sec$$

$$= 6.429 \times 10^{-5} Sm^3$$

1.2) ปริมาณลมของกระบอกสูบทั้ง 3 วินาทีที่ 2.5 - 5

ซึ่งเท่ากับ

อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 1 ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl1,piston}$) +
 อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 2 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{1,cyl2, rod}$) +
 อัตราการไหลของลมที่ความดันบรรยากาศของกระบอกสูบที่ 3 ฝั่งก้านสูบ ($Q_{1,cyl3 rod}$)

$$= 7.682 \times 10^{-4} + 1.580 \times 10^{-4} + 1.81 \times 10^{-4} \frac{Sm^3}{min} \times \frac{1 min}{60 sec} \times 2.5 sec$$

$$= 4.613 \times 10^{-5} Sm^3$$

1.3) ปริมาณลมของกระบอกสูบทั้ง 3 วินาทีที่ 0 - 5 จะเท่ากับ

$$6.4292 \times 10^{-5} + 4.6131 \times 10^{-5} = 1.1042 \times 10^{-4} Sm^3$$

1.4) ปริมาณลมที่ใช้หดกระบอกสูบ 1

จากหัวข้อ 3.2.3 กระบอกสูบ 1 หดกลับด้วยอัตราการไหลที่ ความดันบรรยากาศ ฝั่งลูกสูบ ($Q_{1,cyl,rod}$) เท่ากับ $9.05 \times 10^{-5} Sm^3/min$ โดยใช้เวลา 30 sec

ปริมาณลมที่ใช้หดกระบอกสูบ 1 เท่ากับ

$$= 9.05 \times 10^{-5} \frac{Sm^3}{min} \times \frac{1 min}{60 sec} \times 30 sec$$

$$= 4.525 \times 10^{-5} Sm^3$$

1.5) ปริมาณลมที่ใช้สำหรับปั๊มจาระบีต่อ 1 หลอด

จากจุดทำงานปั๊มจาระบีใช้อัตราการไหลลมอัด $0.26 Sm^3/min$ และ สามารถเติมจาระบีเต็มได้ภายใน 24 sec

ปริมาณลมที่ใช้สำหรับปั๊มจาระบีต่อ 1 หลอด

$$= 0.26 \frac{Sm^3}{min} \times \frac{1 min}{60 sec} \times 24 sec$$

$$= 104 Sm^3$$

1.6) รวมปริมาณลม 1 รอบการทำงาน = ปริมาณลมที่ใช้เติมจาระบี +

ปริมาณลมที่ใช้หดกระบอกสูบ 1 +

ปริมาณลมของกระบอกสูบทั้ง 3 วินาทีที่ 0 - 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.1040 + 4.525 \times 10^{-5} + 1.1042 \times 10^{-4}$$

$$= 0.1042 \text{ Sm}^3/\text{round}$$

1 รอบใช้เวลา = 30 + 1 + 5 = 36 sec หรือ 0.6 min

คิดเป็นอัตราการใช้ลม = 0.174 Sm³/min หรือ 174 L/min

3.2.7 การเลือกปั๊มลมที่เหมาะสม

Model	kW	Hp	Bore	Stroke	ℓ/min	c.f.m.	number	kg/cm ² /psi	kg/cm ² /psi	RPM	ℓ/Unit	MM		
PP1	0.2	1/4	51	38	55.8	1.97	1	7	100	10	142	650	36	260 x 700
PP2	0.4	1/2	51	45	119.6	4.22	2	8	115	10	142	650	64	325 x 790
PP2P	0.4	1/2	51	45	119.6	4.22	2	8	115	10	142	650	92	360 x 1,000
PP21	0.75	1	65	46	203.2	7.17	2	8	115	10	142	600	92	360 x 1,000
PP22	1.5	2	65	46	296	10.52	2	8	115	10	142	880	148	390 x 1,240
PP32	1.5	2	65	48	330	11.68	3	8	115	10	142	650	148	390 x 1,240
PP23	2.2	3	80	60	550	21	2	8	115	10	142	770	165	390 x 1,440

รูปที่ 3.21 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆของปั๊มจากหนังสือสินค้าของ puma [1]

เมื่อให้ปั๊มลมมีเวลาพักการทำงาน 30 % ซึ่งความสามารถผลิตลมของปั๊มลมคุณด้วย 0.7 จะเท่ากับอัตราการใช้ลมที่ต้องการ หรือความสามารถผลิตลมของปั๊มลมจะเท่ากับ

$$\frac{174}{0.7} = 248.57 \text{ L/min}$$

ดังนั้นควรเลือกปั๊มลมที่มีความสามารถในการผลิตลม 248.57 L/min ขึ้นไปและจากรูปที่ 3.21 จึงเลือก Puma PP-32 เนื่องจากอัตราการผลิตลมสูงกว่า PP-22 ในขณะที่ราคาใกล้เคียงกัน

3.3 การคำนวณค่าไฟและความสามารถในการทำงานของเครื่อง

3.3.1 พลังงานที่ใช้ของปั๊มลม

จากคุณสมบัติของมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ใช้กระแสไฟฟ้า 9.3 A 220 V ใช้สมการกำลังไฟฟ้า $P = VI$ จะได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ $220 \times 9.3 = 2.046 \text{ kW}$

เนื่องจากเวลาในการบรรจุจาร์บี 1 หลอดใช้เวลาประมาณ 36 sec ใช้อัตราการไหลลมอัด 0.174 Sm³/min ที่ 4 bar และเลือกปั๊มลมที่เลือกใช้ Puma PP-32 ผลิตลมได้ 0.33 Sm³/min ดังนั้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการทำงานของปั๊มได้เป็น

$$\frac{W_{actual}}{W_{pump}} = \frac{0.174}{0.33}$$

$$= 0.5273$$

$$= 52.73\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้กำลังเฉลี่ยที่ใช้ของปั๊มลมมีค่าเท่ากับ

$$P_{pump} = (2.046 \text{ kW}) \times 0.5273 \\ = 1.0789 \text{ kW}$$

เนื่องจากใช้เวลา 36 วินาทีต่อหลอด จะสามารถผลิตได้ 100 หลอดต่อชั่วโมง

$$P_{pump} = 1.079 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ sec}} \times 36 \text{ sec}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้ของปั๊มลมมีค่าเท่ากับ 0.0108 kWh/cartridge

และจากการคำนวณเวลาในการบรรจุจาระบี 1 หลอดใช้เวลาประมาณ 36 sec จะสามารถบรรจุได้ทั้ง 100 หลอดต่อชั่วโมงหรือ 40 kg/hr (1 หลอดบรรจุจาระบีได้ 400 g)

3.3.2. พลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุจาระบี

พลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุจาระบี = พลังงานที่ใช้กับ Arduino Board + พลังงานที่ใช้กับมอเตอร์
+ พลังงานที่ใช้กับโซลินอยด์

1) พลังงานที่ใช้กับ Arduino Board

เนื่องจากพลังงานที่ใช้กับ Arduino Board จะใช้ไฟฟ้า 5 V ที่กระแสมากที่สุด 1 A
จะได้ว่า

$$W_{arduino} = Pt \\ = (5)(1) \times \frac{1}{100} \text{ unit/hr} \\ = 0.05 \text{ Wh/unit}$$

2) พลังงานที่ใช้กับมอเตอร์

จากคุณสมบัติมอเตอร์จะใช้ไฟฟ้า 12 V ที่กระแสมากที่สุด 1.6 A โดยที่ใช้มอเตอร์
ทั้งหมด 3 ตัวด้วยกัน

มอเตอร์ตัวที่ 1 มีรอบการทำงาน 20 รอบต่อนาที และหมุน 1 รอบใช้เวลา 3 sec

จะได้ว่า

$$W_{motor1} = Pt \\ = (12)(1.6) \times \left(3 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit}\right) \\ = 0.016 \text{ Wh/unit}$$

มอเตอร์ตัวที่ 2 มีรอบการทำงาน 12 รอบต่อนาที และหมุน 1 รอบใช้เวลา 5 sec

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 W_{motor2} &= Pt \\
 &= (12)(1.6) \times \left(5 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit} \right) \\
 &= 0.0267 \text{ Wh/unit}
 \end{aligned}$$

มอเตอร์ตัวที่ 3 มีรอบการทำงาน 40 รอบต่อนาที และหมุน 1 รอบใช้เวลา 1.5 sec
 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 W_{motor3} &= Pt \\
 &= (12)(1.6) \times \left(1.5 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit} \right) \\
 &= 0.008 \text{ Wh/unit}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้กับมอเตอร์เท่ากับ $0.016 + 0.0267 + 0.008 = 0.051 \text{ Wh/cartridge}$

3) พลังงานที่ใช้กับโซลินอยด์

จากคุณสมบัติของโซลินอยด์ใช้กำลังไฟฟ้า 3 วัตต์ทุกตัว โดยใช้ทั้งหมด 5 ตัว

โซลินอยด์ตัวที่ 1 (A+) = โซลินอยด์ตัวที่ 2 (A) มีเวลาการทำงาน 1 วินาทีต่อรอบ

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 W_{solenoid1} &= W_{solenoid2} = Pt \\
 &= 3 \times \left(1 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit} \right) \\
 &= 0.00083 \text{ Wh/unit}
 \end{aligned}$$

โซลินอยด์ตัวที่ 3 (B) มีเวลาการทำงาน 5 วินาทีต่อรอบ

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 W_{solenoid3} &= Pt \\
 &= 3 \times \left(5 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit} \right) \\
 &= 0.00417 \text{ Wh/unit}
 \end{aligned}$$

โซลินอยด์ตัวที่ 4 (C) = โซลินอยด์ตัวที่ 5 (D) มีเวลาการทำงาน 2.5 วินาทีต่อรอบ

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 W_{solenoid4} &= W_{solenoid5} = Pt \\
 &= 3 \times \left(2.5 \times \frac{1}{3600} \text{ hr/unit} \right) \\
 &= 0.00208 \text{ Wh/unit}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้กับโซลินอยด์เท่ากับ $2(0.0083) + 0.00417 + 2(0.00208) = 0.010$

Wh/cartridge

และพลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุกระป๋อง = $0.05 + 0.051 + 0.01 = 0.111 \text{ Wh/cartridge}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 พลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด

$$\begin{aligned}\text{พลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด} &= \text{พลังงานที่ใช้ของปั๊มลม} + \text{พลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุจาระบี} \\ &= 0.0108 + 0.111 \times 10^{-3} \\ &= 0.01081 \text{ kWh/cartridge}\end{aligned}$$

3.3.4 การคำนวณความสามารถในการผลิตของเครื่องบรรจุจาระบี

จากพลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด 0.01081 kWh/cartridge จะได้

1.) พลังงานที่ใช้ในการผลิตต่อ 1 ชั่วโมง

$$\begin{aligned}W_{average} &= 0.0108 \frac{\text{kWh}}{\text{cartridge}} \times \frac{100 \text{ cartridge}}{1 \text{ hr}} \\ &= 1.081 \text{ kWh/hr}\end{aligned}$$

2.) คิดเป็นน้ำหนัก

$$\begin{aligned}W_{average} &= 0.0108 \frac{\text{kWh}}{\text{cartridge}} \times \frac{1 \text{ cartridge}}{0.4 \text{ kg}} \\ &= 0.027 \text{ kWh/kg}\end{aligned}$$

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1.) ปัมจาระบี

ปั๊มจาระบียี่ห้อ ECODORA รุ่น ซีรีส์ 600 รหัส 62095



รูปที่ 4.1 ปั๊มจาระบี Ecodora Series 600

2.) ปั๊มลม Puma PP-32



รูปที่ 4.2 ปั๊มลม Puma PP-32

3.) มอเตอร์ 1 เฟสขนาด 2 hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และด้อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 มอเตอร์ขนาด 2 hp 1 เฟส

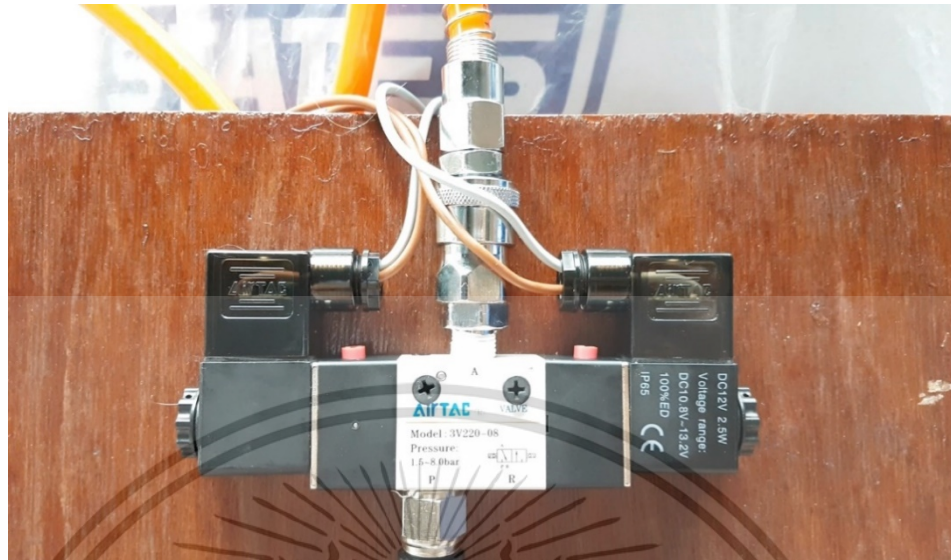
4.) ชุดบริการลมอัด (FRL) Airtac BC2000 ที่มีขนาดเกลียว 1/4"



รูปที่ 4.4 ชุดบริการลมอัด (FRL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และด้อย่างยิ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) วาล์วโซลินอยด์ Airtac 3V-220-08ที่มีขนาดเกลียว 1/4” ใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง 12 V



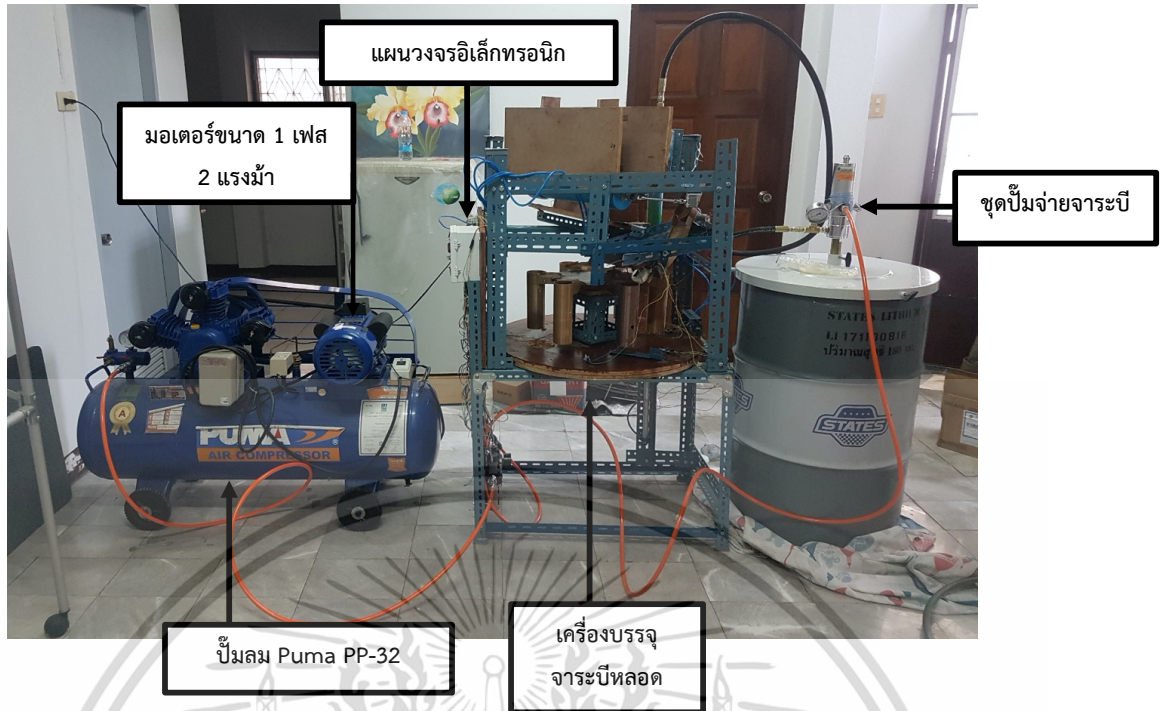
รูปที่ 4.5 โซลินอยด์วาล์ว Airtac 3V-220-08

6.) กระบอกจ่ายจาระบี



รูปที่ 4.6 กระบอกจ่ายจาระบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง

4.2 การทดลองเพื่อหาความดันของลมอัดที่เหมาะสมกับปั๊มลม

เนื่องจากคณะผู้จัดทำต้องการให้เครื่องบรรจุจาระบีหลอดนั้นสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วที่สุด ที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อปั๊มลมเนื่องจากความร้อนจากการใช้งานหนัก การหาความดันของลมอัดที่ควรใช้งานกับปั๊มลม จึงเป็นเรื่องที่ต้องทำการทดลอง โดยทำการทดลองและคำนวณเพื่อหากราฟหรือสมการของ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของลมอัดต่อความดันของลมอัดที่ใช้งาน
2. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของจาระบีต่อความดันของลมอัดที่ใช้งาน
3. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของจาระบีต่ออัตราการไหลของลมอัด

ซึ่งเมื่อได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว สามารถนำไปคำนวณหาความดันที่เหมาะสมกับอัตราการผลิตลมของปั๊มลมนั้นๆ ได้

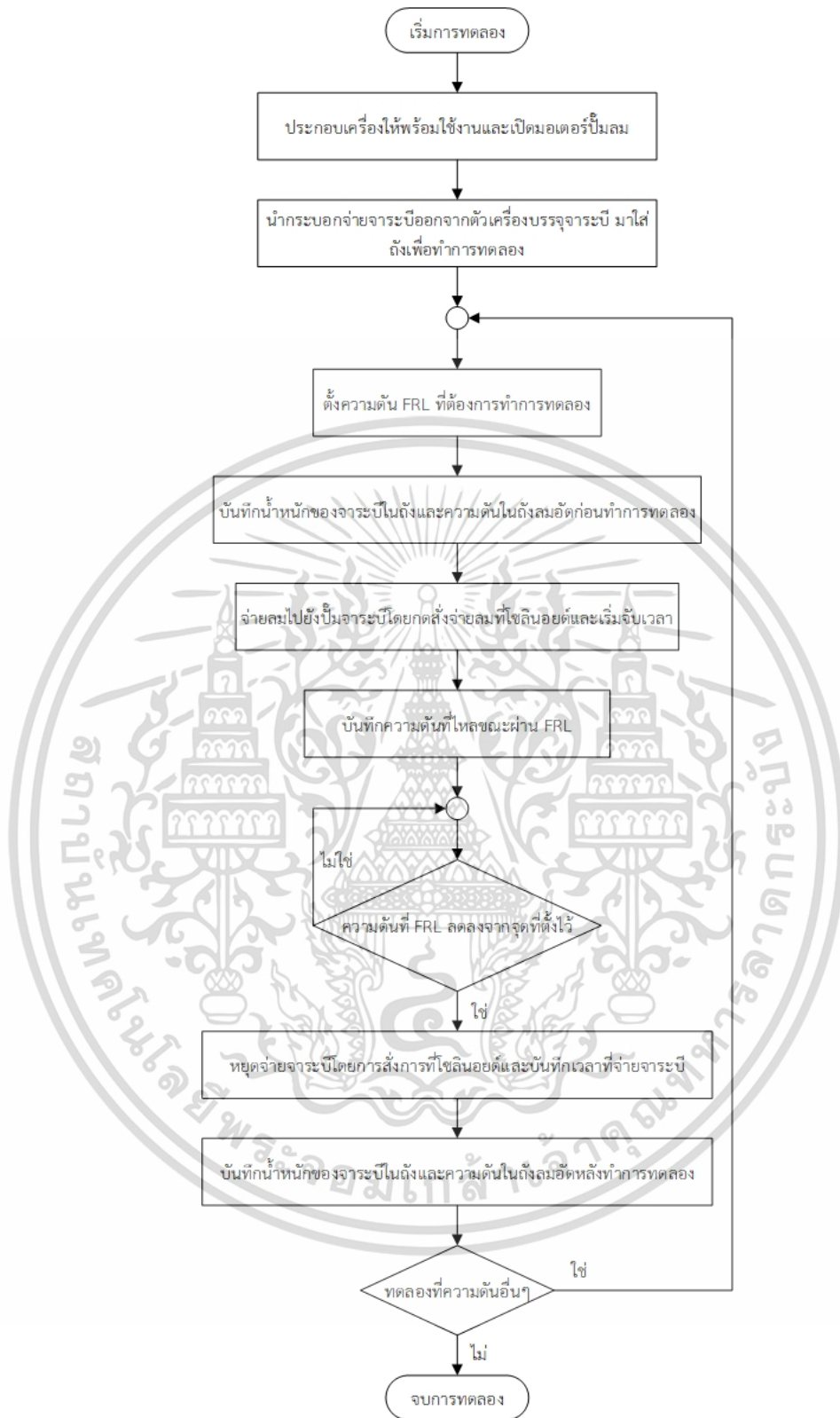
4.2.1 วิธีการทดลอง

- 1.) ประกอบเครื่องให้พร้อมใช้งานดังรูปที่ 4.7 โดยการ ต่อสายลมระหว่างปั๊มจาระบี (รูปที่ 4.1) กับ วาล์วโซลินอยด์ (รูปที่ 4.5) และระหว่าง FRL (รูปที่ 4.4) กับ ปั๊มลม (รูปที่ 4.2) ส่วนสายจาระบีต่อระหว่างตัวเครื่องบรรจุจาระบีกับปั๊มจาระบี (รูปที่ 4.1)
- 2.) เปิดมอเตอร์ปั๊มลม (รูปที่ 4.3) ให้พร้อมใช้งานและนำกระบอกจ่ายจาระบีออกจากตัวเครื่องบรรจุจาระบี (รูปที่ 4.6) แล้วนำมาใส่ถังเพื่อทำการทดลอง (ขณะทำการทดลองต้องยกมือให้กระบอกจ่ายจาระบีสัมผัสถังหรือจาระบีที่อยู่ข้างในถัง)

- 3.) ตั้งค่าความดันที่ต้องการทดลองที่ FRL (รูปที่ 4.4) บันทึกค่าความดันลมในถังลมอัดและมวลของจาระบีในถังก่อนทำการทดลอง
- 4.) จ่ายลมไปยังปั๊มจาระบีโดยกดสั่งจ่ายลมที่โซลินอยด์ (รูปที่ 4.5) และเริ่มจับเวลา
- 5.) บันทึกความดันที่ลมไหลผ่าน FRL (รูปที่ 4.4) และหยุดจ่ายจาระบีโดยการสั่งการที่โซลินอยด์ (รูปที่ 4.5) เมื่อความดันที่ FRL ลดลงจากจุดที่ตั้งค่าไว้ให้บันทึกเวลาที่บันทึก
- 6.) บันทึกมวลจาระบีและความดันในถังลมอัดในตารางผลการทดลอง
- 7.) ทำซ้ำที่ความดันอื่นๆ โดยการปรับความดันตามตารางที่ 4.2

แสดงวิธีการทดลองเป็นแผนผังการทำงานดังรูปที่ 4.8





รูปที่ 4.8 แผนผังการทดลองเพื่อหาความดันของลมอัดที่เหมาะสมกับปั๊มลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการหาความดันของลมอัดใช้งานที่เหมาะสม

ลำดับ	ความดันจริง ขณะทำงาน (bar)	ความดันปัม ลมตอนแรก (bar)	มวลจาระบี หลัง (kg)	ความดันปัม ลมตอนหลัง (bar)	มวลจาระบี หลัง (kg)	เวลา (sec)
1	2.0	7.9	5.95	5.6	7.15	78.0
2	2.2	7.9	4.50	5.6	5.75	75.0
3	2.4	7.9	3.00	5.3	4.30	77.0
4	2.6	7.0	13.30	4.6	14.50	68.0
5	2.8	7.0	0.90	4.6	2.10	65.0
6	3.0	7.0	2.50	4.6	3.65	62.0
7	3.2	7.0	4.00	4.6	5.10	56.0
8	3.4	7.0	6.00	4.6	7.05	52.0
9	3.6	7.0	8.25	4.6	9.30	50.0
10	3.8	7.0	9.40	4.7	10.35	45.0
11	4.0	7.0	10.60	5.3	11.25	30.0
12	4.2	7.0	11.90	5.2	12.60	31.0
13	4.4	7.1	13.10	5.3	13.70	27.0
14	4.6	7.1	14.25	5.3	14.90	27.0
15	4.8	8.0	10.85	6.3	11.40	24.0
16	5.0	8.1	11.90	6.4	12.45	22.0
17	5.2	8.1	13.00	6.6	13.45	18.0
18	5.4	8.0	14.20	6.5	14.65	17.0
19	5.6	8.0	15.35	7.0	15.65	10.5
20	5.8	8.0	1.60	7.1	1.85	9.0
21	6.0	8.1	3.65	7.2	3.90	8.5
22	6.2	8.1	2.60	7.3	2.80	7.0

4.2.2 การคำนวณค่าที่ได้จากผลการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตารางที่ 4.1

- ความดันจริงขณะทำงาน 4.0 bar
- ความดันในถังลมอัดตอนแรก 7.0 บาร์ หรือ 700 kpa
- ความดันในถังลมอัดตอนหลัง 5.3 บาร์ หรือ 530 kpa
- มวลจาระบีตอนแรก 10.60 kg
- มวลจาระบีตอนหลัง 11.25 kg
- เวลาที่ปั๊มจาระบีทำงาน 30 วินาที หรือ 0.5 min

1.) อัตราการใช้ลมคำนวณจากสมการที่ 2.28

$$V_r = \frac{101t(Q_r - Q_c)}{P_{\max} - P_{\min}}$$

ปั๊มลมที่ใช้ในการทดลอง Puma PP-32 ขนาดถังลม 0.148 m³

แทนค่าในสมการได้

$$\begin{aligned} 0.148 &= \frac{(101)(0.5)(Q)}{700 - 300} \\ &= 0.4982 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

อัตราการใช้ลม เท่ากับ 0.4982 m³/min

2.) การคำนวณอัตราการใช้จาระบี

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{grease}} &= \frac{m_{\text{grease(after)}} - m_{\text{grease(before)}}}{t} \\ &= \frac{11.25 - 10.60}{0.5} \\ &= 1.300 \text{ kg/min} \end{aligned}$$

อัตราการใช้จาระบี เท่ากับ 1.3000 kg/min

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงอัตราการไหลของลมที่ใช้และอัตราการไหลของจาระบีที่ความดันต่างๆ ณ จุดจ่ายจาระบี ซึ่งได้จากการทดลอง

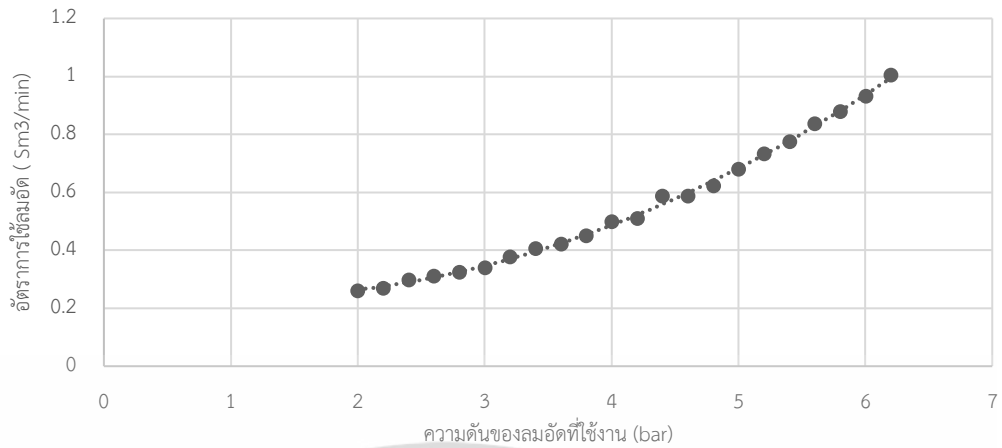
ลำดับ	ความดันจริงขณะทำงาน (bar)	อัตราการใช้ลม (Sm ³ /min)	อัตราการไหลจาระบี (kg/min)
1	2.0	0.2593	0.9231
2	2.2	0.2696	1.0000
3	2.4	0.2969	1.0130
4	2.6	0.3103	1.0588
5	2.8	0.3246	1.1077
6	3.0	0.3403	1.1129
7	3.2	0.3768	1.1786
8	3.4	0.4058	1.2115
9	3.6	0.4220	1.2600
10	3.8	0.4494	1.2667
11	4.0	0.4982	1.3000
12	4.2	0.5105	1.3548
13	4.4	0.5861	1.3333
14	4.6	0.5861	1.4444
15	4.8	0.6228	1.3750
16	5.0	0.6794	1.5000
17	5.2	0.7327	1.5000
18	5.4	0.7758	1.5882
19	5.6	0.8373	1.7143
20	5.8	0.8792	1.6667
21	6.0	0.9309	1.7647
22	6.2	1.0048	1.7143

นำค่าจากตารางที่ 4.2 มาสร้างกราฟเพื่อสังเกตพฤติกรรมของค่าความดันและอัตราการใช้ลมและกำหนดให้

x หมายถึง ความดันลมอัดที่ใช้งาน (bar)

y หมายถึง อัตราการใช้ลมอัด (standard m³/min)

z หมายถึง อัตราการไหลของจาระบี (kg/min)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอน้ำกับความดันของลมอัดที่ใช้งาน

จะได้สมการ Trending line คือ

$$y = 0.0283x^2 - 0.0579x + 0.2660 \quad (4.1)$$

โดยที่ค่าความผันแปรเชิงสถิติ(R-square)ของกราฟนี้มีค่าเท่ากับ 0.9982

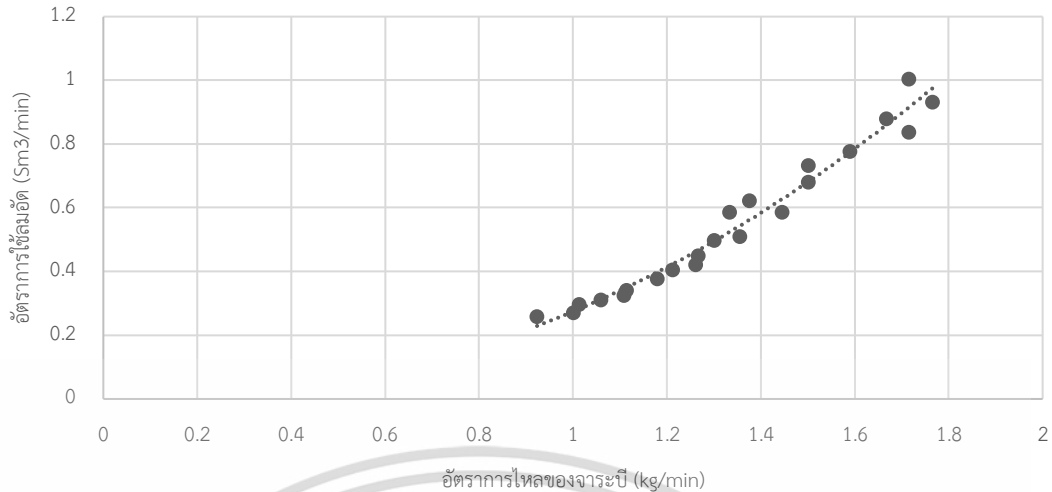


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของถ่านหินกับความดันของลมอัดที่ใช้งาน

จะได้สมการ Trending line คือ

$$z = 0.1914x + 0.5509 \quad (4.2)$$

โดยที่ค่าความผันแปรเชิงสถิติ(R-square)ของกราฟนี้มีค่าเท่ากับ 0.9768



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของจากระบีต่ออัตราการใช้ลมอัด

จะได้สมการ Trending line คือ

$$y = 0.3860z^2 - 0.1514x + 0.0401 \quad (4.3)$$

โดยที่ค่าความผันแปรเชิงสถิติ(R-square)ของกราฟนี้มีค่าเท่ากับ 0.9697

สรุปข้อมูลที่ได้จากกราฟ

- จากรูปที่ 4.9 เมื่อความดันลมอัดที่ใช้งานสูงขึ้น อัตราการใช้ลมอัดจะเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสอง
- จากรูปที่ 4.10 เมื่อความดันลมอัดที่ใช้งานสูงขึ้น อัตราการไหลของจากระบีจะสูงขึ้นเป็นเส้นตรง
- จากรูปที่ 4.11 เมื่ออัตราการไหลของจากระบีสูงขึ้นอัตราการใช้ลมจะเพิ่มเป็นกำลัง 2 ของอัตราการไหลจากระบีซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของอัตราการใช้ลมต่ออัตราการไหลจากระบีเพิ่มขึ้น

จาก เวลาที่จากระบีหยุดจ่ายต่อ 1 รอบ = เวลาที่ใช้ในการดันหลอดขึ้นไปยังหัวจ่าย
 + เวลาที่ลูกสูบดันหลอดหดกลับโดยจากระบีหยุดจ่าย
 + เวลาในการหมุนตัวประครองหลอดเพื่อเปลี่ยน

Station

$$= 12 \text{ sec}$$

นำผลจากการคำนวณสมการที่ 4.1 และ 4.2 มาแทนค่าความดันที่ใช้งาน ได้เวลาที่ใช้ต่อหลอดและอัตราการใช้ลมจริงและนำมาสร้างตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงอัตราการใช้ลมจริงที่ความดันต่างๆ

ความดันที่ใช้ (bar)	อัตราการไหลจากระบบ (kg/min)	ใส่จากระบบเสร็จ (min)	อัตราการไหลลม (Sm ³ /min)	ปริมาณลมที่ใช้ (m ³)	เวลาที่ใช้ต่อหลอด (min)	อัตราการใช้ลมจริง (Sm ³ /min)
2.0	0.9337	0.4284	0.2634	0.1128	0.6284	0.1796
2.2	0.9720	0.4115	0.2756	0.1134	0.6115	0.1855
2.4	1.0103	0.3959	0.2900	0.1148	0.5959	0.1927
2.6	1.0485	0.3815	0.3068	0.1170	0.5815	0.2013
2.8	1.0868	0.3680	0.3258	0.1199	0.5680	0.2111
3.0	1.1251	0.3555	0.3470	0.1234	0.5555	0.2221
3.2	1.1634	0.3438	0.3705	0.1274	0.5438	0.2343
3.4	1.2017	0.3329	0.3963	0.1319	0.5329	0.2476
3.6	1.2399	0.3226	0.4243	0.1369	0.5226	0.2619
3.8	1.2782	0.3129	0.4546	0.1423	0.5129	0.2774
4.0	1.3165	0.3038	0.4872	0.1480	0.5038	0.2938
4.2	1.3548	0.2953	0.5220	0.1541	0.4953	0.3112
4.4	1.3931	0.2871	0.5591	0.1605	0.4871	0.3296
4.6	1.4313	0.2795	0.5985	0.1673	0.4795	0.3488
4.8	1.4696	0.2722	0.6401	0.1742	0.4722	0.3690
5.0	1.5079	0.2653	0.6840	0.1814	0.4653	0.3900
5.2	1.5462	0.2587	0.7302	0.1889	0.4587	0.4118
5.4	1.5845	0.2525	0.7786	0.1966	0.4525	0.4344
5.6	1.6227	0.2465	0.8292	0.2044	0.4465	0.4578
5.8	1.6610	0.2408	0.8822	0.2124	0.4408	0.4819
6.0	1.6993	0.2354	0.9374	0.2207	0.4354	0.5068
6.2	1.7376	0.2302	0.9949	0.2290	0.4302	0.5324

หมายเหตุ : อัตราการไหลจากระบบ = $0.1914x + 0.5509$ (kg/min)

เวลาใส่จากระบบ = $0.4 \times$ อัตราการไหลจากระบบ (kg/min)

อัตราการไหลลม = $0.0283x^2 - 0.0579x + 0.266$

ปริมาณลมที่ใช้ = อัตราการไหลลม \times เวลาใส่จากระบบ

เวลาที่ใช้ต่อหลอด = เวลาใส่จากระบบ + เวลาที่จากระบบหยุดจ่ายต่อ + เวลาที่จากระบบหยุด

จ่ายต่อหลอด = 12 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลจริง = ปริมาณที่ใช้ / เวลาที่ใช้ต่อหลอด

และนำตารางที่ 4.4 มาแปลงหน่วยให้อยู่ในรูปที่ใช้งานง่ายดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงอัตราการไหลจริงที่ความดันต่างๆและเวลาที่ผลิตได้ต่อหลอด

ลำดับ	ความดันที่ใช้(bar)	อัตราการไหลจริง(Sm ³ /min)	เวลาที่ใช้ต่อหลอด(s)
1	2.0	179.57	37.704
2	2.2	185.46	36.692
3	2.4	192.71	35.756
4	2.6	201.26	34.889
5	2.8	211.06	34.083
6	3.0	222.07	33.331
7	3.2	234.25	32.630
8	3.4	247.55	31.972
9	3.6	261.94	31.356
10	3.8	277.37	30.776
11	4.0	293.80	30.230
12	4.2	311.22	29.715
13	4.4	329.57	29.228
14	4.6	348.84	28.768
15	4.8	368.98	28.331
16	5.0	389.98	27.916
17	5.2	411.80	27.522
18	5.4	434.41	27.147
19	5.6	457.80	26.790
20	5.8	481.94	26.449
21	6.0	506.80	26.123
22	6.2	532.36	25.812

ผู้ใช้งานสามารถเลือกเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อ 1 หลอดได้จากตารางที่ 4.5 โดยความดันที่เหมาะสมกับการใช้งานจะอยู่ที่ 3 bar ถึง 6 bar(เนื่องจากเป็นความดันที่ต้องการให้ระบบจ่ายจาระบีทำงานได้อย่างสมบูรณ์และประหยัดลมมากที่สุด)โดยช่วงของความสามารถในการผลิตลมของปั๊มลมที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้กับเครื่องได้ เป็นไปตามการคำนวณดังนี้

เครื่องบรรจุกระป๋องแบบหลอดนี้ต้องการอัตราการจ่ายลมจริงระหว่าง 221.06 - 506.80 L/min และเมื่อคำนวณรวมเวลาในการพัก 30% จะได้ปริมาณที่มีคุณสมบัติดังนี้

$$221.06/0.7 = 315.8 \text{ L/min}$$

$$506.8/0.7 = 724 \text{ L/min}$$

ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมควรมีอัตราการจ่ายลมอยู่ระหว่าง 315.8 - 724 L/min

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ผู้ใช้งานไม่ควรให้อัตราการไหลสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้สิ้นเปลืองลมและควรจะให้ความดันขั้นต่ำที่ใช้งานเป็น 3 บาร์ เพื่อให้ระบบบริการจ่ายกระป๋องทำงานได้อย่างสมบูรณ์ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณ Puma PP-32 ที่มีอัตราการผลิตลม 330 L/min

4.2.3 การคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของจุดทำงานจากการทดลองเทียบกับทฤษฎี

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเทียบกับการคำนวณจากการคำนวณในบทที่ 3 ที่ลมอัด 4 บาร์ ซึ่งค่าจากการทดลองเท่ากับ

- อัตราการไหลเชิงมวล 1000 g/min
- ปริมาณลมอัดที่ต้องการ 0.26 Sm³/min

และ ค่าจากการทดลองเท่ากับ

- อัตราการไหลเชิงมวล 1316.5 g/min
- ปริมาณลมอัดที่ต้องการ 0.498 Sm³/min

1.) คำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลจากระป๋อง

$$Error = \left| \frac{1.3165 - 1}{1} \right| \times 100\% \\ = 31.65\%$$

2.) คำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหล

$$Error = \left| \frac{0.4982 - 0.26}{0.26} \right| \times 100\% \\ = 91.62\%$$

จะเห็นได้ว่าทั้งอัตราการไหลจากระป๋องและอัตราการไหลมีสูงกว่าจุดทำงานที่คำนวณตามทฤษฎีอยู่ 31.65 และ 91.62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับซึ่งถือว่าสูงมาก อาจเป็นเพราะข้อมูลจากรายการสินค้าของปั๊มจากระป๋องที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลนั้นผิดพลาด ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าจากตารางที่ทดลองเพื่อทำการเลือกซื้อปั๊ม

จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ความดัน 4 บาร์ นั้นไม่สามารถใช้กับปั๊ม Puma PP-32 ได้แล้วเนื่องจากอัตราการไหลสูงเกินความสามารถของปั๊มจากระป๋อง จึงทำการลดความดันไปที่ความดันขั้นต่ำ 3 บาร์ เพื่อให้สามารถใช้กับปั๊มที่มีอยู่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การใช้พลังงานจริงของเครื่องบรรจุกระป๋อง

จากการนำ AC clamp meter คล้องสายไฟเพื่อหากระแสที่ไหลผ่านไปยังมอเตอร์ดังรูปที่ 4.12 ได้ค่า

กระแสไฟฟ้าจริงที่ประมาณ 10.8 A ที่ไฟบ้าน 220 V



รูปที่ 4.12 แสดงการวัดกระแสที่ไหลผ่านจาก AC clamp meter

1.) พลังงานของปั๊มลมที่ได้จากการทดลอง

ใช้สมการกำลังไฟฟ้า $P = VI$ จะได้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ $220 \times 10.8 = 2.376 \text{ kW}$

และจากตารางที่ 4.3 ที่ความดัน 3 bar ใช้อัตราการไหลของลมอัดจริงอยู่ที่ 222.073 L/min ซึ่งปั๊มลมสามารถทำงานได้ 330 ลิตรต่อนาที ดังนั้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการทำงานของปั๊มได้เป็น

$$\begin{aligned}\frac{W_{actual}}{W_{pump}} &= \frac{222.073}{330} \\ &= 0.673 \\ &= 67.3\%\end{aligned}$$

จะได้พลังงานที่ใช้ของปั๊มลมมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}W_{pump} &= (2.376 \text{ kW}) \times (1 \text{ hr})(0.673) \\ &= 1.60 \text{ kW/hr}\end{aligned}$$

และเนื่องจากใช้เวลา 33.33 sec/cartridge จะสามารถผลิตได้ 108 cartridge/hr

ดังนั้นกำลังที่ใช้ของปั๊มลมมีค่าเท่ากับ 0.0148 kWh/cartridge

จากบทที่ 3 พลังงานที่จ่ายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบบริการจ่ายกระป๋อง นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ปั๊มลมใช้และจากการวัดกระแสนั้นกระแสมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณ (เนื่องจากมอเตอร์ในระบบบริการจ่ายกระป๋องนั้นไม่ได้ใช้กำลังเต็มที่) ดังนั้นจึงประมาณให้พลังงานเท่ากับที่คำนวณทางทฤษฎี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.111 Wh/cartridge

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด} &= \text{พลังงานที่ใช้ของปั๊มลม} + \text{พลังงานที่ใช้ของเครื่องบรรจุจาระบี} \\
 &= 0.0148 + 0.111 \times 10^{-3} \\
 &= 0.0149 \text{ kWh/cartridge}
 \end{aligned}$$

2.) ความสามารถในการบรรจุใน 1 ชม.

จากตารางที่ 4.5 เวลาในการบรรจุจาระบี 1 หลอดใช้เวลา 33.3 วินาที ดังนั้นใน 1 ชั่วโมงจะผลิตได้ทั้งหมด 108 หลอด โดยอัตราการผลิต

$$\begin{aligned}
 &= (0.4 \text{ kg/unit}) \times (108 \text{ unit/hr}) \\
 &= 43.2 \text{ kg/hr}
 \end{aligned}$$

และจากพลังงานที่ใช้ต่อ 1 หลอด 0.0112 kWh/cartridge จะได้

1.) พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ต่อ 1 hr

$$\begin{aligned}
 W_{\text{average}} &= 0.0149 \text{ kWh/unit} \times 108 \text{ unit/hr} \\
 &= 1.61 \text{ kWh/hr}
 \end{aligned}$$

2.) คิดเป็นน้ำหนัก

$$\begin{aligned}
 W &= 0.0149 \text{ kWh/unit} \times \frac{1}{0.4} \text{ unit/kg} \\
 &= 0.037 \text{ kWh/kg}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบค่าระหว่างการค้าจำนวนและการทดลอง

ตัวแปร	การค้าจำนวน	การทดลอง
ความดันใช้งาน (bar)	4.00	3.00
อัตราการไหลจาระบี (g/min)	1000	1125
อัตราการไหลลมอัดขณะใส่จาระบี 3 bar (L/min)	-	340
อัตราการไหลลมอัดเฉลี่ยที่ใช้งาน 3 bar (L/min)	-	222
อัตราการไหลลมอัดขณะใส่จาระบี 4 bar (L/min)	260	498
เวลาที่ใส่จาระบีเสร็จ (s)	24.00	21.33
เวลาในการผลิตต่อหลอด (s)	36.00	33.33
การบริโภคพลังงาน (kWh/unit)	0.0112	0.0149

4.2.5 ผลการทดลองความคลาดเคลื่อนน้ำหนักจารบีที่ป้อนลงหลอด

จากการทดลองป้อนจารบีลงหลอด 20 หลอด ซึ่งน้ำหนักที่ต้องการคือ 400 g/cartridge โดยใช้หลักการจับเวลาเทียบกับอัตราไหล และทำการคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจากสมการด้านล่าง

$$Relative\ Error = \left| \frac{X_{mean} - X_t}{X_t} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ 4.7 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการชั่งน้ำหนักที่ได้จากการทดลอง 20 หลอด

หลอดที่	น้ำหนักจารบีที่ชั่งได้ (g)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	380	5.00
2	385	3.75
3	395	1.25
4	400	0.00
5	410	2.50
6	400	0.00
7	400	0.00
8	405	1.25
9	400	0.00
10	390	2.50
11	400	0.00
12	395	1.25
13	405	1.25
14	410	2.50
15	405	1.25
16	395	1.25
17	400	0.00
18	405	1.25
19	390	2.50
20	410	2.50

จากการทดลองพบว่าน้ำหนักที่ชั่งได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 % โดยหลอดแรกๆจะมีจาระบีค้างในท่อเพียงเล็กน้อยทำให้จาระบีขาดไปเล็กน้อย เมื่อใช้ป้อนหลอดถัดไปความคลาดเคลื่อนจะน้อยลงไปเหลือ 0 ถึง 3.75 % โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.32%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปงานวิจัย

งานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้เป็นการออกแบบเครื่องบรรจุงาษาพีหลอดแบบอัตโนมัติเพื่อให้มีองค์ประกอบที่เหมาะสมแก่การใช้งานโดยหลังจากการสร้างเครื่องที่ใช้งานได้จริง

การออกแบบเครื่องบรรจุงาษาพีหลอดแบบอัตโนมัติจำเป็นต้องออกแบบในส่วนระบบสูบจ่ายจาษาพี โดยได้เริ่มต้นจากการออกแบบระบบท่อโดยกำหนดขนาดท่อและความยาวที่เหมาะสมกับการใช้งาน พร้อมกับสร้างสมการ กราฟเฮดของระบบ(System Head Curve) ในรูปของความดันและอัตราการไหล เมื่อนำไปกราฟไปเทียบกับจุดทำงานของปั้มจาษาพีที่ใช้ความดันลมที่ 4 บาร์ จะได้จุดทำงานที่อัตราการไหลจาษาพี 1,000 กรัมต่อนาที และเติมจาษาพีให้เต็มหลอดได้ภายใน 24 วินาที ด้วยอัตราการไหลของลม 0.179 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และเนื่องมีการสูญเสียจากการไหลในท่อลม จึงต้องหาความดันที่ FRL เพื่อชดเชยการสูญเสียนี้ โดยที่ปั้มจาษาพีต้องทำงานที่ 4 บาร์เหมือนเดิม ซึ่งหาได้จากความดันที่สูญเสียในระบบท่อและวาล์วโซลินอยด์ จากการคำนวณได้ความดันที่ FRL อยู่ที่ 4.14 บาร์ และความดันในแต่ละกระบอกสูบใกล้เคียงกับความดันที่ FRL เนื่องจากความดันสูญเสียในระบบท่อน้อยมาก

เมื่อออกแบบและคำนวณระบบสูบจ่ายจาษาพีเสร็จแล้ว ผู้จัดทำต้องการให้เครื่องอัดจาษาพีแบบหลอดนี้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติและครบวงจรภายในเครื่องเดียว จึงออกแบบระบบลำเลียงหลอดจาษาพีที่มีขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ

1. ลำเลียงหลอดเข้าสู่การทำงานของเครื่อง (Station 1)
2. บรรจุงาษาพีเข้าหลอด (Station 2)
3. ลำเลียงฝาและวางฝา (Station 3)
4. ปิดฝาหลอดให้สนิท (Station 4)

จากการคำนวณกระบวนการบรรจุงาษาพีเข้าหลอด 1 หลอด นี้ใช้เวลา 36 วินาที ซึ่งระบบดังกล่าวจะใช้ระบบนิวแมติกและระบบไฟฟ้าในการทำงานและทำการออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยใช้โปรแกรม Arduino ซึ่งไปควบคุมโซลินอยด์ผ่านรีเลย์ที่ส่งลมไปยังกระบอกสูบแต่ละตัว และมอเตอร์ขับเคลื่อน(Motor driver) ที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปยังมอเตอร์แต่ละตัวอีกเช่นกัน

หลังจากการประกอบเครื่องเสร็จแล้วจึงได้ทำการทดสอบโดยระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ แต่ระบบสูบจ่ายจาษาพีนั้นหลังจากการทดลองและคำนวณ ที่ความดัน 4 บาร์ พบว่าอัตราการไหลของลม 0.294 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ซึ่งสูงกว่าที่คำนวณไว้มากทำให้ปั้มลมที่เลือกไว้ไม่สามารถใช้งานได้ จึงทำการลดความดันให้เหลือ 3 บาร์ ซึ่งอัตราการไหลของจาษาพี (Station 2) อยู่ที่ 1125 กรัมต่อนาที ซึ่งสามารถเติมจาษาพีให้เต็มหลอดได้ภายใน 21.33 วินาที โดย

ใช้อัตราการไหลของลม 222 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลของลมที่เหมาะสมกับปั๊มลมซึ่ง กระบวนการบรรจุเข้าสู่หลอด 1 หลอดจะใช้เวลาจริงอยู่ที่ 33.33 วินาที ซึ่งจากการทดลองการซัง น้ำหนักก่อนหลังบรรจุจะพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของน้ำหนักเท่ากับ 1.32%

เมื่อคำนวณต้นทุนของเครื่องหลังจากการสร้างจะอยู่ที่ประมาณ 70,000 บาท ซึ่งเมื่อผู้ใช้งาน ใช้งานในปริมาณมาก ต้นทุนต่อหลอดก็จะลดลง แต่ถ้าในมุมมองของผู้ใช้งานจะประสบความสำเร็จรูป อยู่แล้ว ถ้าเปลี่ยนมาใช้เครื่องบรรจุจะพบ ต้นทุนของจะพบต่อหลอดจะลดลงได้มาก โดยจุดคุ้มทุน จะอยู่ที่ 437 หลอด ซึ่งหมายถึงคุ้มทุนตั้งแต่จะบรรจุถึงแรกที่ใช้ เมื่อเทียบกับการใช้มือบรรจุแบบ ดั้งเดิม เครื่องบรรจุจะพบหลอดนี้สามารถบรรจุได้เสร็จภายใน 33.33 วินาที หรือ 108 หลอดต่อ ชั่วโมงซึ่งมากกว่าวัสดุประสงค์ที่ตั้งไว้แต่แรกและมากกว่าบรรจุด้วยมือที่ใช้เวลาถึง 2 นาทีต่อหลอด พร้อมทั้งยังได้ความสะดวกสบายในการใช้งานและได้ความสะดวกในการบรรจุที่เพิ่มขึ้น

5.2 การเปรียบเทียบการบรรจุจะพบแบบดั้งเดิม แบบสำเร็จรูป และการใช้ เครื่องบรรจุจะพบแบบหลอด

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบการบรรจุจะพบแบบดั้งเดิม แบบสำเร็จรูป และการใช้เครื่องบรรจุ จะพบแบบหลอด

ข้อมูล	การบรรจุจะพบแบบใช้ มือ	การบรรจุจะพบแบบ ใช้เครื่อง	การใช้จะพบหลอด สำเร็จรูป
ราคาต่อหลอดเมื่อนำหลอดมาใช้ซ้ำ (บาท/หลอด)	44.44	44.44	-
ราคาต่อหลอดเมื่อใช้หลอดแล้วทิ้ง (บาท/หลอด)	-	59.56	220
ความสะดวกสบายในการใช้งาน	น้อย	ปานกลาง	มาก
ความเร็วในการบรรจุจะพบ	2 นาทีต่อหลอด	33.33 นาทีต่อหลอด	พร้อมใช้ทันที

ข้อเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่ได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นกับวิธีอื่น

1. ต้นทุนของจะพบจากการใช้เครื่อง

การบรรจุจะพบแบบใช้มือนั้นเมื่อซื้อจะพบขนาด 180 kg ที่ราคาจำหน่ายอยู่ที่ 20,000 บาท มาบรรจุขนาด 400 กรัม ในกระบอกอัดจะพบ ราคาต่อหลอดจะอยู่ที่ 44.44 บาทต่อหลอด ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าใช้หลอดสำเร็จรูปราคาต่อหลอด 400 กรัม ที่ขายตามท้องตลาด จะอยู่ที่ 220 บาท โดยเครื่องบรรจุจาระบีนั้นจะบรรจุจาระบีจากถัง 180 กิโลกรัม ลงหลอด 400 กรัม ซึ่งจะทำให้ต้นทุนต่อหลอดยังเท่าเดิม (เมื่อคิดแค่ต้นทุนของจาระบี)

เมื่อนำเรื่องของต้นทุนเครื่องมามีค่านวนด้วย ในมุมมองของผู้ที่ใช้งานโดยใช้มือบรรจุ แน่ใจว่ายังงต้นทุนของจาระบีต่อ 1 หลอดก็เพิ่มขึ้น โดยถ้ายังใช้ในปริมาณมาก ต้นทุนต่อหลอดก็จะน้อยลง และในมุมมองของผู้ที่ใช้งานจาระบีหลอดสำเร็จรูปอยู่แล้ว ถ้าเปลี่ยนมาใช้เครื่องนี้ ต้นทุนของจาระบีต่อหลอดจะลดลงได้มาก โดยจุดคุ้มทุนจะอยู่ที่ 437 หลอด

2. เพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งาน

แน่นอนว่าการบรรจุจาระบีด้วยมือนั้นไม่สะดวกสบาย เพราะต้องเปื้อนมือผู้ทำงานอีกทั้งยังปนเปื้อนไปกับจาระบีซึ่งทำให้จาระบีไม่สะอาด ลูกปืนหรือจุดหล่อลื่นติดขัด อายุการใช้งานสั้น เครื่องบรรจุจาระบีจะสามารถช่วยผู้ใช้งานให้สะดวกสบายขึ้นได้ ไม่ต้องบรรจุเอง ไม่สกปรกทั้งมือและจาระบีที่บรรจุอีกด้วย

3. ความรวดเร็วในการบรรจุจาระบีหลอด

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า เครื่องบรรจุจาระบีสามารถลดเวลาการบรรจุได้ พอสมควร ซึ่งเครื่องบรรจุจาระบีแบบหลอดนี้จะนำข้อดีของการบรรจุจาระบีแบบดั้งเดิมและแบบใช้จาระบีหลอดสำเร็จรูปมารวมกันในเครื่องเดียว โดยที่ต้นทุนต่อหลอดไม่เพิ่มมากนัก และจำนวนหลอดที่จะคุ้มทุนเมื่อเทียบกับการใช้จาระบีหลอดแบบสำเร็จรูปเพียงแค่ 437 หลอด ซึ่งหมายถึงคุ้มทุนตั้งแต่จาระบีถังแรก

5.3 ปัญหาที่พบในการทดลอง

- เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของคุณสมบัติของปัมจาระบีที่ไม่ตรงตามข้อมูลจากหนังสือรายการสินค้า ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของจุดทำงานของปัมจาระบี (อัตราการไหลจาระบี และ อัตราการไหลลม)
- วัสดุที่ใช้ทำเครื่องสามารถบิดตัวเมื่อเจอแรงกระทำ และจุดยึดที่ไม่แน่นเพียงพอ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานบางจังหวะ
- เนื่องจากเครื่องบรรจุจาระบีแบบหลอดนี้ ผู้จัดทำเป็นผู้สร้างเองขึ้นทั้งหมด ความชำนาญในการสร้างมีน้อย ทำให้เกิดผิดพลาดในการทำงานบางช่วงได้เช่นกัน
- เนื่องจาก IR Sensor module จะไม่สามารถใช้งานกลางแจ้งได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้สถานที่ตั้งอุปกรณ์ที่ต้องอยู่ภายในอาคาร
- ความแม่นยำในการบรรจุที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากวิธีการกำหนดปริมาณคือเวลาในการทำงานของปัมจาระบี

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. ทำการเปลี่ยนวัสดุในการสร้างโครงสร้างและเปลี่ยนวิธีการยึดด้วย bolt & nut เป็นวิธีการเชื่อมแทน
2. มอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนเปลี่ยนขั้นตอนการทำงาน(station) หมุนจ่ายฝาหลอด และหมุนจ่ายหลอดจาระบี ใช้เป็น stepping motor เพื่อความแม่นยำในการทำงาน
3. ความแม่นยำในการบรรจุสามารถลงทุนเพิ่มในการซื้อตัววัดปริมาณจาระบีที่ไหลผ่านท่อแทนการกำหนดปริมาณด้วยเวลาซึ่งจะทำให้ได้ความแม่นยำสูงที่สุด
4. อุปกรณ์ควบคุมระบบอัตโนมัติถ้าผู้ใช้งานต้องการความเสถียรในการทำงานเพิ่มมากขึ้นสามารถเปลี่ยนจาก Arduino เป็น PLC ได้ (ต้องทำการเปลี่ยนโซลินอยด์ให้เป็น 24V ด้วย เพื่อใช้งานกับระบบ PLC)



บรรณานุกรม

- [1] Airtac (2017). Airtac Product catalog for Solenoid and FRL , Singapore ; Airtac
- [2] Anthony Esposito (2014). *Fluid Power with Application*, 7th edition, London : Pearson Education Limited.
- [3] Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebgsch, Alric P. Rothmayer (2013). *Fluid Mechanics*, 7th edition, Singapore : John Wiley & Sons
- [4] ECODORA (2014). CATALOGUE Technology For Fluid Dynamics : NO E14/LG, Italy : Ecodora s.r.l
- [5] Maciej Paszkowski (2013), Some Expect of Grease Flow in Lubrication systems and Friction Nodes, *Licensee InTech*, vol. 3, May 2013, pp. 77-106
- [6] Puma (2017). Puma product for Puma air compressor Thailand ; PumaThailand
- [7] Young C. and Eunsoo C. (1993), The Rheology and Hydrodynamic Analysis of Greases flow in a Circular Pipe, *Tribology Transactions*, vol. 36, October 1993, pp. 545-554.
- [8] จุฬารีย์ ถมยา (2548). นิวแมติกส์และนิวแมติกส์ไฟฟ้าเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 5, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [9] วิบูลย์ บุญยจรโรกุล. (1986). ป้อน้ำและระบบสูบน้ำ, กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [10] สุรพล ราชภูริ์นัย (2549). วิศวกรรมการหล่อลื่นเบื้องต้น, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [11] สามารถ มูลอามาตย์ (2541). ของไหลนอนนิวโตเนียน, *วิศวกรรมสาร ม.ช.*, มกราคม - มิถุนายน 2541, หน้า 33-46.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาความหนาแน่นของจาระบี

หาความหนาแน่นจาระบีจากการชั่งน้ำหนักโดยใช้ตาชั่งหน่วยกรัมในการวัด ในการชั่งน้ำหนักครั้งจะมีน้ำหนักของภาชนะรวมเข้ามาด้วยและไม่สามารถหาปริมาตรที่แน่นอนของปริมาณของไหลในภาชนะได้ จึงต้องนำมาชั่งน้ำหนักครั้ง โดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 1ก น้ำหนักของภาชนะเปล่าจากตาชั่ง

รูปที่ 2ก น้ำหนักของน้ำรวมกับภาชนะบรรจุที่ชั่งด้วยตาชั่ง

รูปที่ 3ก น้ำหนักจาระบีรวมกับภาชนะบรรจุที่ชั่งด้วยตาชั่ง

1. หาน้ำหนักของภาชนะ - ชั่งภาชนะเปล่าบนตาชั่งดังรูปที่ 1ก ได้น้ำหนักภาชนะเปล่าที่อ่านได้คือ 10 กรัม
2. หาน้ำหนักของน้ำ - นำหนักที่ชั่งได้จากรูปที่ 2ก มาลบกับน้ำหนักภาชนะเปล่า ได้น้ำหนักน้ำ (m_{water}) เท่ากับ 315 กรัม
3. หาน้ำหนักของจาระบี - นำหนักที่ชั่งได้จากรูปที่ 3ก มาลบกับน้ำหนักภาชนะเปล่า ได้น้ำหนักจาระบี (m_{grease}) เท่ากับ 285 กรัม
4. คำนวณหาความหนาแน่นจาระบี

เนื่องจากตัวแปรควบคุมของน้ำกับจาระบีที่เท่ากันคือปริมาตร จึงสามารถหาความหนาแน่นจาระบีได้

จากสูตร $\rho = \frac{m}{V}$ โดยเทียบ V เท่ากันได้ ดังสมการ

$$V = \frac{m_{\text{grease}}}{\rho_{\text{grease}}} = \frac{m_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}}}$$
$$\frac{285}{\rho_{\text{grease}}} = \frac{315}{1000}$$
$$\rho_{\text{grease}} = 904.8$$

คำนวณหา ρ_{grease} จาก

ดังนั้น จาระบีมีความหนาแน่นเท่ากับ 904.8 กิโลกรัม/เมตร³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การหาจุดคุ้มทุนของเครื่อง

ตารางที่ 1ข รายการวัสดุดิบที่ใช้ในการสร้างเครื่องบรรจุกระดาษปีกลตลอดทั้งหมด

	รายการ	ราคาต่อหน่วย	จำนวน	หน่วย	ราคา	
1	เครื่องอัดลมยี่ห้อ Puma รุ่น PP-32 พร้อมมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า	26000	1	ตัว	26000	100000 Hr
2	ปั๊มจาระบียี่ห้อ ECODORA รุ่น ซีรี่ 600 รหัส 62095	20000	1	ตัว	20000	100000 Hr
3	สายไฮดรอลิกพร้อมเข้าหัว ขนาด 3/8 นิ้ว ความยาว 2 เมตร	650	1	เส้น	650	lifetime
4	เกจวัดความดัน 100 Bar	450	1	ตัว	450	lifetime
5	ข้อต่อทองเหลือง 3 ทาง ขนาด 3/8 นิ้ว	120	1	ชิ้น	120	lifetime
6	เทปพันเกลียว	25	2	ม้วน	50	lifetime
7	ข้อต่อทองเหลืองขนาด 3/8" - 1/2"	80	1	ชิ้น	80	lifetime
8	ข้อต่อลด PVC 1" เกลียวทองเหลือง 1/2"	45	1	ชิ้น	45	lifetime
9	ข้อต่อลด PVC 1" - 1 1/2"	30	1	ชิ้น	30	lifetime
10	ท่อ PVC 1 1/2" ขนาด 8 cm	30	1	ชิ้น	30	lifetime
11	ท่อ PVC 1 1/2" ขนาด 30 cm	40	1	ชิ้น	40	lifetime
12	ตัวยึดท่อ PVC ขนาด 1 1/2"	25	1	ชิ้น	25	lifetime
13	ตัวยึดท่อ PVC ขนาด 2"	30	1	ชิ้น	30	lifetime
14	เหล็กฉากเจาะรูด้านไม่เท่า 2 มิลลิเมตร 3 เมตร/เส้น	245	6	เส้น	1470	lifetime
15	ชุดน็อตตัวผู้ ตัวเมีย	50	3	ชุด	150	lifetime
16	แผ่นปะกับ เข้ามุมเหล็กฉาก	17	1	ชุด	17	lifetime
17	กระบอกสูบ MAL 16X300	390	1	ตัว	390	100000 ครั้ง
18	ที่ยึดกระบอกสูบ MAL 16X300	90	1	ชุด	90	lifetime
19	กระบอกสูบ MAL 16X50	300	1	ตัว	300	100000 ครั้ง
20	ที่ยึดกระบอกสูบ MAL 16X50	90	1	ชุด	90	lifetime

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21	กระบอกลูกสูบ AIRAURRI CDJ2B Bore 10 mm Stroke 100 mm	150	1	ตัว	150	100000 ครั้ง
22	ที่ยึดกระบอกลูกสูบ CDJ2B	50	1	ชุด	50	lifetime
23	Pneumatic Fitting ปรับอัตราการไหล ของลม เกลียว m5	100	6	ตัว	600	lifetime
24	สายลม 8x12 mm	45	10	เมตร	450	lifetime
25	สายลม 4x6 mm	35	12	เมตร	420	lifetime
26	Airtac Solenoid valve 4V-210	600	3	ตัว	1800	100000 ครั้ง
27	Airtac Solenoid valve 3V-220	850	1	ตัว	850	100000 ครั้ง
28	Airtac FRL BC2000	1200	1	ตัว	1200	100000 Hr
29	Pneumatic Fitting OD 12 mm เกลียว 1/4	60	25	ตัว	1500	lifetime
30	Arduino Mega 2560	350	1	ตัว	350	lifetime
31	Relay 4 ช่อง	95	1	ตัว	95	100000 Hr
32	เซนเซอร์จับวัตถุ	30	12	ตัว	360	lifetime
33	Switching แหล่งจ่ายไฟ DC 12 V 15A	220	1	ตัว	220	100000 Hr
34	Switching แหล่งจ่ายไฟ DC 5 V 10A	100	1	ตัว	100	100000 Hr
35	สายไฟสำหรับชุดระบบจ่ายจากระบบ	250	1	ม้วน	250	lifetime
36	สายไฟสำหรับป้อนลม ขนาด 3X2.5	55	10	เมตร	550	lifetime
37	Panasonic สะพานไฟ 20 A	85	1	ตัว	85	lifetime
38	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 12 RPM ขนาดใหญ่	700	1	ตัว	700	lifetime
39	ที่ยึดมอเตอร์เกียร์ตัวหนอนขนาดใหญ่	90	1	ตัว	90	lifetime
40	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 20 RPM ขนาดเล็ก	350	1	ตัว	350	lifetime
41	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 40 RPM ขนาดเล็ก	350	1	ตัว	350	lifetime
42	ที่ยึดมอเตอร์เกียร์ตัวหนอนขนาดเล็ก	65	2	ตัว	130	lifetime
43	Motor Driver	60	3	ชิ้น	180	lifetime
44	Encoder 600	300	1	ตัว	300	lifetime

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45	ที่ยึด Encoder	65	1	ชิ้น	65	lifetime
46	Encoder ขนาดเล็ก แกนเพลลา 6 mm	45	2	ตัว	90	lifetime
47	เพลลาสแตนเลส 8 mm 200mm/เส้น	130	1	เส้น	130	lifetime
48	เพลลาสแตนเลส 10 mm 100mm/เส้น	130	1	เส้น	130	lifetime
49	Flange coupling ขนาดเพลลา 6 mm	36	4	ชิ้น	144	lifetime
50	Flange coupling ขนาดเพลลา 8 mm	45	2	ชิ้น	90	lifetime
51	Flange coupling ขนาดเพลลา 10 mm	50	2	ชิ้น	100	lifetime
52	ยอย 6-8 mm	80	1	ชิ้น	80	lifetime
53	ยอย 8-8 mm	100	1	ชิ้น	100	lifetime
54	ยอย 8-10 mm	90	3	ชิ้น	270	lifetime
55	ยอย 10-10 mm	100	1	ชิ้น	100	lifetime
56	Timing Pulley 20T รูแกนเพลลา 6.35 mm	25	1	ชิ้น	25	lifetime
57	Timing Pulley 20T รูแกนเพลลา 8 mm	25	1	ชิ้น	25	lifetime
58	ลูกปืนตลับลูกปืนทรงเกือกม้ามีรูที่ล็อค แกนเพลลา 8 mm	120	2	ชิ้น	240	lifetime
59	พลาสติก PLA	480	1	กิโลกรัม	480	lifetime

เนื่องจากให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนสำหรับจาระบีหลอดสำเร็จรูป จึงคำนวณความคุ้มค่าต่อหลอดโดยการคำนวณจุดคุ้มทุนต่อจาระบี 1 ถึงประกอบด้วย ต้นทุนต่อหลอด ต้นทุนตั้งต้นโดยประมาณ ราคาขาย แยกการคำนวณได้ดังนี้

1. ต้นทุนต่อหลอดประกอบด้วย ค่าไฟ ค่าเสื่อมของเครื่อง หลอดเปล่า ค่าจาระบีต่อหลอด

1.1. ค่าจาระบีต่อหลอด

จาระบี 1 ถึงราคา 20,000 บาท ได้จาระบีหนัก 180,000 กรัม จาระบี 1 หลอดหนัก 400 กรัม เมื่อทำการเทียบบัญชีได้ตรงแล้วจะได้ว่าค่าจาระบีต่อหลอดคือ 44.44 บาทต่อหลอด

1.2. ค่าเสื่อมราคาต่อหลอด

จากการตรวจสอบจากการรายการวัตถุดิบที่ใช้แบ่งอายุการใช้งานได้ 3 แบบคือ

1.2.1. อุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพที่อายุการใช้งาน 100,000 ชั่วโมง หรือ 360,000,000 วินาที

มูลค่ารวม 1,615 บาท คิดมูลค่าความเสื่อมเป็นต้นทุนเพิ่มได้ 1.615×10^{-4} บาท/หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2. อุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพที่อายุการใช้งาน 100,000 ครั้ง มูลค่ารวม 3,490 บาท คิดมูลค่าความเสื่อมเป็นต้นทุนเพิ่มได้ 0.0349 บาท/หลอด

1.2.3. อุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพที่อายุการใช้งาน 10,000 ชั่วโมง หรือ 36,000,000 วินาที มูลค่ารวม 46,000 บาท คิดมูลค่าความเสื่อมเป็นต้นทุนเพิ่มได้ 0.046 บาท/หลอด

เพราะฉะนั้นรวมแล้วค่าเสื่อมต่อหลอดคือ $0.0001615 + 0.046 + 0.0349 = 0.081$ บาท/หลอด

1.3. ค่าหลอดเปล่า

หลอดเปล่าที่หาได้จากตามตลาดมีราคา 15 บาทต่อหลอด

1.4. ค่าไฟต่อหลอด

จากการคำนวณค่าไฟต่อหลอดในบทที่ 4 ได้ 0.01491 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/หลอด และจากที่ทราบค่าไฟทั่วไปราคา 2.349 บาทสำหรับการใช้ไฟไม่เกิน 15 หน่วย (ทางผู้จัดทำใช้ค่าไฟต่อจากระยะปี 1 ถึง) จะได้ 0.035 บาทต่อหลอด

ดังนั้นต้นทุนรวมต่อหลอดจะเท่ากับ $44.44 + 0.081 + 15 + 0.035 = 59.56$ บาท/หลอด

2 ต้นทุนตั้งต้นโดยประมาณ

ต้นทุนตั้งต้นคำนวณจากราคาอุปกรณ์การสร้างเครื่องหมดได้ประมาณ 70,000 บาท

3. ราคาขายต่อหลอด

ราคาขายต่อหลอดอ้างอิงจากราคาจากระยะปีหลอดนำเข้าที่หาได้ตามท้องตลาดราคา 220 บาท

เพราะฉะนั้นจากสมการการหาจุดคุ้มทุนกล่าวคือ

$$\begin{aligned} \text{จุดคุ้มทุน} &= \frac{\text{ค่าใช้จ่ายคงที่}}{\text{ราคาต่อหน่วย} - \text{ค่าใช้จ่ายผันแปรต่อหน่วย}} \\ &= \frac{70,000}{200 - 59.56} \\ &= 436.3 \end{aligned}$$

ดังนั้น จุดคุ้มทุนของเครื่องนี้คือ 436 หลอด

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการเตรียมการใช้งานเครื่อง

ต่อไปจะเป็นการแสดงขั้นตอนการเตรียมการใช้งานเครื่องบรรจุจาระบีหลอดแบบอัตโนมัติ ซึ่งหลังจากการประกอบอุปกรณ์แล้วจะได้ ดังรูปที่ 3.8

1) การประกอบส่วนจาระบี

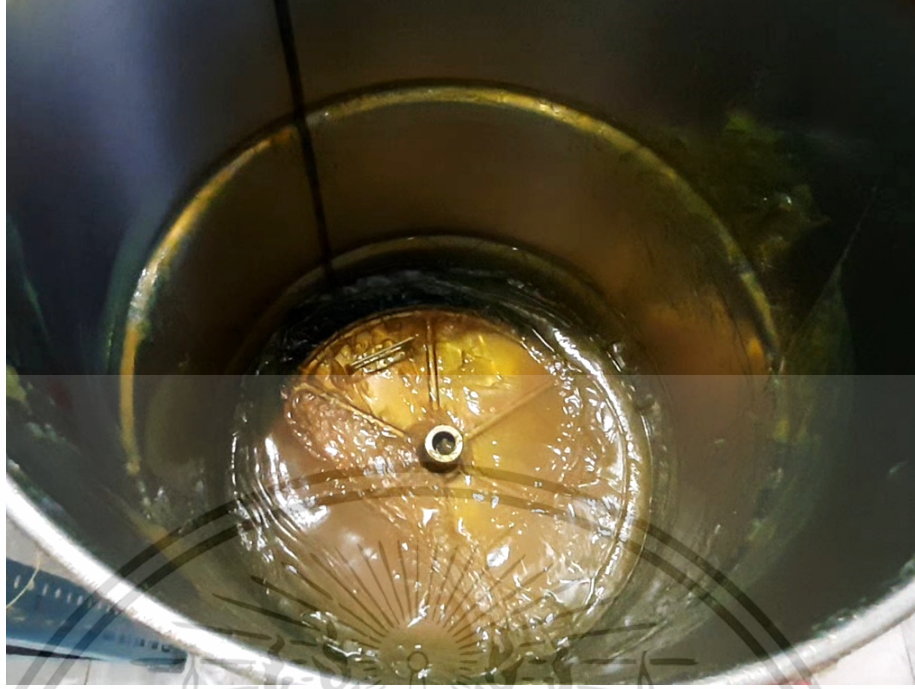
ส่วนของจาระบีนั้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วนคือ 1.ตัวปั๊มจาระบี (Grease pump) 2.ฝาครอบถัง (Drum cover) และ 3.แผ่นกดจาระบี (Follower plate) ดังรูปที่ 1ค



รูปที่ 1ค ส่วนประกอบของปั๊มจาระบี

ขั้นตอนที่ 1 การประกอบปั๊มจาระบีและท่อจ่ายจาระบี

1.1 เปิดฝาดังจาระบีออกเพื่อนำแผ่นกดจาระบี (Follower plate) ใส่ลงไปยังถัง ดังรูปที่ 2ค



รูปที่ 2ค แผ่นกวดจาระบี (Follower plate) ที่อยู่ในถัง

1.2 นำฝาครอบถัง (Drum cover) ครอบฝาดังและหมุนเกลียวเพื่อล็อกถัง จำนวน 3 ตัวให้ตึงมือ ดังรูปที่ 3ค



รูปที่ 3ค การใส่ฝาครอบถัง (Drum cover)

1.3 นำตัวปั๊มจาระบี (Grease pump) ใส่ลงที่รูของฝาครอบถัง (Drum cover) และหมุนเกลียวเพื่อล็อกท่อปั๊มจาระบี จำนวน 1 ตัวให้ตึงมือ ดังรูปที่ 4ค



รูปที่ 4ค การใส่ตัวปั๊มจาระบี (Grease pump) ที่รูของฝาครอบถัง (Drum cover)

1.4 นำท่อไฮดรอลิกต่อระหว่างปั๊มจาระบีกับกระบอกลอยจาระบี พร้อมกับพันเทปพันเกลียวเพื่อป้องกันการรั่วไหล และขันเกลียวด้วยประแจให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 5ค



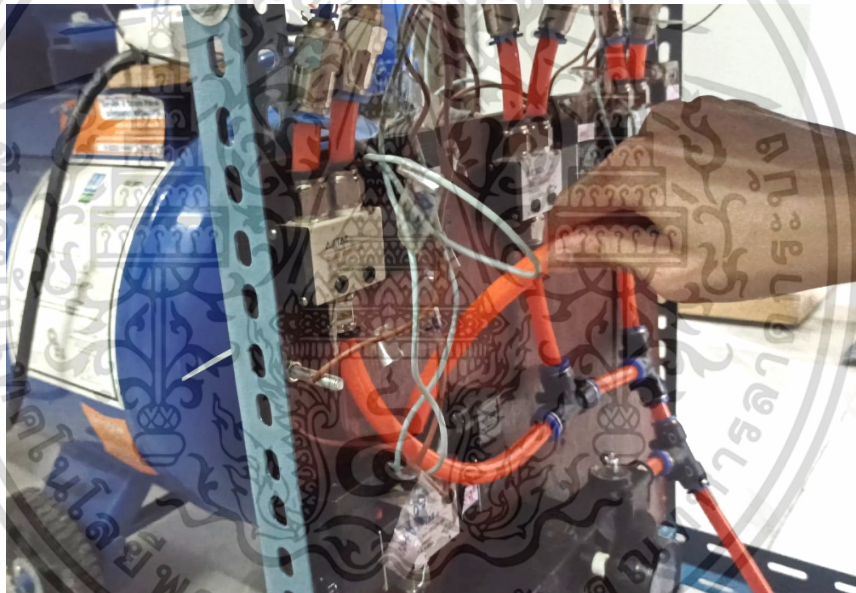
รูปที่ 5ค การต่อท่อไฮดรอลิกต่อระหว่างปั๊มจาระบีกับกระบอกลอยจาระบี

2.) การประกอบระบบนิวแมติกส์

2.1 นำท่อขนาด 12 mm ต่อระหว่างปั๊มจาระบี (รูปที่ 6ค) และทางออกของโซลินอยด์ A (รูปที่ 7ค)



รูปที่ 6ค การต่อลมที่ปั๊มจาระบี



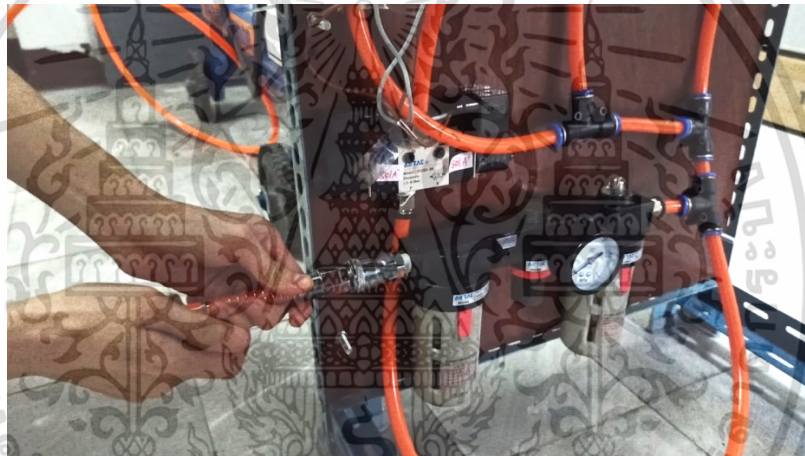
รูปที่ 7ค การต่อลมที่ทางออกของโซลินอยด์ A

2.2 นำท่อลมขนาด 12 mm ต่อระหว่างปั๊มลม (รูปที่ 8ค) และทางเข้าของ FRL (รูปที่ 9ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8ค การต่อลมที่ปั๊มลม



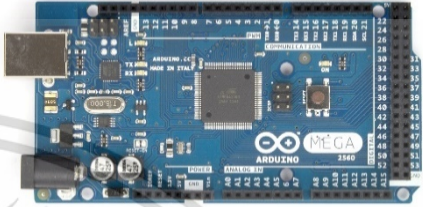
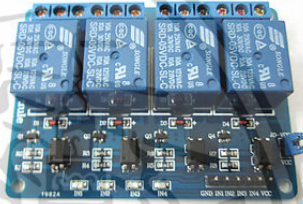
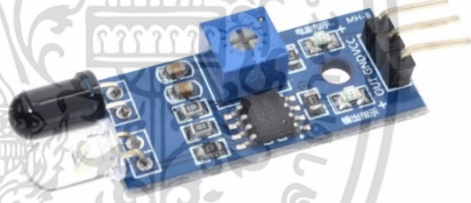


รูปที่ 9ค การต่อลมที่ FRL

จบขั้นตอนการเตรียมการใช้งานเครื่องบรรจุกระป๋องแบบหลอดวิธีการเริ่มต้นทำงานคือเสียบปลั๊กไฟให้แก่ ปั๊มลมและเครื่องบรรจุกระป๋อง





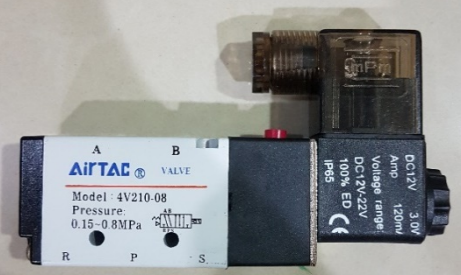
ภาคผนวก ง

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 1ง แสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานทั้งหมด

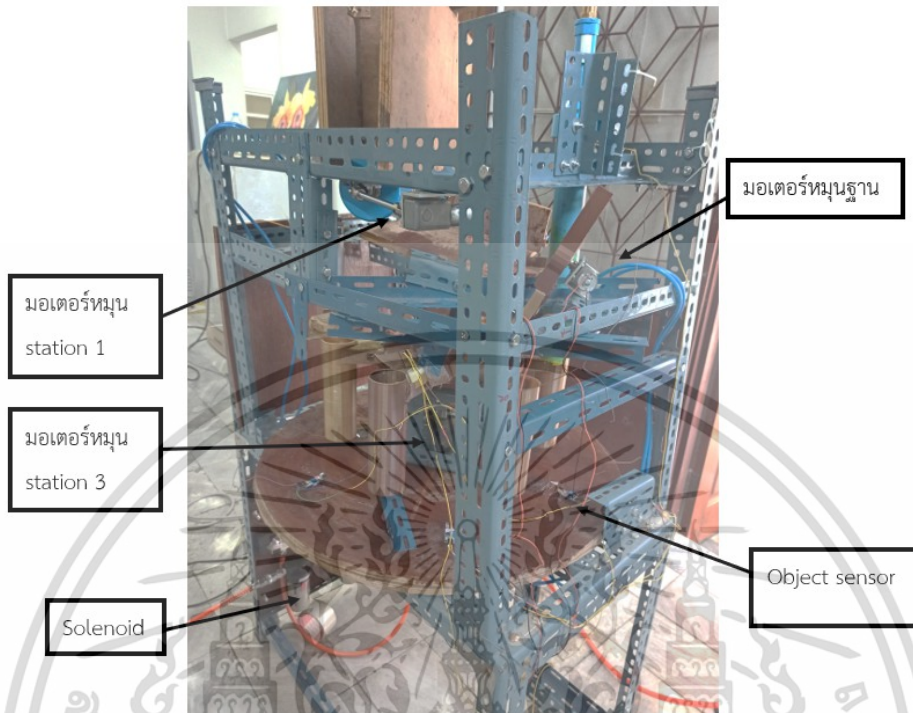
ลำดับ	รายการ	จำนวน	รูปภาพ
1	Arduino Mega 2560	1	
2	Relay 4 ช่อง	1	
3	เซนเซอร์จับวัตถุ	12	
4	Switching แหล่งจ่ายไฟ DC 12 V 15A	1	
5	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 12 RPM ขนาดใหญ่ (ใช้หมุนฐานเปลี่ยน station)	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

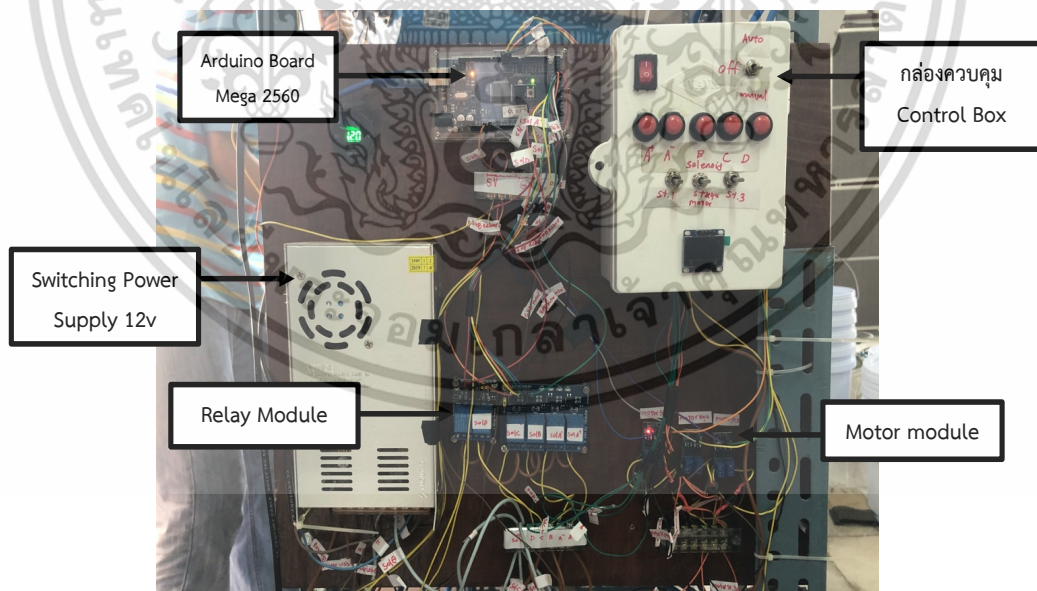
6	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 20 RPM ขนาดเล็ก ใช้ หมุนจ่ายหลอดที่ station 1)	1	
7	มอเตอร์เกียร์ตัวหนอน 12 V 40 RPM ขนาดเล็ก ใช้ หมุนจ่ายไฟที่ station 3)	1	
8	Motor Driver	3	
9	Airtac Solenoid valve 4V-210	3	
10	Airtac Solenoid valve 3V-220	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 1ง เป็นตารางแสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในระบบอัตโนมัติ โดยเมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะเป็นดังรูปที่ 1ง และ 2ง



รูปที่ 1ง มอเตอร์ วาล์วโซลินอยด์และเซนเซอร์จับวัตถุ เมื่อติดตั้งแล้ว

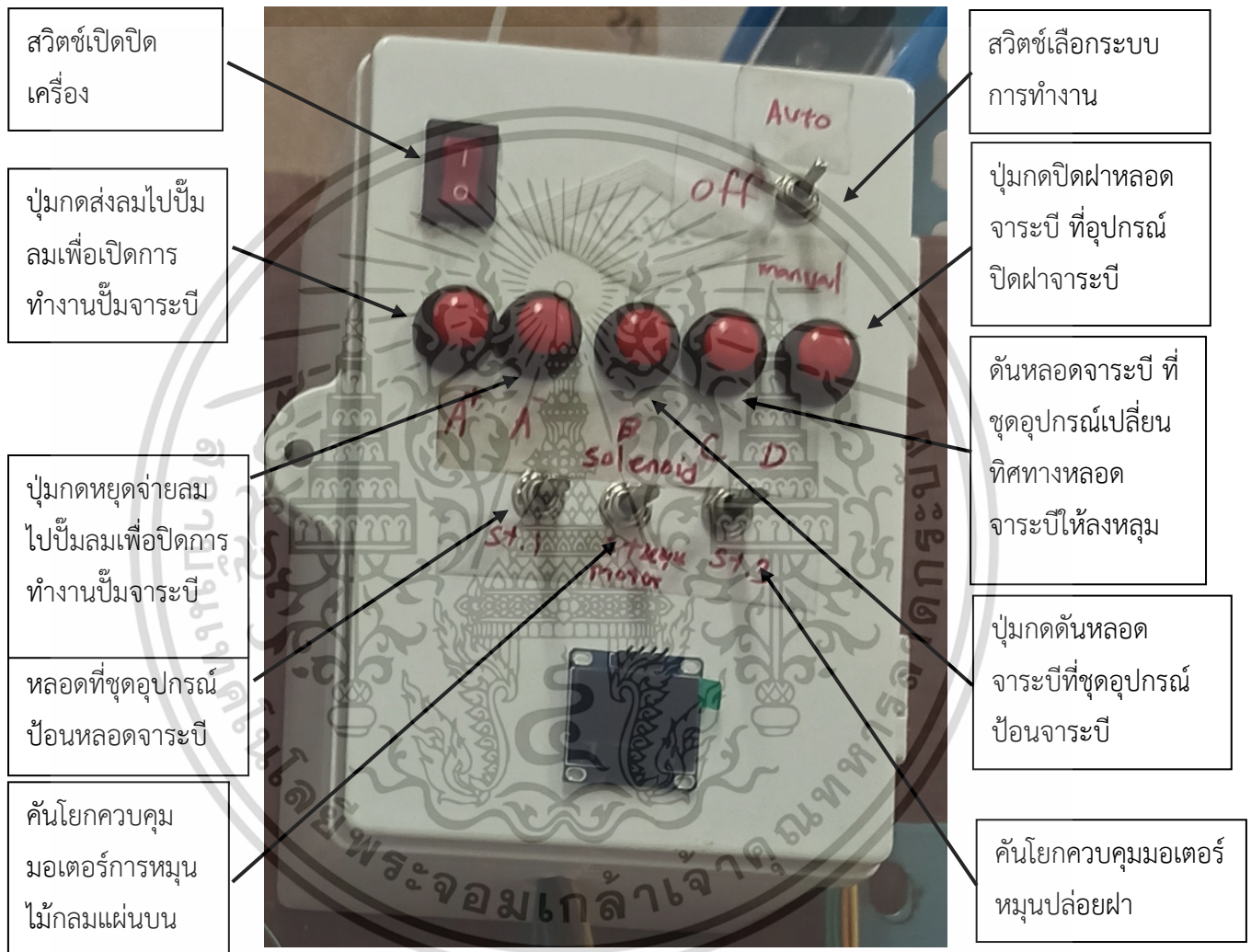


รูปที่ 2ง แผงผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ ขั้นตอนการทำงาน

การทำงานของเครื่องแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบควบคุมอัตโนมัติ(Auto) กับ แบบควบคุมด้วยมือ(manual) โดยสามารถเลือกโหมดการทำงานได้ดังรูปที่ 1จ

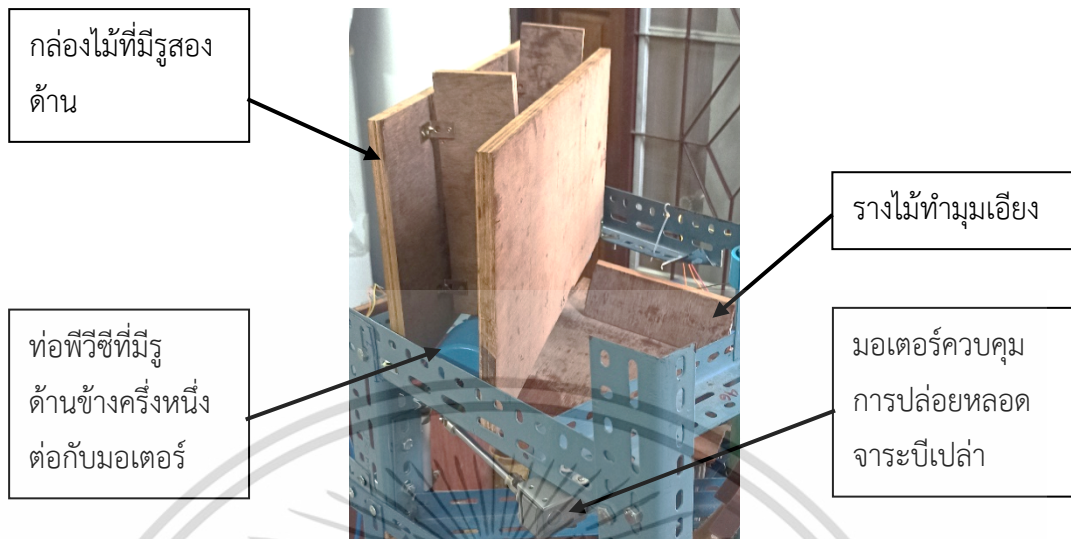


รูปที่ 1จ แผงควบคุมการทำงานของเครื่อง

1. ขั้นตอนการทำงานแบบระบบอัตโนมัติ

ก่อนเปิดสวิตช์เครื่องให้มั่นใจว่าคันโยกทุกตัวอยู่ที่ตำแหน่ง off (อยู่ตรงกลางไม่สับขึ้นหรือสับลง) หลังจากกดเปิดสวิตช์เปิดเครื่องแล้วทำการสับสวิตช์เครื่องขึ้นบนไปทางป้ายอักษรสีแดงที่เขียนว่า Auto ตัวเครื่องจะทำงานตามโปรแกรมที่วางไว้ดังนี้

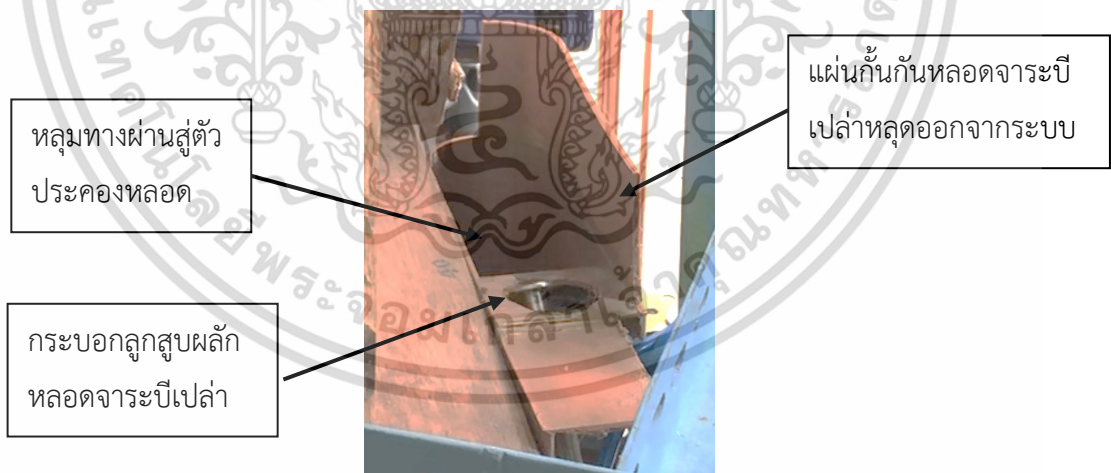
1.1 ชุดอุปกรณ์ป้องกันหลอดจาระบีเปล่า



รูปที่ 2จ ชุดอุปกรณ์ป้องกันหลอดจาระบีเปล่า

หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ป้องกันหลอดจาระบีเปล่า คือ หลอดจาระบีเปล่าจะถูกใส่ลงไปในกล่องไม้ที่มีรูสองด้าน มีท่อพีวีซีที่มีรูด้านข้างครึ่งหนึ่งต่อกับมอเตอร์สำหรับหมุนคอยควบคุมการปล่อยหลอดจาระบีเปล่าลงรางไม้ที่ทำมุมเอียงไป station 2 ต่อไป

1.2 ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางการหลอดจาระบี



รูปที่ 3จ ชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางการหลอดจาระบี

หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางการหลอดจาระบี คือ ตัวเซ็นเซอร์ที่ 1 ตรวจสอบว่ามีหลอดจาระบีเปล่าพร้อมรอกกระบอกลูกสูบทำงานหรือไม่ เมื่อพบว่ามีหลอดตัวกระบอกลูกสูบจะทำการผลักลูกสูบลงไปในตัวประกอบสู่แผ่นไม้กั้นตัวเซ็นเซอร์ที่ 2 ตรวจสอบว่าหลอดจาระบีเปล่าลงมาได้เรียบร้อยหรือไม่ จากนั้นตัวประกอบเคลื่อนที่ไปที่ขั้นขั้นตอนต่อไป

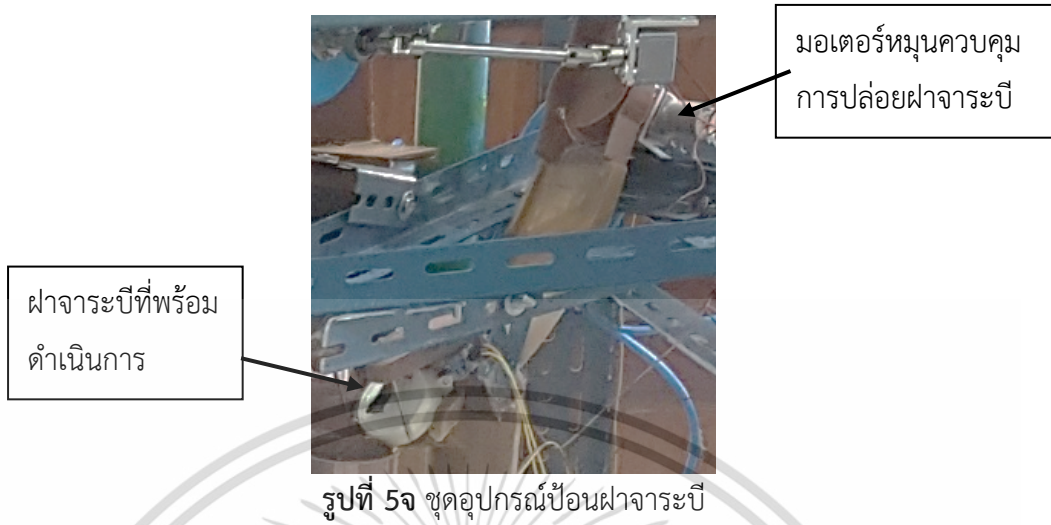
1.3 ชุดอุปกรณ์ป้องกันจากระเบิด



รูปที่ 4จ ชุดอุปกรณ์ป้องกันจากระเบิด

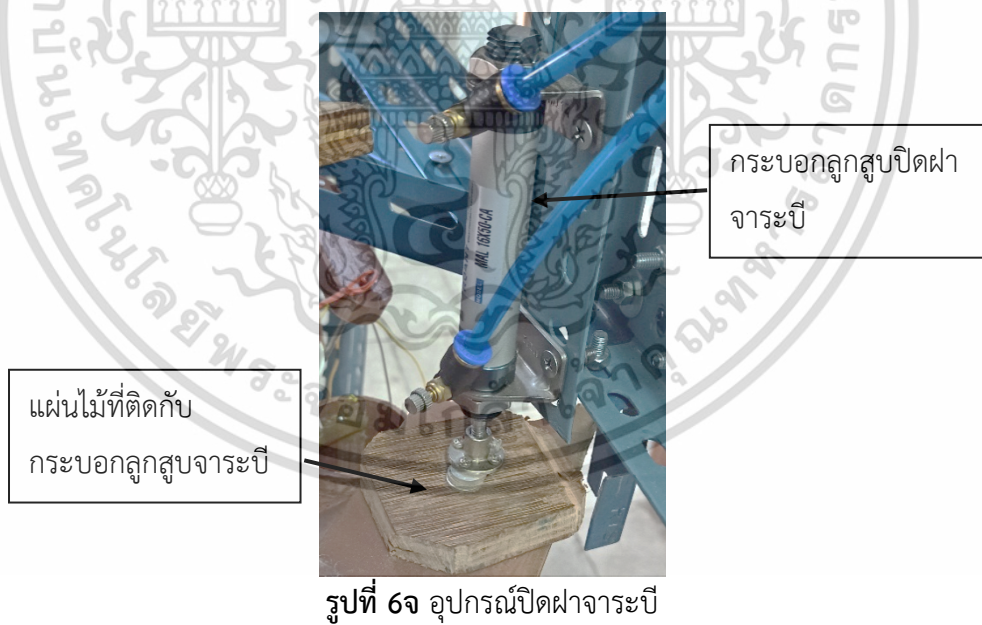
หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ป้องกันจากระเบิด คือ ตัวเซ็นเซอร์ที่ 3 ตรวจสอบที่แผ่นไม้กลมว่ามีหลอดจากระเบิดเปล่าเตรียมพร้อมไหม เมื่อพบว่ามีกระบอกลูกสูบจะดันหลอดจากระเบิดขึ้นไปท่อป้องกันจากระเบิดลงตลอด หลอดจากระเบิดจะค่อยๆถูกดันลงมาโดยน้ำหนักของจากระเบิดระหว่างป้องกันจากระเบิดตามเวลาที่กำหนดไว้

1.4 ชุดอุปกรณ์ป้องกันฝาจาระบี



หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ป้องกันฝาจาระบี คือ ตัวเซ็นเซอร์ที่ 4 ตรวจสอบว่ามีฝาจลวดพร้อมที่ตำแหน่งหลุดจาระบีผ่านหรือไม่ เมื่อพบว่ามีชุดอุปกรณ์ป้องกันฝาจจะปล่อยฝาจขณะหลุดจาระบีเคลื่อนที่ผ่าน

1.5 อุปกรณ์ปิดฝาจาระบี



หลักการทำงานของอุปกรณ์ปิดฝาจาระบี คือ เซ็นเซอร์ที่ 5 จะเช็คว่ามีหลุดจาระบีที่มีฝาจพร้อมหรือไม่ เมื่อพบว่ามีแผ่นไม้สี่เหลี่ยมที่ติดกับกระบอกลูกสูบจะกดฝาจให้ปิดสนิท

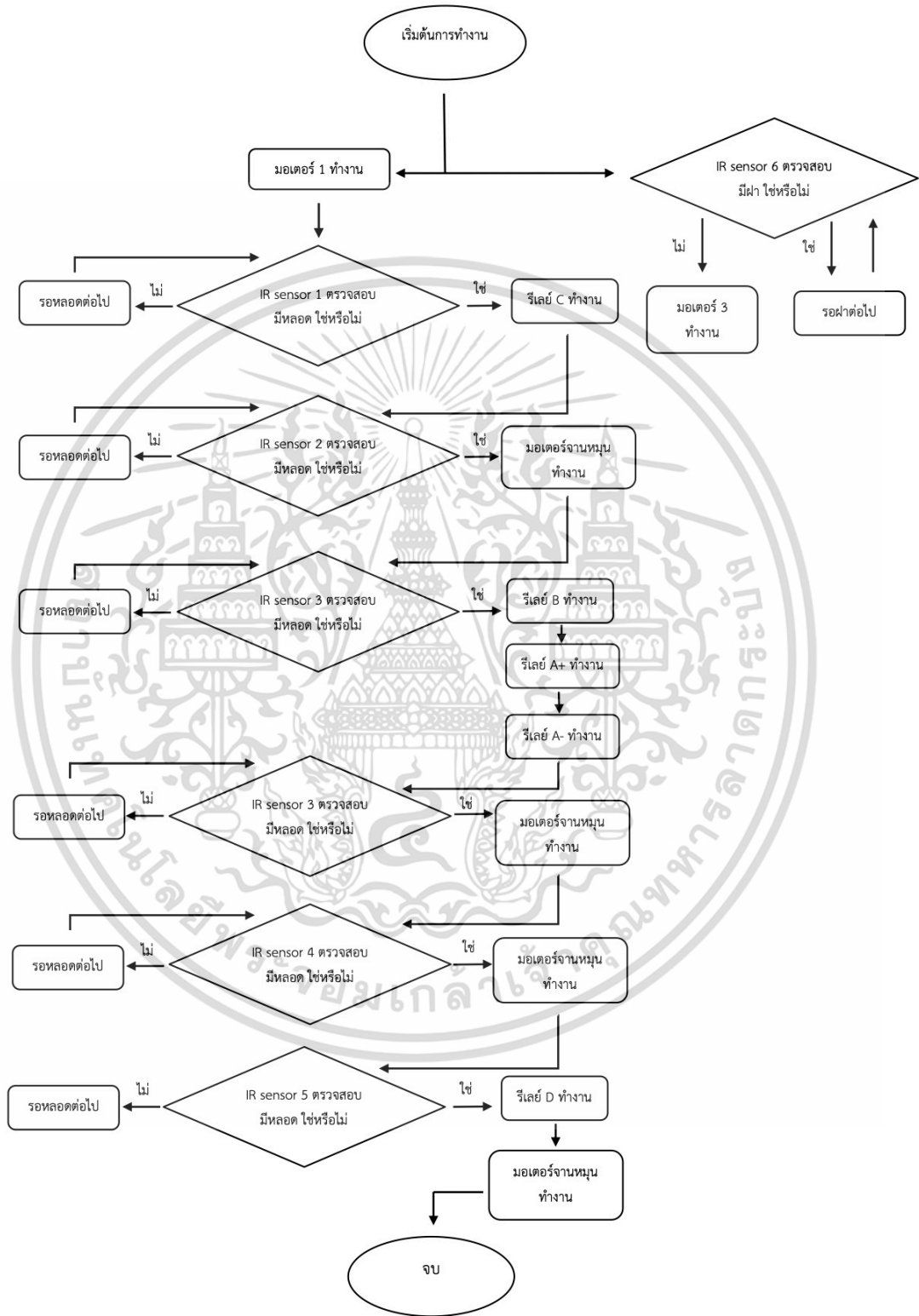
2. ขั้นตอนการทำงานแบบควบคุมด้วยมือ

สับคันโยกขวาบนมาที่คำว่า manual สีแดงและล็อกกดปุ่มหรือสับคันโยกตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการดำเนินการเฉพาะส่วน เช่น ถ้าต้องการป้อนจาระบีลงหลอดจาระบีเปล่าเพียงขั้นตอนเดียวให้นำหลอดจาระบีเปล่าไปใส่ที่ชุดอุปกรณ์ป้อนจาระบีแล้วกดปุ่มสีแดงที่มีตัวอักษร B ตัวเครื่องจะดำเนินการกรอกจาระบี เป็นต้น



ภาคผนวก ฉ

การออกแบบและเขียนโปรแกรม Arduino



รูปที่ 1ฉ แผนผังการออกแบบการทำงานของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code ที่ใช้ในโปรแกรม Arduino

```
1 int obj1 = 31, obj2 = 32, obj3 = 33, obj4 = 34, obj5 = 35, obj6 = 36;
2 int motor1 = 2 , motorR = 3, motorC = 4;
3 int solAP = 40, solAM = 41, solB = 42, solC = 30, solD = 44;
4 int val = 0, val2 = 0, val3 = 0, val4= 0, val5= 0, val6 = 0, val7 = 0;
5 void setup(){
6   pinMode(obj1, INPUT);
7   pinMode(obj2, INPUT);
8   pinMode(obj3, INPUT);
9   pinMode(obj4, INPUT);
10  pinMode(obj5, INPUT);
11  pinMode(obj6, INPUT);
12  pinMode(motor1, OUTPUT);
13  pinMode(motorR, OUTPUT);
14  pinMode(motorC, OUTPUT);
15  pinMode(solAP, OUTPUT);
16  pinMode(solAM, OUTPUT);
17  pinMode(solB, OUTPUT);
18  pinMode(solC, OUTPUT);
19  pinMode(solD, OUTPUT);
20  digitalWrite(solAP, HIGH);
21  digitalWrite(solAM, HIGH);
22  digitalWrite(solB, HIGH);
23  digitalWrite(solC, HIGH);
24  digitalWrite(solD, HIGH);
25  Serial.begin(9600);
26 }
27 void loop(){
28   st1();
29   st2();
30   st3();
31   st4();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

32 }
33 void st1(){
34   digitalWrite(motor1, HIGH);
35   delay(4400);
36   digitalWrite(motor1, LOW);
37   delay(1000);
38   val = digitalRead(obj1);
39   Serial.print("val =");
40   Serial.println(val);
41   if(val == 0){
42     digitalWrite(solC, LOW);
43     delay(1000);
44     digitalWrite(solC, HIGH);
45   }
46   else{
47     digitalWrite(solC,HIGH);
48   }
49   val2 = digitalRead(obj2);
50   Serial.print("val2 =");
51   Serial.println(val2);
52   if(val2 == 0){
53     analogWrite(motorR, 70);
54     delay(1330);
55     digitalWrite(motorR, LOW);
56   }
57
58   else{
59     digitalWrite(motorR,LOW);
60   }
61 }
62 void st2(){
63   digitalWrite(motorR,LOW);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

64 delay(2000);
65 val3 = digitalRead(obj3);
66 Serial.print("val3 =");
67 Serial.println(val3);
68     if(val3 == 0){
69         digitalWrite(solB, LOW);
70         delay(2800);
71         digitalWrite(solB, HIGH);
72         digitalWrite(solAP, LOW);
73         delay(1000);
74         digitalWrite(solAP, HIGH);
75         delay(15000);
76         digitalWrite(solAM, LOW);
77         delay(1000);
78         digitalWrite(solAM, HIGH);
79         delay(1000);
80     }
81     else{
82         digitalWrite(solB,HIGH);
83     }
84 val4 = digitalRead(obj3);
85 Serial.print("val4 =");
86 Serial.println(val4);
87     if(val4 == 0){
88         analogWrite(motorR, 90);
89         delay(1420);
90         digitalWrite(motorR, LOW);
91     }
92
93     else{
94         digitalWrite(motorR,LOW);
95     }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

96 }
97 void st3(){
98   val5 = digitalRead(obj6);
99   Serial.print("val5 =");
100  Serial.println(val5);
101  if(val5 == 1){
102    digitalWrite(motorC, HIGH);
103    delay(1250);
104    digitalWrite(motorC, LOW);
105    delay(1000);
106  }
107  else{
108    digitalWrite(motorC, LOW);
109
110    val6 = digitalRead(obj4);
111    Serial.print("val6");
112    Serial.println(val6);
113    if(val6 == 0){
114      analogWrite(motorR, 90);
115      delay(1405);
116      digitalWrite(motorR, LOW);
117    }
118
119    else{
120      digitalWrite(motorR,LOW);
121    }
122  }
123 }
124 void st4(){
125
126  digitalWrite(motorR,LOW);
127  delay(2000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
128 val7 = digitalRead(obj5);
129 Serial.print("val7");
130 Serial.println(val7);
131 if(val7 == 0){
132     digitalWrite(solD,LOW);
133     delay(1000);
134     digitalWrite(solD,HIGH);
135     delay(2800);
136     analogWrite(motorR, 90);
137     delay(1310);
138     digitalWrite(motorR, LOW);
139 }
140 else{
141     digitalWrite(solD,HIGH);
142 }
143 }
```