

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิด การไหลของของไหลในท่อ  
MECHANICAL FLOW CONTROL METER



นาย ชนิษฐ์ เต็มเมืองปัก  
นาย พิณณ ปรรมปรี  
นาย ตริยพร จันทร์ปาน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

b.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต  
เลขหมู่ 55017  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี..... 4 เม.ย. 2548

ชุดอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิด การไหลของของไหลภายในท่อ  
MECHANICAL FLOW CONTROL METER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดอุปกรณ์ควบคุมการเปิด - ปิดการไหลของของไหลในท่อ

MECHANICAL FLOW CONTROL METER

ผู้จัดทำ

1. นาย ชนิกส์ เต็มเมืองปัก รหัสประจำตัว 43010606
2. นาย พิษณุ เปรมปรี รหัสประจำตัว 43010719
3. นาย ตรีพร จันทร์ปาน รหัสประจำตัว 43010850



ชินรัชย์ เจริญพงษ์  
(ศ.ดร. ชินรัชย์ เจริญพงษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดอุปกรณ์ควบคุมการเปิด – ปิดการไหลของของไหลในท่อ

นาย ชนิทส์ เต็มเมืองปัก	43010606
นาย พิษณุ เปรมปรี	43010719
นาย ตรีพร จันทร์ปาน	43010850
ผศ.ดร. ชินรักษ์ เรือรพษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2546	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการเปิด – ปิดน้ำในท่อ โดยที่การออกแบบและจัดทำชุดอุปกรณ์นี้ จะต้องอาศัยในเรื่องทฤษฎีการไหลของของไหล ระบบแรงและกลไกในการทำงานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ได้แก่ สปริง เพื่องตรง เป็นต้น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดอุปกรณ์ควบคุมการเปิด – ปิดน้ำในท่อ ชุดอุปกรณ์นี้จะประกอบด้วย ชุดวัดปริมาตรการไหล, ชุดส่งสัญญาณ, ชุดสปริง และวาล์วเปิด – ปิด โดยทุกชิ้นส่วนทำงานอย่างสอดคล้องกัน เนื่องจากอุปกรณ์นี้ทำงานได้โดยอาศัยแรงจากสปริงเป็นแรงที่ใช้ในการเปิด – ปิดวาล์วเพื่อควบคุมการไหล จึงไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแหล่งพลังงานภายนอกใดๆ มาช่วยในการทำงาน อีกทั้งชุดอุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด จึงทำให้ชุดอุปกรณ์นี้ง่ายต่อการติดตั้งในทุกสถานที่ และง่ายต่อการซ่อมบำรุงชุดอุปกรณ์อีกด้วย

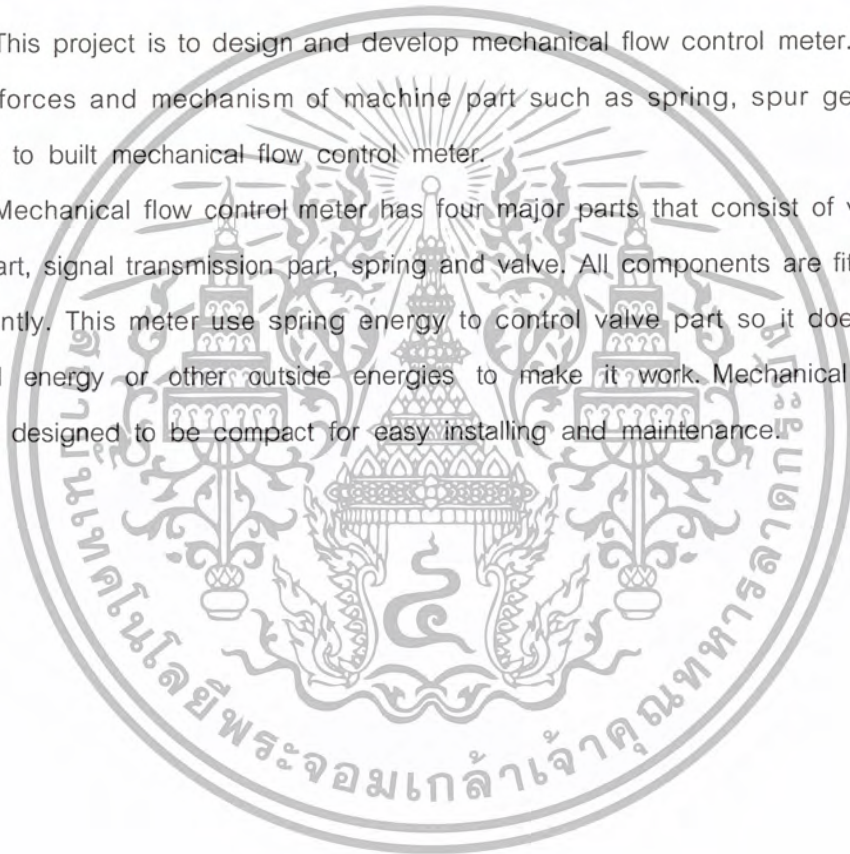
## Mechanical Flow Control Meter

Chanick Temmeungpuk	43010606
Pisanu Plamplee	43010719
Triporn Junpan	43010850
Vice Prof..Dr. Chinarak Thianpong	Advisor

### ABSTRACT

This project is to design and develop mechanical flow control meter. It use flow theory, forces and mechanism of machine part such as spring, spur gear etc. For applying to built mechanical flow control meter.

Mechanical flow control meter has four major parts that consist of volume flow meter part, signal transmission part, spring and valve. All components are fitted to work accordantly. This meter use spring energy to control valve part so it does not need electrical energy or other outside energies to make it work. Mechanical flow control meter is designed to be compact for easy installing and maintenance.



### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จได้โดยการสนับสนุนจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการซึ่งเป็นบุคคลสำคัญที่ให้คำแนะนำคำปรึกษา และตรวจสอบในโครงการนี้ตั้งแต่เริ่มจัดทำชิ้นงานจนสำเร็จเป็นปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

อนึ่ง ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ใคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับพี่มานพ มาสมทบ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแนะนำในด้านการทำงานและสร้างชิ้นงาน รวมทั้งพี่น้องญาติ ร่วมกระทอก ซึ่งให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และการปฏิบัติกรต่างๆ ในการทำชิ้นโครงการและในการจัดทำปริญญาานิพนธ์นี้จนสำเร็จขึ้นมาได้



นาย ชนิทส์ เต็มเมืองปัก

นาย พิษณุ เปรมปรี

นาย ตรีพร จันทร์ปาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎีการไหลของของไหล	3
2.1 ชนิดการไหลของของไหล	3
2.2 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย (Flow rate and mean velocity)	4
2.3 สมการต่อเนื่อง (Equation of continuity)	5
2.4 Energy's Equation	5
บทที่ 3 การไหลในท่อ	7
3.1 Reynolds Number	7
3.2 สมการทั่วไปสำหรับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน	8
3.3 ค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองสำหรับการไหลในท่อ	9
3.2.1 การสูญเสียหลัก (Major loss)	9
3.2.2 การสูญเสียรอง (Minor loss)	9
บทที่ 4 ระบบแรง	11
4.1 การสมดุลของวัตถุ (Equilibrium of a Deformation Body)	11
4.1.1 ภาระภายนอก (External load)	11
4.1.2 แรงจากน้ำหนักวัตถุ (Body Force)	12
4.1.3 สมการการสมดุลย์ (Equation of Equilibrium)	13
บทที่ 5 เฟืองตรง	14
5.1 มาตรฐานการบอกขนาดของฟันเฟือง	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ความเค้นในพื้นเฟืองตรง	15
5.3 ความเค้นหนาแน่น	20
5.4 แรงพลวัต	21
<b>บทที่ 6 สปริง</b>	24
6.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง	24
6.2 ความเค้นในสปริงขรับแรงกด	26
6.3 การยืดหดของสปริงขด	29
6.4 ความแข็งดิ่งของสปริง	30
6.5 จำนวนขดทำการ	31
6.6 ระยะยุบตัวใช้งาน	31
6.7 พลังงานที่เก็บโดยสปริง	33
6.8 การออกแบบสปริงรับแรงกด	34
6.9 การออกแบบสปริงขดโดยคิดให้แรงอยู่นิ่ง	35
<b>บทที่ 7 การคำนวณทางทฤษฎี</b>	37
7.1 แรงสปริง	37
7.2 Pressure	37
7.3 ชุดล๊อค	37
7.4 กระจเคื่อง	37
7.5 ตัวปลด	38
7.6 การคำนวณหาอัตราทดของพื้นเฟือง	39
7.7 การคำนวณหาขนาดของเฟือง	39
7.8 การคำนวณหาแรงที่กระทำกับใบพัด	40
<b>บทที่ 8 แบบและวิธีการสร้าง</b>	42
8.1 ชุดล๊อค	42
8.2 วาล์ว	43
8.3 ตัวยึดตัวล๊อคควาล์ว	44
8.4 ตัวล๊อคควาล์ว	45
8.5 ตัวยึดกระจเคื่อง	46
8.6 กระจเคื่องและแกนกระจเคื่อง	47
8.7 ตัวหมุนตั้งปริมาตร	48
8.8 ชุดเฟือง	49
8.9 ใบพัด	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.10 ชุดประกอบเสร็จ	54
8.11 ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น	55
บทที่ 9 หลักการทำงานและการทดสอบ	56
9.1 หลักการทำงาน	56
9.2 การทดสอบอุปกรณ์	58
9.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	58
9.2.2 แบบที่ 1	58
9.2.3 แบบที่ 2	58
บทที่ 10 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	60
10.1 ผลการทดลอง	60
10.2 สรุปผลการทดลอง	60
10.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	60
10.4 ข้อเสนอแนะ	61
บรรณานุกรม	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการหาความเร็วเฉลี่ย	4
รูปที่ 2.2 แสดงมวลของไหลไหลเข้าขอบเขตที่กำหนด	6
รูปที่ 3.1 แสดงการไหลแบบ Steady Incompressible Flow	8
รูปที่ 3.2 แสดงสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้า	10
รูปที่ 4.1 แรงกระทำที่ผิว	11
รูปที่ 4.2 แสดงแรงกระทำที่ผิววัตถุ	12
รูปที่ 5.1 การเรียกชื่อส่วนของพื้นเพื่อ	14
รูปที่ 5.2 ตัวประกอบเรขาคณิตที่ใช้หาตัวประกอบรูปแบบของลูอิส	15
รูปที่ 6.1 สปริงชด	26
รูปที่ 6.2 ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับสปริงชดรับแรงดึงและรับแรงกด	28
รูปที่ 6.3 การรวมความเค้นในสปริงชด	28
รูปที่ 6.4 มุมชดของสปริง	29
รูปที่ 6.5 การชดของลวดสปริง	29
รูปที่ 6.6 ปลายสปริงชดรับแรงกดชด	31
รูปที่ 6.7 ระยะชดตัวของสปริงชด	32
รูปที่ 6.8 คุณลักษณะของสปริง	34
รูปที่ 9.1 แสดงชุดอุปกรณ์ขณะตั้งปริมาตร	56
รูปที่ 9.2 แสดงปริมาณน้ำที่ไหลขณะใกล้ถึงจุดตัดปริมาตร	56
รูปที่ 9.3 แสดงการทำงานของตัวปลด กระเบื้อง ชุดลิ้นเมื่อถึงปริมาตรที่ตั้งไว้	57
รูปที่ 9.4 แสดงกลไกในการปิดวาล์ว	57
รูปที่ 9.5 การทดสอบการทำงานของกลไกอุปกรณ์	58
รูปที่ 9.6 การทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์	59

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 4.1 แสดงการใช้สัญลักษณ์แทนจุดรองรับและประเภท ของแรงปฏิกิริยาที่ถูกรับกับโครงสร้าง	12
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส	18
ตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของพลาสติก	19
ตารางที่ 5.4 ตัวประกอบใช้งาน	23
ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติทางกลของสวดสปริง	25
ตารางที่ 6.2 ค่าประมาณของความยาวอิสระและความยาวแข็งตัว	33
ตารางที่ 6.3 ค่าความเค้นเฉือนออกแบบสำหรับวัสดุสปริง	35
ตารางที่ 7.1 ค่าการคำนวณของอัตราทดชุดเฟืองทด	39
ตารางที่ 10.1 การเปรียบเทียบปริมาตรน้ำที่ได้	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

น้ำเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตประจำวันของผู้คน และน้ำยังมีประโยชน์อีกนานัปการทั้งในด้านการอุปโภค บริโภค และด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น ในโครงการนี้จะเน้นในด้านการอุปโภค บริโภคในครัวเรือน อพาร์ทเมนต์ และหอพัก ซึ่งปริมาณการใช้น้ำในแต่ละสถานที่นั้นแตกต่างกัน บางครั้งการใช้น้ำแต่ละครั้งอาจจะมีการสูญเสียปริมาณน้ำโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายกรณี เช่น การควบคุมการไหลของน้ำประปาในถังเก็บน้ำใต้ดินโดยใช้ระบบลูกลอยซึ่งติดตั้งอยู่ในถังเก็บ ซึ่งเมื่อระบบลูกลอยเกิดการเสียหาย จะทำให้มีปริมาณน้ำประปาไหลล้นออกมาโดยเสียเปล่า หรือการเปิดน้ำประปาเพื่อรองทิ้งไว้ แล้วผู้ใช้น้ำไปทำธุระอื่น ทำให้น้ำประปาไหลล้น ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญของการสูญเสียน้ำโดยเปล่าประโยชน์ ผู้จัดทำโครงการนี้จึงได้เกิดแนวคิดเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาในเรื่องนี้ โดยเริ่มวิเคราะห์และออกแบบเพื่อที่จะจัดสร้างชุดอุปกรณ์ที่จะสามารถวัดปริมาณการไหลของน้ำประปา เพื่อจะได้ทราบปริมาณการใช้น้ำด้วย และจะทำการปิดปริมาณการไหลของน้ำประปาทันทีเมื่อปริมาณน้ำไหลครบตามปริมาณที่ผู้ใช้น้ำได้ทำการตั้งไว้ ดังนั้นการจัดทำโครงการนี้จึงเป็นการแก้ไขการสูญเสียน้ำโดยเปล่าประโยชน์ได้ตรงจุด ซึ่งเป็นการรักษาทรัพยากรน้ำให้คงอยู่กับผู้คนที่ได้ตลอดไป

### 1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการเปิด - ปิดน้ำในท่อ โดยที่อุปกรณ์นี้ทำงานได้โดยอาศัยหลักการทำงานของชิ้นส่วนเครื่องกลในการควบคุมปริมาณน้ำตามที่เราได้ตั้งค่าไว้โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง รวมถึงการออกแบบให้ชุดอุปกรณ์นี้สามารถทำการติดตั้งได้ทุกสถานที่ เช่น อาคารบ้านเรือน และหอพัก

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ลดการสูญเสียน้ำประปาไปโดยเปล่าประโยชน์
- เกิดอุปกรณ์ควบคุมปริมาณน้ำอีกรูปแบบหนึ่งที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า

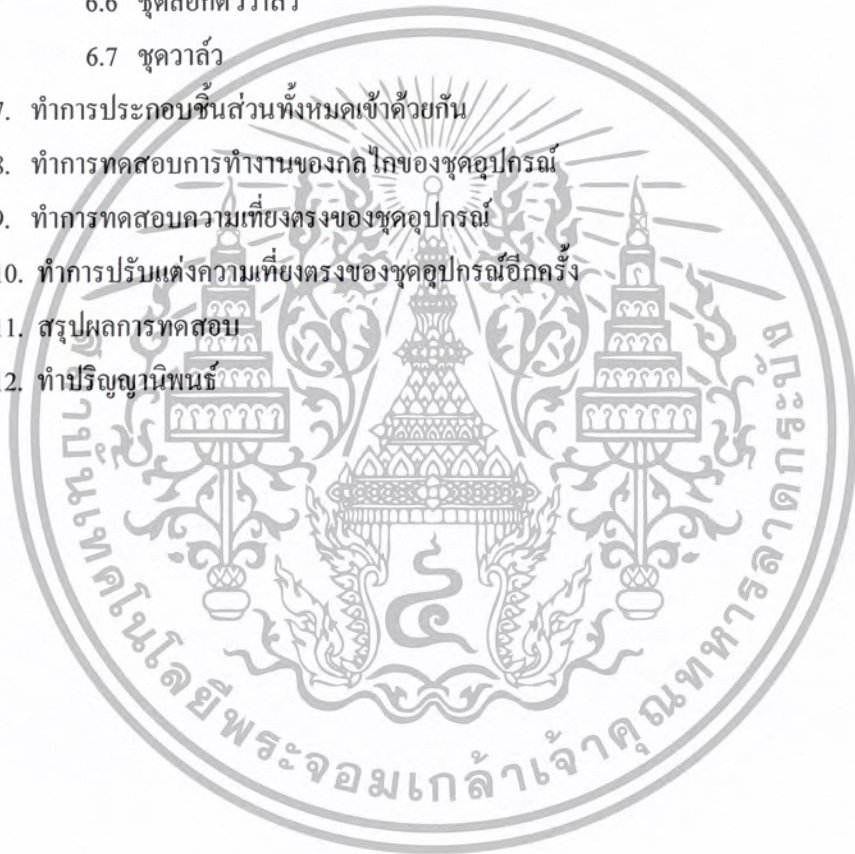
### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. วางแนวคิดและออกแบบชุดอุปกรณ์
2. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาในเรื่องของการออกแบบและการเลือกวัสดุอุปกรณ์ในการทำ
3. กำหนดทางทฤษฎีของอุปกรณ์ต่างๆที่จะนำมาใช้
4. สำรองอุปกรณ์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานจากท้องตลาด

#### 5. เลือกอุปกรณ์บางส่วนที่มีอยู่ในท้องตลาดมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.1 มิเตอร์น้ำทั่วไป
- 5.2 สปริง
- 5.3 ชุดเฟืองหมุนทางเดียว
6. จัดสร้างอุปกรณ์ที่ไม่สามารถหาได้ในท้องตลาด
  - 6.1 ตัวบล็อกล่างชุดมิเตอร์
  - 6.2 ชุดกระเดื่องที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลัง
  - 6.3 แผ่นสำหรับวางตำแหน่งเฟืองทด
  - 6.4 แผ่นสำหรับเป็นตัวคกกระเดื่อง
  - 6.5 ชุดตั้งปริมาณน้ำ
  - 6.6 ชุดลือกตัววาล์ว
  - 6.7 ชุดวาล์ว
7. ทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน
8. ทำการทดสอบการทำงานของกลไกของชุดอุปกรณ์
9. ทำการทดสอบความเที่ยงตรงของชุดอุปกรณ์
10. ทำการปรับแต่งความเที่ยงตรงของชุดอุปกรณ์อีกครั้ง
11. สรุปผลการทดสอบ
12. ทำปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการไหลของของไหล

#### 2.1 ชนิดการไหลของของไหล

ชนิดการไหลของของไหลมีการแบ่งอยู่หลายลักษณะดังต่อไปนี้  
การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบไม่คงตัว

- 1) การไหลแบบเอกภาพและการไหลแบบอนเอกภาพ
- 2) การไหลแบบทิศทางเดียว สองทิศทางและสามทิศทาง
- 3) การไหลแบบหมุนวนและการไหลแบบไม่หมุนวน
- 4) การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบคงตัว (Steady flow) การไหลจะคงตัวก็ต่อเมื่อของไหลนั้นมีคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น และอื่นๆ ที่จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการไหลแบบนี้จึงเป็นการไหลของของไหลที่ไหลผ่านท่อในอัตราการไหลที่คงที่

การไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady flow) การไหลจะไม่คงตัวก็ต่อเมื่อคุณลักษณะของของไหลตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งหมดขณะที่เกิดการเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่จุดต่างๆ ในของไหลแบบนี้จึงเป็นการไหลของของไหลผ่านท่อที่อัตราการไหลไม่คงที่

การไหลแบบเอกภาพ (Uniform flow) ขณะที่ความเร็วในการไหลของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและ ทิศทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนดให้ในของไหล เช่น การไหลของของเหลวภายใต้ความดันที่ไหลผ่านท่อขนาดยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่

การไหลแบบอนเอกภาพ (Non-uniform flow) ความเร็วของการไหลของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนดให้ในของไหล เช่น การไหลของของเหลวภายใต้ความดันไหลผ่านท่อขนาดยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลของของไหลที่มีอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปเป็นแผ่นบางๆ ไม่ปะปนกัน โดยที่ชั้นของของไหลจะไม่กระจัดกระจาย และจะเคลื่อนที่ในแนวขนานเป็นชั้น ๆ ไม่ปะปนกัน โดยที่ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่อย่างมีระเบียบราบเรียบ การไหลแบบราบเรียบเกิดจากความหนืดของของไหลที่ไหลเป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Turbulent แทบทั้งสิ้นการไหลของของไหล ซึ่งในขณะที่ไหลนั้นอนุภาคของของไหลเคลื่อนตัวแบบไม่เป็นระเบียบ และมีการหมุนวนปั่นป่วนขณะไหลในระหว่างชั้นของของไหลอย่างรวดเร็วตลอดเวลา ความเร็วในการไหลจะมีค่าสูง

## 2.2 อัตราการไหลและความเร็วเฉลี่ย (Flow rate and mean velocity)

อัตราการไหล (Flow rate) คือ ปริมาณของของไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งต่อหนึ่งหน่วยเวลา

ความเร็วเฉลี่ย (Mean velocity) เนื่องจากของไหลมีความหนืด ขณะไหลจึงมีความเสียดทานและความเค้นเฉือนเกิดขึ้นได้เสมอ จึงทำให้ความเร็วของของไหลตลอดพื้นที่หน้าตัดมีค่าไม่เท่ากัน เช่น ของไหลที่ผ่านท่อกลมที่บริเวณกึ่งกลางท่อจะมีความเร็วสูงสุด และบริเวณผนังท่อมีความเร็วต่ำมาก ซึ่งอาจจะมีค่าเป็นศูนย์ก็ได้ ดังนั้นการนำความเร็วของของไหลไปคำนวณย่อมมีความยุ่งยากและสับสนมาก จึงได้มีการกำหนดความเร็วเฉลี่ยขึ้นเพื่อนำไปใช้กับสมการต่างๆได้ ความเร็วเฉลี่ยอาจจะหาได้จากสมการ

$$V = \frac{1}{A} \int v dA \quad (2.1)$$

โดย  $V$  คือ ความเร็วเฉลี่ยที่จุดใดจุดหนึ่ง

$Q$  คือ อัตราการไหลของของไหล

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ

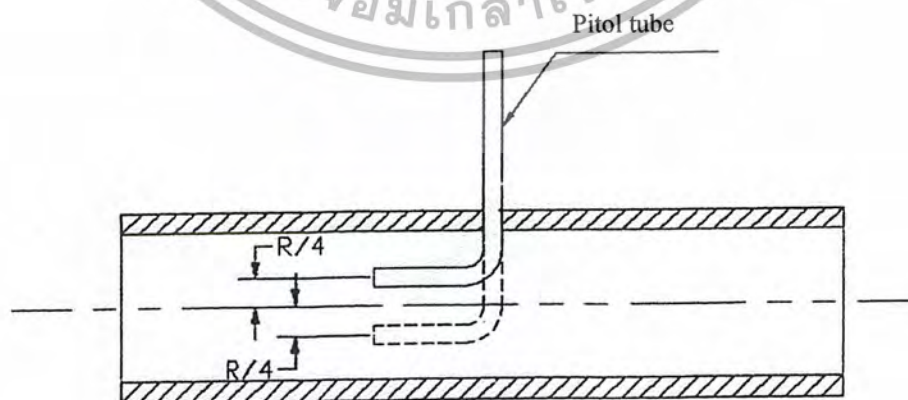
อัตราการไหล มีความสัมพันธ์กับความเร็วเฉลี่ย ดังนี้

$$Q = \int v dA = AV \quad (2.2)$$

ถ้ารู้ค่าอัตราการไหลแล้วหาค่าความเร็วเฉลี่ยได้โดยตรง

ในทางปฏิบัตินั้นจะหาค่าความเร็วเฉลี่ย โดยจะวัดขึ้นไปจากแกนท่อเป็นระยะ  $\frac{R}{4}$  และวัดลงมา

จากแกนท่อเป็นระยะ  $\frac{R}{4}$  และนำทั้งสองค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ย



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการหาความเร็วเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 สมการต่อเนื่อง (Equation of continuity)



รูปที่ 2.2 แสดงมวลของไหลไหลเข้าขอบเขตที่กำหนด

สสารไม่สามารถสร้างขึ้นเองหรือถูกทำลายได้ ดังนั้นอัตราการไหลที่มวลไหลเข้าขอบเขตที่กำหนดจะเท่ากับอัตราการไหลที่มวลไหลออกจากขอบเขตที่กำหนดรวมกับอัตรา Accumulation ของมวลในขอบเขตนั้น ถ้าการไหลเป็นแบบ Steady (ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) แล้วอัตราการไหลที่มวลไหลเข้าขอบเขตที่กำหนดจะเท่ากับอัตราการไหลที่มวลไหลออกจากขอบเขตที่กำหนด

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (2.3)$$

โดย  $v_1, v_2$  เป็นความเร็วของของไหล (m/s)

$\rho$  เป็นความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อทางไหลในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ )

### 2.4 Energy's Equation

สมการพลังงานจะถูกนำไปใช้กับการไหลของของไหล เมื่อของไหลเคลื่อนที่ก็จะมีพลังงานต่างๆ เกิดขึ้นด้วย เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานภายในที่เปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์ปัญหาของของไหลที่เคลื่อนที่อาจทำได้โดยใช้หลักการพิจารณาต่างๆ ดังนี้

- 1) Principle of conservation of mass
- 2) Principle of conservation of energy
- 3) Principle of conservation of momentum

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2}{2g} + z_2 + (u_1 + u_2) - Q_H - h_m \quad (2.4)$$

สมการนี้สามารถใช้ได้ทั้งของเหลว ก๊าซ และไอ แต่ต้องเป็นการไหลแบบคงตัว ในการไหลแบบปั่นป่วน ค่า  $\alpha$  จะมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก เพื่อความสะดวกจึงสมมติให้มีค่าเป็น 1 และถ้าไม่มีเครื่องจักรระหว่างหน้าตัด 1 และหน้าตัด 2 เทอมของ  $h_m$  สามารถตัดทิ้งได้

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2}{2g} + z_2 + h_L \quad (2.5)$$

โดย  $h_L$  คือ พลังงานสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานของของไหลต่อหน่วยมวล (m)

$$h_L = (u_1 - u_2) - Q_H \quad (2.6)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การไหลในท่อ

ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ขนส่งของไหลภายใต้ความดัน ตามปกติท่อที่ใช้จะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เนื่องจากของไหลในท่อมักมีความดัน ดังนั้นการไหลจึงมักเป็นแบบไหลเต็มท่อและมีการไหลเป็นแบบคงตัว การไหลในท่ออาจเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) หรือแบบปั่นป่วน (Turbulence) โดยการไหลในแต่ละแบบจะมีลักษณะและวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป ปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลในท่อส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการของพลังงาน สมการความต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียพลังงานของของไหล เมื่อมีการไหลผ่านท่อข้อต่อต่างๆ ของท่อ ข้องอ และวาล์วที่ใช้บังคับการไหลอีกด้วย

#### 3.1 Reynolds Number

ค่า Reynolds number เป็นค่าที่จะระบุได้ว่า การไหลในท่อนั้นเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และความหนาแน่นของของไหล การที่จะบ่งบอกได้ว่าเป็นการไหลแบบ Laminar Flow หรือ Turbulent Flow จะพิจารณาที่ค่านี้ โดยถ้าค่า Reynolds number อยู่ในช่วง 0 ถึง 2300 จะเป็นย่าน Laminar Flow แต่ถ้าในช่วง 2300 ถึง 4000 จะเป็นย่านวิกฤต (Critical Zone) ซึ่งมีการไหลทั้งสองแบบผสมกัน และถ้า Reynolds Number อยู่ในช่วงที่มากกว่า 4000 จะอยู่ในย่าน Turbulent Flow

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.1)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  คือ ความเร็วในการไหล ( $\text{m/s}$ )

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลม ( $\text{m}$ )

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล ( $\text{kg/m.s}$ )

แต่ถ้าท่อไม่ใช่หน้าตัดวงกลม ( $D = D_h$ )

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3.2)$$

โดย  $D_h$  คือ hydraulic diameter ( $\text{m}$ )

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัด ( $\text{m}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P$  คือ The wetted perimeter of pipe (m)

สำหรับ Rectangular duct ที่มีความยาวแต่ละด้านเป็น  $b$  และ  $h$

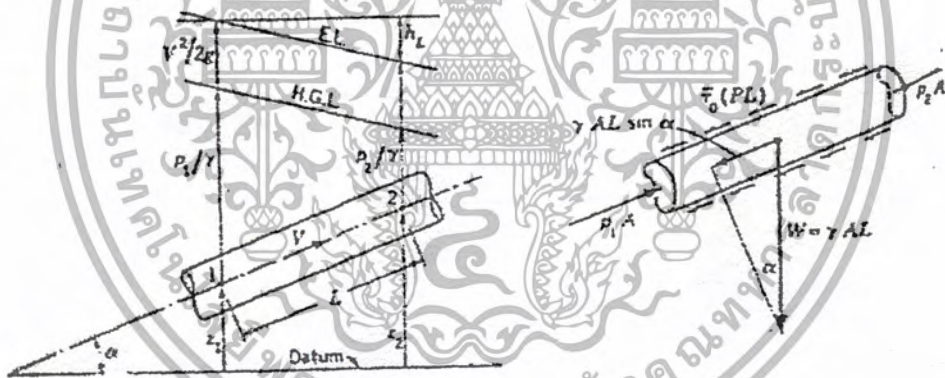
$$D_h = \frac{2bh}{b+h} \quad (3.3)$$

สำหรับท่อกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$

$$D_h = D \quad (3.4)$$

### 3.2 สมการทั่วไปสำหรับการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน (General equation for conduit friction)

สมการทั่วไปนี้สามารถใช้ได้ทั้งในกรณีของไหลที่มีกรไหลแบบราบเรียบและกรไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 3.1 แสดงการไหลแบบ *Steady Incompressible Flow*

โดย  $P$  คือ The wetted perimeter of pipe

$P_1$  คือ ความดันที่หน้าตัด 1

$P_2$  คือ ความดันที่หน้าตัด 2

$L$  คือ ความยาวท่อ

$\tau_0$  คือ ความเค้นเฉือนที่ผนังภายในท่อ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดภายในท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 ที่สภาพสมดุลในการไหลแบบคงตัว ผลรวมของแรงที่กระทำกับของไหลมีค่าเท่ากับ ศูนย์

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - \gamma L A \sin \alpha - \tau_0 PL = 0 \quad (3.5)$$

เนื่องจาก  $\sin \alpha = \frac{(z_1 - z_2)}{L}$  และหารสมการในแต่ละเทอมด้วย  $A$  และจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} - Z_2 + Z_1 = \frac{\tau_0 PL}{\gamma A} \quad (3.6)$$

### 3.3 ค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองสำหรับการไหลในท่อ

เมื่อของไหลไหลในท่อจะเกิดความต้านทานในการไหลขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสียพลังงานของของไหลขึ้น ซึ่งการสูญเสียพลังงานนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การสูญเสียหลัก (Minor loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss)

3.3.1 การสูญเสียหลัก (Major loss) ที่เกิดขึ้นจากการไหลในท่อเป็นผลมาจากความเสียดทานนั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ โดยใช้สมการของ Darcy - Weisbach สาเหตุที่จัดให้การสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานในท่อเป็นการสูญเสียหลักนั้น เพราะในกรณีที่มีความยาวมากๆ การสูญเสียแบบนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียด้วยสาเหตุอื่นๆ

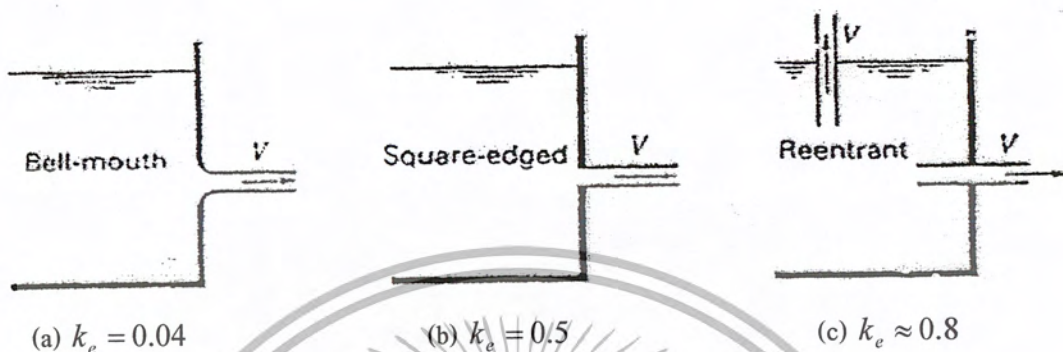
3.3.2 การสูญเสียรอง (Minor loss) คือการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือทิศทางความเร็ว หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการสูญเสียพลังงานที่มีผลมาจากพลังงานจลน์ หรือเสดความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเมื่อไหลผ่านข้อต่อ ข้อเพิ่ม หรือลดขนาด การไหลผ่านวาล์วต่างๆ เป็นต้น ในกรณีที่ท่อมีความยาวมาก การสูญเสียรองนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียอันเกิดจากความเสียดทาน ซึ่งอาจจะไม่ต้องนำมาคิดการสูญเสียก็ได้ ดังนั้นสมการที่ใช้หาค่าการสูญเสียรองจึงอยู่ในรูปของเสดความเร็ว  $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$  คูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย เขียนเป็นสมการได้คือ

$$h = k \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

โดย  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียจะขึ้นอยู่กับลักษณะช่องทางที่ของไหลผ่านซึ่งมีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียที่ทางเข้าท่อ (loss of head at entrance) จากรูปที่ 3.2 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่บริเวณปากทางเข้า ( $k_e$ ) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าถ้าเราทำบริเวณปากทางเข้าให้มีลักษณะเป็น Bell-mouth นั้นจะทำให้ค่าการสูญเสียมีค่าน้อยสุด เนื่องจากจะไม่บีบตัวเข้าหากัน (Contraction of stream) เพื่อไหลเข้าท่อและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 แสดงสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ทางเข้า



# บทที่ 4

## ระบบแรง

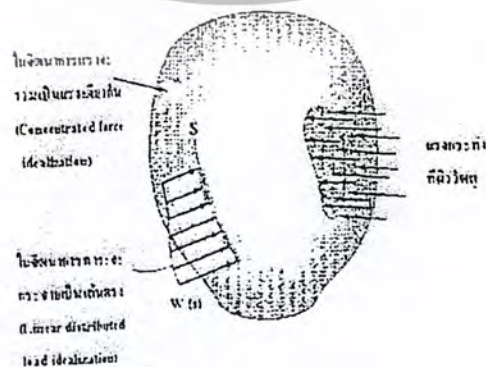
### 4. การสมดุลของวัตถุ (Equilibrium of a Deformation Body)

โครงสร้างทุกประเภทที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนของวัสดุ (Member) หลายๆ ชิ้นส่วนมาประกอบกัน อาทิ พวกเครื่องจักรต่างๆ แต่ละชิ้นส่วนจะต้องถูกแรงกระทำจากภายนอกด้วยกันทั้งสิ้น โดยอาจจะเกิดขึ้นจากโครงสร้างนั้นอยู่ในขณะกำลังใช้งาน จะเห็นว่าถ้าส่วนประกอบหรือชิ้นส่วนต่างๆ อยู่ใน สภาวะสมดุล (Equilibrium) แสดงว่าต้องมีกำลัง (Strength) อยู่ภายในชิ้นส่วนที่ต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้ กำลังภายในดังกล่าว หากแสดงในรูปของแรงก็คือแรงภายใน (Internal force) ที่มีขนาดอย่างน้อยที่สุดก็เท่ากับแรงกระทำภายนอก และทำให้ผลของแรงทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ภาระ (load) ที่กระทำต่อวัตถุแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

#### 4.1 ภาระภายนอก (External load)

มีความแตกต่างกันหลายรูปแบบสำหรับภาระภายนอก ซึ่งเราจะแบ่งตามแรงที่กระทำต่อผิวของวัตถุ (Surface force) และแรงที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุ (Body force)

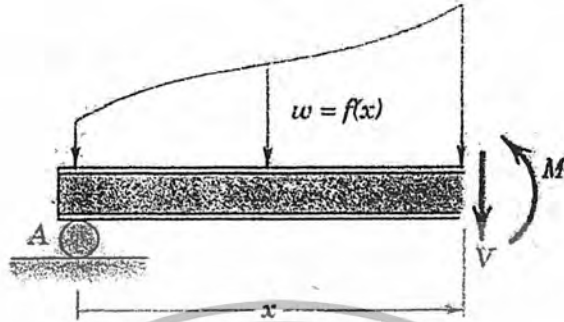
แรงที่กระทำต่อวัตถุเป็นแรงที่กระทำต่อผิวสัมผัส โดยกระจายอยู่บนพื้นที่สัมผัสระหว่างวัตถุ (Surface force) จากรูป 4.1 พื้นที่นั้นเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ทั้งหมดของวัตถุและแรงที่กระทำต่อผิววัตถุนี้สามารถที่จะกำหนด หรือแทนด้วยแรงรวมจุดเดียวได้ (Connetrated Force Idealization) ซึ่งเรากำหนดให้เป็นดังรูป 4.1 สำหรับตัวอย่าง เช่น รถจักรยานสองล้อ เมื่อศึกษาถึงภาระ (Loading) บนรถจักรยาน แรงที่กระทำต่อพื้นผิวของล้อเป็นพื้นที่ความยาวแคบๆ (Long and Narrow Area) อาจจะเป็นภาระ (Load) ที่กระจายเป็นเส้นตรงก็ได้ (A Linear Distribution Load,  $W(S)$ ) ในที่นี้ Loading ถูกวัดออกมาเป็นความเข้มของแรงต่อความยาว (Intensity of Force / Length) ตลอดพื้นที่ และถูกแทนด้วยกราฟต่อกันด้วยสัญลักษณ์ยาวตลอดเส้น  $S$  ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แรงกระทำที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระทำของภาระตลอดความยาวของคาน (Beam) เป็นตัวอย่างอีกตัวอย่างในเรื่องนี้ซึ่งภาระนี้ถูกแทนด้วยแรงลัพธ์ตลอดความยาวเส้น  $S$  แรงลัพธ์นี้จะสมมูลย์ต่อพื้นที่ภายใต้แรงกระจาย (Distributed Loading Curve) และแรงลัพธ์นี้จะกระทำที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงแรงกระทำที่ผิววัตถุ

4.2 แรงจากน้ำหนักวัตถุ (Body Force)

เกิดขึ้นเมื่อวัตถุหนึ่งใช้แรงกระทำกับอีกวัตถุหนึ่ง โดยวัตถุหนึ่งปราศจากการติดต่อกันโดยตรงระหว่างวัตถุตัวอย่างก็คือ ผลของแรงดึงดูดของโลกหรืออำนาจสนามแม่เหล็กถึงแม้ว่าแรงของวัตถุจะมีผลต่ออนุภาค (Particle) เล็กๆ ของส่วนประกอบของวัตถุ แรงเหล่านี้จะถูกแทนด้วยแรงๆเดียว (Single Concentrated Force) ที่กระทำต่อวัตถุในกรณีของแรงดึงดูดของโลก เราเรียกว่า น้ำหนักของวัตถุ โดยกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงปฏิกิริยารองรับ (Support Reaction)

แรงที่พื้นผิว (Surface Force) จะถูกกำหนดเป็นจุดรองรับ (Support) ระหว่างวัตถุซึ่งถูกเรียกว่าแรงปฏิกิริยา (Reaction) สำหรับวัตถุผิวราบ (Coplaner) ดูแรงปฏิกิริยาได้จากตาราง 4.1

MODELING THE ACTION OF FORCES IN TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS		MODELING THE ACTION OF FORCES IN TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS (cont.)	
Type of Contact and Force Origin	Action on Body to be Isolated	Type of Contact and Force Origin	Action on Body to be Isolated
<p>1. Flexible cable, belt, chain, or rope</p> <p>Weight of cable negligible</p> <p>Weight of cable not negligible</p>	<p>Force exerted by a flexible cable is always a tension away from the body in the direction of the cable.</p>	<p>6. Pin connection</p>	<p>Pin free to turn</p> <p>Pin not free to turn</p> <p>A freely hinged pin connection is capable of supporting a force in any direction in the plane normal to the axis; usually shown as two components <math>R_x</math> and <math>R_y</math>. A pin not free to turn may also support a couple <math>M</math>.</p>
<p>2. Smooth surfaces</p>	<p>Contact force is compressive and is normal to the surface.</p>	<p>7. Built-in or fixed support</p>	<p>A built-in or fixed support is capable of supporting an axial force <math>F</math>, a transverse force <math>V</math> (shear force), and a couple <math>M</math> (bending moment) to prevent rotation.</p>
<p>3. Rough surfaces</p>	<p>Rough surfaces are capable of supporting a tangential component <math>F</math> (frictional force) as well as a normal component <math>N</math> of the resultant contact force <math>R</math>.</p>	<p>8. Gravitational attraction</p>	<p>The resultant of gravitational attraction on all elements of a body of mass <math>m</math> is the weight <math>W = mg</math> and acts toward the center of the earth through the center mass <math>G</math>.</p>
<p>4. Roller support</p>	<p>Roller, rocker, or ball support transmits a compressive force normal to the supporting surface.</p>	<p>9. Spring action</p> <p>Neutral position</p> <p>Linear</p> <p>Nonlinear</p> <p>Hardening</p> <p>Softening</p>	<p>Spring force is tensile if spring is stretched and compressive if compressed. For a linearly elastic spring the stiffness <math>k</math> is the force required to deform the spring a unit distance.</p>
<p>5. Freely sliding guide</p>	<p>Collar or slider free to move along smooth guides; can support force normal to guide only.</p>		

ตารางที่ 4.1 แสดงการใช้สัญลักษณ์แทนจุดรองรับและประเภทของแรงปฏิกิริยาที่ถูกใช้กับโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สมการการสมดุล (Equation of Equilibrium)

ในทางวิศวกรรม จะใช้หลักการสมดุล ซึ่งมี 2 ลักษณะดังนี้

1. การสมดุลของแรง : วัตถุจะอยู่ที่ต่อเมื่อ

- ผลรวมของแรงในแนวแกนมีค่าเป็นศูนย์ ( $\sum F = 0$ )

2. การสมดุลของโมเมนต์ : โมเมนต์จะสมดุลก็ต่อเมื่อ

- ผลรวมของโมเมนต์รอบจุดหมุนของแกนมีค่าเป็นศูนย์ ( $\sum M = 0$ )

ในการคิดค่าภาระของวัตถุใน 3 แกน เราจะใช้การสมดุลของแรงและโมเมนต์ ดังนี้

- ผลรวมของแรงในแนวแกน  $X = 0, (\sum F_x = 0)$

- ผลรวมของแรงในแนวแกน  $Y = 0, (\sum F_y = 0)$

- ผลรวมของแรงในแนวแกน  $Z = 0, (\sum F_z = 0)$

- ผลรวมของโมเมนต์รอบแกน  $X = 0, (\sum M_x = 0)$

- ผลรวมของโมเมนต์รอบแกน  $Y = 0, (\sum M_y = 0)$

- ผลรวมของโมเมนต์รอบแกน  $Z = 0, (\sum M_z = 0)$

ในทางปฏิบัติภาระหรือโหลด (Loading) บนวัตถุสามารถแทนด้วย Coplaner Force และใช้การสมดุลสเกลาร์ ดังนี้

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0 \quad (4.1)$$

ในที่นี้จุด O เป็นจุด Origin of Coordinates โมเมนต์จะหมุนรอบแกน Z การนำสมการการสมดุล ไปใช้งานต้องเขียน โค้ดแกรมรูปอิสระ (Free Body Diagram) ก่อนการหาแรงหรือภาระภายในที่กระทำ

## บทที่ 5

### เฟืองตรง

เฟืองตรง (spur gear) เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่พบอยู่ในเครื่องจักรกลทั่วไป โดยใช้ทำหน้าที่ส่งกำลังและการหมุนจากเพลานึงไปยังอีกเพลานึงที่ขนานกันส่วนมากเฟืองขับ (driving gears) จะมีขนาดเล็กกว่าเฟืองตาม (driven gears) และมีชื่อเรียกพิเศษว่า พิเนียน (pinion) ส่วนเฟืองใหญ่เรียกว่าเฟือง แต่ในการใช้งานบางโอกาสก็อาจใช้เฟืองใหญ่ขับก็เป็นได้ เนื่องจากว่าเฟืองที่ผลิต และใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ยังคงใช้ระบบหน่วยอังกฤษอยู่เห็นส่วนมาก ซึ่งก็จำเป็นต้องการเปลี่ยนเฟืองของเครื่องจักรที่ชำรุดเสียหาย ฉะนั้นเฟืองในระบบหน่วยอังกฤษก็ยังคงผลิตออกมาอีกเป็นเวลานาน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหรือการเลือกขนาดเฟืองทั้งในระบบหน่วยอังกฤษและระบบหน่วยเอสไอ (SI) ควบคู่กันไป



รูปที่ 5.1 การเรียกชื่อส่วนของฟันเฟือง

#### 5.1 มาตรฐานการบอกขนาดของฟันเฟือง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ดัชนีสำหรับบอกขนาดของฟันเฟือง อาจจะถูกเป็นพิตซ์ในระบบหน่วยอังกฤษ หรือบอกเป็นโมดูลในระบบหน่วยเอสไอ จากคำจำกัดความที่ผ่านมาจะได้ว่า

$$\text{ไดอะมิทรีลพิตซ์} \quad P = \frac{N}{d} \quad \text{โดยที่ } d \text{ มีหน่วยเป็น in} \quad (5.1)$$

$$\text{โมดูล} \quad m = \frac{d}{N} \quad \text{โดยที่ } d \text{ มีหน่วยเป็น mm} \quad (5.2)$$

$$\text{และเซอควิลลาพิตซ์} \quad p = \frac{\pi d}{N} = \pi m \quad (5.3)$$

$$\text{คังนั้่น} \quad P_p = \pi \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

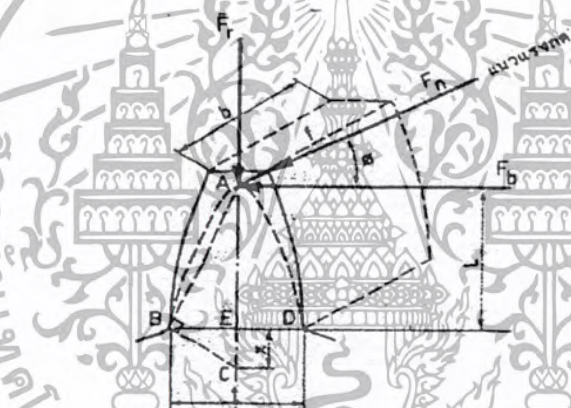
## 5.2 ความเค้นในพื้นเพื่องตรง

การออกแบบเพื่องเป็นปัญหาที่ค่อนข้างยาก ทั้งนี้เพราะการออกแบบขั้นต้นต้องกระทำใช้การทดลองดู การออกแบบขนาดของพื้นเพื่องมีอยู่หลายวิธี ที่จะกล่าวต่อไปนี้คือ การใช้สมการของลูอิส (Lewis)

ลูอิสได้หาสมการสำหรับการคำนวณขนาดของเพื่อง โดยสมมติให้พื้นเพื่องมีลักษณะเป็นคานยื่น (cantilever beam) และรับแรงดังรูป 5.1 ถ้าคิดให้แรงกระทำที่ปลายพื้น แรงพื้น  $F_n$  จะตั้งฉากกับผิวของพื้นไปตามแนวแรงกด ซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองแรงตั้งฉากกันคือ  $F_b$  และ  $F_r$  สมมติให้แรงนี้กระจายออกไปสม่ำเสมอตลอดความหนาของพื้น  $b$  และให้คำนวณหาความแข็งแรงของพื้น โดยที่ไม่คิดแรงกดในแนวรัศมี  $F_r$  จากสมการความเค้นในคาน

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(F_b L)(t/2)}{bt^3/12} = \frac{6F_b L}{bt^2} \quad (5.5)$$

$$F_b = \frac{\sigma bt^2}{6L} \quad (5.6)$$



รูปที่ 5.2 ตัวประกอบเรขาคณิตที่ใช้หาตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

ในการออกแบบคานที่ดี ความเค้นความจะเท่ากันตลอดทุกหน้าตัดของคาน ถ้าให้พื้นในรูป 5.2 มีความเค้นคงที่ ( $\sigma =$  ค่าคงที่) และเนื่องจากความหนาของเพื่อง  $b$  เท่ากันตลอด ดังนั้นสมการ (5.6) จะเขียนได้เป็น

$$L = (\text{ค่าคงที่})(t^2) \quad (5.7)$$

จากสมการ (5.7) จะเห็นได้ว่าพื้นเพื่องจะต้องมีรูปร่างเป็นพาราโบลา ดังเส้นประในรูป 5.2 แต่ในเพื่องอินโวลูตเนื้อโลหะจะเพิ่มขึ้นจากพาราโบลาดังในรูป ดังนั้นพื้นเพื่องที่ใช้งานอยู่จริง ความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่หน้าตัด BDE

จากสามเหลี่ยมคล้าย ABE และ BCE จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{x}{t/2} = \frac{t/2}{L} \text{ หรือ } L = \frac{t^2}{4x} \quad (5.8)$$

เมื่อแทนค่า  $L$  นี้ลงในสมการ (5.6) จะได้ว่า

$$F_b = \sigma b \left[ \frac{2x}{3p} \right] p \quad (5.9)$$

โดยที่  $p$  เป็นเซอคิวลาร์พิทช์ ละค่า  $\left[ \frac{2x}{3p} \right]$  เรียก ตัวประกอบรูปแบบของลูอิส (Lewis form factor) ใช้แทนด้วย  $y$  จึงทำให้เขียนสมการได้เป็น

$$F_b = \sigma b y p \quad (5.10)$$

เนื่องจากเฟืองในระบบหน่วยอังกฤษใช้บอกด้วยไดอะมิเตอร์พิทช์  $P_d$  ซึ่ง  $P = \frac{\pi}{P_d}$  ดังนั้นสมการ (5.10) จึงเขียนได้เป็น

$$F_b = \frac{\sigma b Y}{P} \quad (5.11)$$

โดยที่  $Y = \pi y$  เป็นตัวประกอบรูปแบบของลูอิสเช่นกัน สำหรับในระบบหน่วยเอสไอ ใช้บอกขนาดของเฟืองด้วยโมดูล ดังนั้น

$$F_b = \sigma b Y m \quad (5.12)$$

ค่า  $y$  และ  $Y$  นี้สามารถหาได้โดยการคำนวณรูปร่างของฟันเฟืองและหาได้จากตาราง 5.1

เนื่องจากแรงที่กระทำกับฟันเฟืองเป็นแบบกระทำซ้ำกัน และมีความถี่ตามความเร็วของเฟือง ดังนั้น เฟืองจึงแตกร้าวโดยผลจากความล้า (fatigue) เสียส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้นค่าความเค้นใช้งาน  $\sigma$  ในสมการ (5.10), (5.11) และ (5.12) จึงต้องเป็นความต้านแรงทนทาน (endurance strength) ดังตาราง 5.3 ซึ่งแสดงค่าความเค้นใช้งานสำหรับวัสดุชนิดต่างๆที่ใช้ทำเฟือง

ในทางปฏิบัติมักจะออกแบบเฟืองให้มีอัตราขบอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.6 ดังนั้นในขณะที่แรงที่กระทำอยู่ที่ปลายฟันเฟืองหนึ่งฟันคู่ถัดไปก็ยังคงสัมผัสกันอยู่ ฉะนั้นแรงทั้งหมดจึงมิได้กระทำที่ปลายฟัน เพราะมีฟันคู่อื่นช่วยรับแรงอยู่ ในขณะที่เฟืองหมุนไปแรงที่ปลายฟันจะค่อยๆ เคลื่อนลงมาจนถึงปลายฟันฟันอีกคู่หนึ่งจะผลออกจกกัน ด้วยเหตุนี้เองแรงทั้งหมดจึงกระทำต่อฟันเฟืองใกล้กับกลางฟัน (ยกเว้นในกรณีที่มี  $m_c \leq 1$ ) จากการทำงานของฟันเฟืองดังที่กล่าวมานี้ทำให้ไม่สามารถที่จะตัดสินลงไป

ได้ว่า เมื่อใดค่าความเค้นในเฟืองมากที่สุด สำหรับการออกแบบเฟืองเพื่อใช้งานทั่วไปแล้ว มักสมมติให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงทั้งหมดกระทำที่ปลายฟิน ส่วนชิ้นงานที่ต้องคำนึงถึงขนาด และน้ำหนักเป็นสำคัญแล้วมักจะใช้การคำนวณโดยคิดให้แรงกระทำใกล้กับกลางฟินเพื่อ

ตามทฤษฎีการคำนวณหาขนาดฟินเพื่องดกล่าวมาแล้ว ได้ตัดทิ้งแรง  $F_r$  ในรูป 5.2 ที่กดฟินอยู่ แรงที่กดฟินอยู่ แรงนี้จะทำให้เกิดอัดในฟิน จะเป็นผลให้ความเค้นในด้านหนึ่งของฟินลดลงและความเค้นอัดในอีกด้านหนึ่งของฟินเพิ่มความเค้นอัดเพิ่มขึ้นในฟิน ซึ่งเมื่อรวมกับความเค้นเนื่องจากแรง  $F_b$  แล้วแรง  $F_b$  ทำให้ความเค้นดึงและความเค้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุส่วนมากที่ใช้ทำฟินสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าแรงดึง ฉะนั้นแรง  $F_r$  ที่ตัดทิ้งไปนี้ ดังนั้นการลดความเค้นดึงในด้านนี้จึงทำให้ฟินเพื่องแข็งแรงขึ้นอีก

ในการคำนวณหาแรง ช่วยให้ฟินสามารถรับแรงได้สูงขึ้นอีก อีกประการหนึ่งก็คือ ความล้าที่เกิดขึ้นมักจะเกิดในฟินด้านที่รับแรงดึง  $F_b$  ที่ฟินเพื่องสามารถรับได้โดยใช้สมการ (5.10), (5.11) และ (5.12) นั้นได้สังเกตดังต่อไปนี้ สำหรับฟินที่มาขบกันคู่หนึ่งจะมีค่าความหนา  $b$  และโมดูลหรือพิตช์เท่ากัน ดังนั้นฟินอันที่รับแรงน้อยกว่าคืออันที่มีค่า  $\sigma Y$  น้อยกว่า ถ้าพิเนียนและฟินทำด้วยวัสดุเดียวกันแล้ว จากตาราง 5.2 จะเห็นได้ว่าค่า  $Y$  ของพิเนียนจะน้อยกว่าของฟิน (ฟินมีจำนวนฟินมากกว่า) ดังนั้นพิเนียนจะรับแรงได้น้อยกว่าฟิน เมื่อเป็นเช่นนั้นในการคำนวณหาขนาดของฟินจึงต้องคำนวณที่พิเนียน



ตารางที่ 5.1 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

จำนวน คน	แรงกระทำที่ปลาย								แรงกระทำใกล้กึ่งกลาง			
	14°FD		20°FD		20°Stub		25°		14°FD		20°FD	
	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y
10	0.176	0.056	0.201	0.064	0.261	0.083						
11	0.192	0.061	0.226	0.072	0.289	0.092						
12	0.210	0.067	0.245	0.078	0.311	0.099	0.242	0.077	0.355	0.113	0.415	0.133
13	0.223	0.071	0.264	0.083	0.324	0.103	0.258	0.082	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.075	0.276	0.088	0.339	0.108	0.270	0.086	0.399	0.127	0.468	0.149
15	0.245	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.286	0.091	0.415	0.133	0.490	0.156
16	0.255	0.081	0.295	0.094	0.360	0.115	0.298	0.095	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.311	0.099	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.324	0.103	0.459	0.146	0.522	0.167
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.336	0.107	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.125	0.349	0.111	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.365	0.116	0.490	0.156	0.553	0.177
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.377	0.120	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.132	0.403	0.128	0.509	0.162	0.572	0.183
25	0.305	0.097	0.340	0.108	0.416	0.133	0.415	0.132	0.515	0.164	0.580	0.184
26	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.135	0.428	0.136	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.438	0.133	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.409	0.130	0.534	0.170	0.592	0.189
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.412	0.131	0.537	0.171	0.599	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.418	0.133	0.540	0.172	0.606	0.193
31	0.320	0.101	0.361	0.115	0.440	0.140	0.421	0.134	0.554	0.173	0.611	0.195
32	0.322	0.101	0.364	0.116	0.443	0.141	0.428	0.136	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.445	0.142	0.430	0.137	0.550	0.175	0.623	0.198
34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.434	0.138	0.553	0.177	0.628	0.200
35	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.437	0.139	0.556	0.177	0.633	0.201
36	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.443	0.141	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.144	0.446	0.142	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.455	0.145	0.450	0.143	0.565	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.457	0.146	0.454	0.144	0.568	0.181	0.655	0.209
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.459	0.146	0.460	0.146	0.570	0.182	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.467	0.147	0.463	0.147	0.574	0.183	0.668	0.212
45	0.340	0.108	0.399	0.127	0.468	0.149	0.469	0.149	0.579	0.184	0.678	0.214
50	0.346	0.110	0.408	0.130	0.474	0.151	0.478	0.152	0.588	0.187	0.694	0.221
55	0.352	0.112	0.415	0.132	0.480	0.153	0.485	0.154	0.596	0.190	0.704	0.224
60	0.355	0.113	0.421	0.134	0.484	0.154	0.490	0.156	0.603	0.192	0.713	0.227
65	0.358	0.114	0.425	0.135	0.488	0.155	0.496	0.158	0.607	0.193	0.721	0.229
70	0.360	0.115	0.429	0.136	0.493	0.157	0.502	0.160	0.610	0.194	0.728	0.231
75	0.361	0.115	0.433	0.138	0.496	0.158	0.508	0.161	0.613	0.195	0.735	0.233
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.499	0.159	0.510	0.162	0.615	0.196	0.739	0.235
90	0.366	0.117	0.442	0.141	0.503	0.160	0.516	0.164	0.619	0.197	0.747	0.237
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.506	0.161	0.521	0.166	0.622	0.198	0.755	0.240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติต่างๆของพลาสติก

พลาสติก													
ชื่อ	ชื่อทางเคมี	ชื่อในท้องตลาด	ความหนาแน่น	ความแข็งแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง N/cm <sup>2</sup>	ความเหนียวในการฉีก K/cm	ความยืดหยุ่นของแข็งที่อุณหภูมิใช้งาน	ทนต่อสารเคมี 20°C						ตัวอย่างการใช้งาน
							กรดอินทรีย์	เบสอินทรีย์	Hydrophobic	Trichloro	แอลกอฮอล์	อื่นๆ	
PE	Polyethylene	Baylon, Hostalene, Lupolene, Vestolene	0.92...0.96	9...25	☺**	100...120	●	●	●	●	●	●	กล่อง ฟิล์มบรรจุกล่องแบบพับ Control device ชิ้นงานเครื่อง
EVA	Ethylene-Copolymer	Lupaprene, Lupolene V	0.94	4.5*	☺**	≈80	●	●	○	○	●	●	หลักฉนวนกันรังสี การกั้นกัน ซีลสังกะสี
PP	Polypropylene	Hostalene PP, Novolene, Vestolene P	0.91	33*	7**	≈140	●	●	○	○	●	●	ชิ้นส่วนที่มีความร้อน-ไดนามิก ในเครื่องยนต์
PS	Polystyrene	Hostyrene, Polystyrol, Vestyron	1.05	56*	18	≈65	●	○	○	○	●	●	ฉนวนของห้องปฏิบัติการ Inspection glass
SB	Polystyrol, หนาแข็ง, กว้าง	Polystyrol 400, Vestyron 500, Hostyrene S	1.05	20...40	7...10**	≈75	●	○	○	○	●	●	เครื่องกลึง ชิ้นตามในตู้เย็น
SAN	Polystyrol-Acrylnitril	Luran 300, Vestaron	1.08	75	18	≈90	●	●	○	○	●	●	กล่องแปดเหลี่ยม เครื่องมือวัดละเอียด
ABS	ABS-Copolymer	Terluran, Novodure	≈1.10	35...55	7...10**	≈90	●	●	○	○	●	●	กล่อง ฝา Housing
PVC แข็ง	Polyvinylchloride hart	Hostalite, Vinolite, Vestalite, Vinnol	≈1.38	≈55	4**	≈70	●	●	○	○	●	●	หม้อน้ำ ฟิล์มบรรจุกล่อง Profile
PVC อ่อน	Polyvinylchloride weich		≈1.35	50	15...20**	≈70	●	●	○	○	●	●	กรอบหน้าต่าง รางน้ำ
PVC อ่อน (ชนิดพิเศษ)	Wach-Polyvinylchloride DTP		1.2...1.3	10...20	☺**	40...60	●	●	○	○	●	●	สายยาง กระดาษพลาสติก กระเบื้องยาง เบาะ
PTFE	Polytetrafluoräthylen	Hostolon TF, Teflon	> 2.1	20...30	16**	260	●	●	●	●	●	●	รางเลื่อน เคสคอมพิวเตอร์
PMMA	Polymethylmethacrylat	Plexiglas, Resorlin, Degalin	1.18	70	10	70...90	●	●	○	○	●	●	glazing, lighting coating road วัสดุประสมพลาสติก
POM	Polyformaldehyde	Delrin, Hostalorm, Ultracorm	1.4...1.7	70	5...9**	100...150	●	●	○	○	●	●	เฟือง แปรง
PC	Polycarbonate	Macrolon	1.20	5	20**	90...130	●	●	○	○	●	●	ชิ้นส่วนเครื่อง-เครื่องมือหนัก เครื่องภายในครัว
PA	Polyamide 6-Polyamide 12-Polyamide 6.6-Polyamide 6.10-Polyamide	Ultramid, Durstamid, Rilsano, Trogamid	1.01...1.14	50...70	15**	60...140	●	●	○	○	●	●	เฟือง หรือ สายพาน-สาย Perlon-Nylon โยใย เทอร์โมพลาสติก การเชื่อมสาย

\* ค่าที่หาพบในท้องตลาด      \*\* ค่าความเหนียวของร่องนิก      ☺ มีค่าทดสอบไม่หนัก  
 ● ทนทานดีมาก      ○ ทนทานปานกลาง      ○ ไม่ทนทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ความเค้นหนาแน่น

ตัวประกอบที่สำคัญอีกค่าหนึ่ง ที่มีผลต่อความแข็งแรงของฟันเฟืองมาก และมีได้รวมอยู่ในสมการของลูอิสคือค่าความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่โคนฟันเฟืองซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อกันระหว่างอินโวลูตเคอฟ และวงกลมดีเคนดรัม และจะมีฟิลเลต(fillet) รัศมี  $r$  การหาค่าตัวประกอบความหนาแน่นทางทฤษฎี  $K_t$  (theoretical stress) สำหรับฟันเฟืองเป็นสิ่งที่ทำได้ยากมากจึงมีเพียงผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้วัสดุยืดหยุ่นโปร่งแสง (photoelasticity material) ของ Dolan และ Broghamer ซึ่งได้สมการออกมาลักษณะดังนี้คือ

$$K_t = 0.222 + \left[ \frac{t}{r} \right]^{0.2} \left[ \frac{t}{L} \right]^{0.4} \quad \text{สำหรับ } \phi = 14.5^\circ \quad (5.13)$$

$$K_t = 0.18 + \left[ \frac{t}{r} \right]^{0.15} \left[ \frac{t}{L} \right]^{0.45} \quad \text{สำหรับ } \phi = 20^\circ \quad (5.14)$$

$$K_t = 0.14 + \left[ \frac{t}{r} \right]^{0.11} \left[ \frac{t}{L} \right]^{0.5} \quad \text{สำหรับ } \phi = 25^\circ \quad (5.15)$$

โดย  $t$  เป็นความหนาของฟันเฟือง และ  $L$  เป็นระยะห่างของแรง  $F_b$  กับหน้าตัด BED ดังรูป 5.2

ในทางปฏิบัติค่า  $t, L$  และ  $r$  เป็นค่าที่ไม่สามารถจะทราบได้ล่วงหน้าก่อนที่จะออกแบบฟันเฟือง นอกจากนี้ยังมีตัวประกอบอย่างอื่นอีก เช่น ความเรียบของผิวหน้า และตัวประกอบความไวของรอยเจาะ  $q$  (notch sensitivity factor) มาเกี่ยวข้องในการหาค่าความเค้นหนาแน่นอีกด้วย ดังนั้นในการคำนวณเกี่ยวกับฟันเฟืองจึงให้ใช้ค่าประมาณดังนี้คือ

$$1.2 \leq K_f \leq 1.7 \quad \text{เมื่อให้แรงกระทำที่ปลายฟัน}$$

$$1.4 \leq K_f \leq 2.0 \quad \text{เมื่อให้แรงกระทำใกล้กลางฟัน}$$

โดย  $K_f$  เป็นตัวประกอบความหนาแน่นจริง (actual stress concentration factor) ดังนั้นสมการ (5.10), (5.11) และ (5.12) จึงเขียนได้เป็น

$$F_b = \frac{\sigma_b y p}{K_f} \quad (5.16)$$

$$F_b = \frac{\sigma_b y}{K_f p} \quad (5.17)$$

$$F_b = \frac{\sigma_b Y m}{K_f} \quad (5.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพิตช์หรือ โมดูลที่ใช้ในการออกแบบให้ใช้ตามมาตรฐานดังแสดงในตาราง 5.1

สำหรับการออกแบบเฟืองทั่วไปอาจสมมุติให้ความหนาของฟันเฟืองมีค่าดังต่อไปนี้

$$\frac{8}{p} < b < \frac{12.5}{p} \quad \text{หรือ} \quad 8m < b < 12.5m$$

ในกรณีที่เนื้อที่ในการติดตั้งเฟืองมีน้อย ก็อาจจะออกแบบให้ความหนาเฟืองน้อยกว่าค่าที่แนะนำเอาไว้ก็ได้ ถ้าความหนาของเฟืองน้อยเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาในการตั้งศูนย์ (alignment) เฟืองที่ขบกัน แต่ถ้าความหนาเฟืองมากเกินไปอาจทำให้เฟืองบิด อันเนื่องมาจากการกระจายแรงไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาฟันเฟือง

#### 5.4 แรงพลวัต

จากที่ผ่านมาเป็นการคำนวณหาขนาดของฟันเฟืองโดยคิดให้แรง  $F_b$  อยู่หนึ่ง แล้วใช้ความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุหาสมการสำหรับแรงที่ฟันเฟืองควรจะได้รับเอาไว้ได้ ในทางด้านปฏิบัติเฟืองจะหมุนอยู่ในขณะใช้งานและ แรงที่ส่งผ่านมายังฟันเฟืองจะคำนวณได้จากสมการ

$$F_t = \frac{W_p}{V} \quad (5.19)$$

โดยที่  $F_t$  = แรงเป็น N  
 $W_p$  = กำลังงานที่ส่งผ่านเป็น W  
 $V$  = ความเร็วพิตช์ (pitch line speed) เป็น  $\frac{m}{s}$   
 หรือในระบบหน่วยอังกฤษ จะคำนวณหาแรงได้จากสมการ

$$F_t = \frac{33,000hp}{V} \quad (5.20)$$

โดยที่  $F_t$  = แรงเป็น N  
 $V$  = ความเร็วพิตช์ เป็น  $\frac{ft}{min}$

ตามปกติแล้วแรงที่ส่งผ่านจะมีค่ามากกว่าแรงที่หาค่าได้จากสมการ (5.19) หรือ (5.20) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากตัวประกอบต่างๆ เช่น ความผิดพลาดในการตัดรูปร่างของฟันเฟือง ค่าเบี่ยงลัดทำให้เกิดการกระแทกขึ้น เป็นต้น จากการทดลองพบว่า แรงที่ส่งผ่านมาที่แท้จริงขึ้นอยู่กับความเร็วพิตช์เรียกว่า

$K_v$  (velocity factor) ดังนั้นแรงที่กระทำต่อฟันเฟืองในขณะใช้งานได้ควรจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_d = K_v F_t \quad (5.21)$$

ค่า  $F_d$  นี้เรียกว่าแรงพลวัต (dynamic load) ส่วน  $K_v$  สำหรับหน่วยเอสไอจะหาได้จากสมการ

$$K_v = \frac{3+V}{3} \quad \text{สำหรับเฟืองทั่วไป } V \leq 10 \frac{m}{s} \quad (5.22)$$

$$K_v = \frac{6+V}{6} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดอย่างดี } 5 < V < 20 \frac{m}{s} \quad (5.23)$$

$$K_v = \frac{5.56 + \sqrt{V}}{5.56} \quad \text{สำหรับเฟืองตัดอย่างดีมาก } V \geq 20 \frac{m}{s} \quad (5.24)$$

ค่า  $K_v$  สำหรับหน่วยอังกฤษจะหาได้จากสมการ

$$K_v = \frac{600+V}{600} \quad \text{สำหรับเฟืองทั่วไป } V \leq 2000 \frac{ft}{min} \quad (5.25)$$

$$K_v = \frac{1200+V}{1200} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดมาอย่างดี } 1000 < V < 4000 \frac{ft}{min} \quad (5.26)$$

$$K_v = \frac{78 + \sqrt{V}}{78} \quad \text{สำหรับเฟืองตัดอย่างดีมาก } V \geq 4000 \frac{ft}{min} \quad (5.27)$$

ในการคำนวณหาขนาดของฟันเฟือง ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่าแรงพลวัตนี้มากกว่าแรงที่ฟันเฟืองจะรับได้หรือไม่ และให้ถือว่าฟันเฟืองแข็งแรงพอเมื่อ  $F_b \geq F_d$  โดยที่สมมติว่าแรง  $F_b$  กระทำที่ปลายฟัน การที่จะทำให้  $F_b$  มากกว่า  $F_d$  เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดแรงที่ทำนั้คือ

$$\frac{F_b}{F_d} = N_s \quad (5.28)$$

โดยที่  $N_s$  เรียกว่าตัวประกอบใช้งาน (service factor) และให้ใช้ค่าโดยประมาณ ซึ่งแสดงไว้ในตาราง 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของแรง	$N_s$	ตัวอย่าง
แรงเรียบสม่ำเสมอ	1.00 - 1.25	พัดลมไฟฟ้า
แรงกระแทกเล็กน้อย	1.25 - 1.50	เครื่องเจ้าน้ำบาดาล, เครื่องมือลม
แรงกระแทกอย่างหนัก	1.50 - 2.00	เครื่องบดหิน

ตารางที่ 5.4 ตัวประกอบใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สปริง

สปริงเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมีโซ่อยู่ในเครื่องจักรกลทั่วไป ถึงแม้ว่าชิ้นส่วนอื่นๆของเครื่องจักรกลจะมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นเหมือนกัน แต่สปริงจะมีการยืดหยุ่นมากกว่า สปริงอาจจะมีรูปร่างต่างกันและทำจากวัสดุหลายชนิด แม้แต่ของไหล เช่น อากาศ ก๊าซ และของเหลว ก็สามารถนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นสปริงได้ สปริงที่จะกล่าวถึงในบทนี้ส่วนมากทำจากโลหะและโลหะผสม แต่พวกอโลหะบางชนิดก็กำลังเริ่มเข้ามาสู่ความสนใจของนักออกแบบที่จะนำมาใช้ทำสปริง สปริงอาจทำหน้าที่ได้หลายประเภทดังนี้

- ใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับกลไกต่างๆ งานประเภทนี้ได้ใช้กันมาตั้งแต่ดั้งเดิมและก็ยังคงจะมีใช้กันมากต่อไปอีก เช่น ลานนาฬิกา กล้องถ่ายภาพนิ่ง และของเด็กเล่น เป็นต้น
- ใช้วัดแรง เช่น ตาชั่งสปริง ไคนาโมมิเตอร์ และอุปกรณ์ปรับค่างๆ เป็นต้น
- ใช้ทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม เช่น ตัวตามลูกเบี้ยว (Cam followers) ก้านวาล์ว เป็นต้น
- ใช้ส่งแรงจากชิ้นส่วนหนึ่งไปยังอีกชิ้นส่วนหนึ่ง เช่น สปริงแผ่นกลัดซ์ คัปปลิง เป็นต้น

#### 6.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ค่าความต้านแรงของวัสดุที่ใช้ทำลวดสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของลวดสปริง ดังนั้นจึงอาจเขียนในรูปสมการที่ใช้หาค่าความต้านแรงของวัสดุลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ ได้ดังนี้คือ

$$\sigma_u = \frac{A}{d^x} \quad (6.1)$$

$$\tau_n = \frac{B}{d^y} \quad (6.2)$$

โดยที่  $\sigma_u$  คือความต้านแรงดึงต่ำสุด

$\tau_n$  คือความต้านแรงเฉือนทนทาน

$d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเป็น  $mm$

ค่าคงที่โดยประมาณของสมการที่ (6.1) และสมการที่ (6.2) แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ค่าความต้านแรงมีหน่วยเป็น  $\frac{N}{mm^2}$  และค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่เรียบเรียงมาจากหนังสือของ V.M.FAIRES เพื่อใช้เป็น

ตัวอย่างข้อมูลในการคำนวณ ถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องใช้สมการที่ (6.1) และ (6.2) กับลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าในตารางที่ 6.1 ก็อนุโลมให้สามารถใช้ได้

ชนิดของวัสดุ	ขนาดลวด (mm)	x	y	A	B
Hard drawn wire (ASTM A227)	0.50 – 16.00	0.190	0.340	1780	560
Music wire (ASTM A228)	0.10 – 6.35	0.154	0.154	2150	565
Oil tempered wire (ASTM A229)	0.50 – 16.00	0.190	0.340	1855	560
Valve spring steel (ASTM 230)	1.50 – 6.25	0.100	0.150	1730	515
Cr-V Steel (ASTM 231)	0.50 – 12.50	0.166	0.150	1976	515
Cr-Si Steel (ASTM A401)	0.80 – 12.00	0.107	0.150	1965	515
Stainless steel (ASTM A313)	0.20 – 12.50	0.140	0.170	1840	360

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

สำหรับค่าโมดูลความยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนของวัสดุในตารางที่ 10.1 ให้ใช้ค่าประมาณดังนี้

$$E = 200 \frac{kN}{mm^2} \quad G = 80 \frac{kN}{mm^2}$$

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมให้ใช้

$$E = 180 \frac{kN}{mm^2} \quad G = 70 \frac{kN}{mm^2}$$

ค่าต่างๆที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 เป็นเพียงแต่ค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบในการคำนวณเกี่ยวกับสปริงชนิดในบทนี้เท่านั้น ในการทำงานจริงผู้ออกแบบควรสอบถามค่าที่แน่นอนจากผู้ผลิตโดยตรง สำหรับค่าความต้านทานแรงเฉือนครากให้ใช้ค่าประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_y = 0.60\sigma_u \quad \text{สำหรับวัสดุทั่วไป}$$

$$\tau_y = 0.47\sigma_u \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม}$$

## 6.2 ความเค้นในสปริงขดรับแรงกด

พิจารณาสปริงขดที่รับแรงกด  $F$  ในแนวแกนของสปริงดังรูปที่ 6.1(ก) และให้

$D_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของขดสปริง

$D_i$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของขดสปริง

$D = \frac{D_o + D_i}{2}$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริง

$d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง



ให้ตัดส่วนหนึ่งของสปริงออกมาพิจารณาจะเห็นได้ว่า ลวดสปริงอยู่ภายใต้แรงภายใน  $F$  และ โมเมนต์บิด  $T$  ดังรูปที่ 6.1(ข) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในลวดสปริงคือ

$$\tau = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \quad (6.3)$$

แต่

$$T = \frac{FD}{2} \quad (6.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 
$$\frac{J}{r} = \frac{\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)}{\left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{\pi d^3}{16} \quad (6.5)$$

และ 
$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (6.6)$$

ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (6.3 ก) ใหม่ได้เป็น

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (6.7)$$

ถ้าให้  $C = \frac{D}{d}$  ซึ่งเรียกว่าดัชนีสปริง (spring index) สมการที่ (6.3 ข) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (6.8)$$

โดยที่  $K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$

ค่า  $K_s$  นี้เรียกว่าตัวประกอบความเค้นเฉือน (shear stress correction factor) ซึ่งเป็นค่าทำให้ความเค้นเฉือนในสปริงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนตรง  $\frac{F}{A}$

ในการคำนวณที่ผ่านมาได้ใช้สูตรความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด  $\frac{Tr}{J}$  ซึ่งเป็นสูตรสำหรับการบิดชิ้นส่วนตรง เช่น เพลา แต่ในสปริง เส้นลวดบิดวนไปตามความโค้งของสปริงทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณด้านในของสปริงชด วาห์ล (Wahl) ได้เสนอให้มีการแก้ไขความเค้นในสมการที่ (6.8) โดยเพิ่มตัวประกอบความโค้ง (curvature correction factor)  $K_c$  เข้าไปในสมการค่าตัวประกอบความหนาแน่นดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

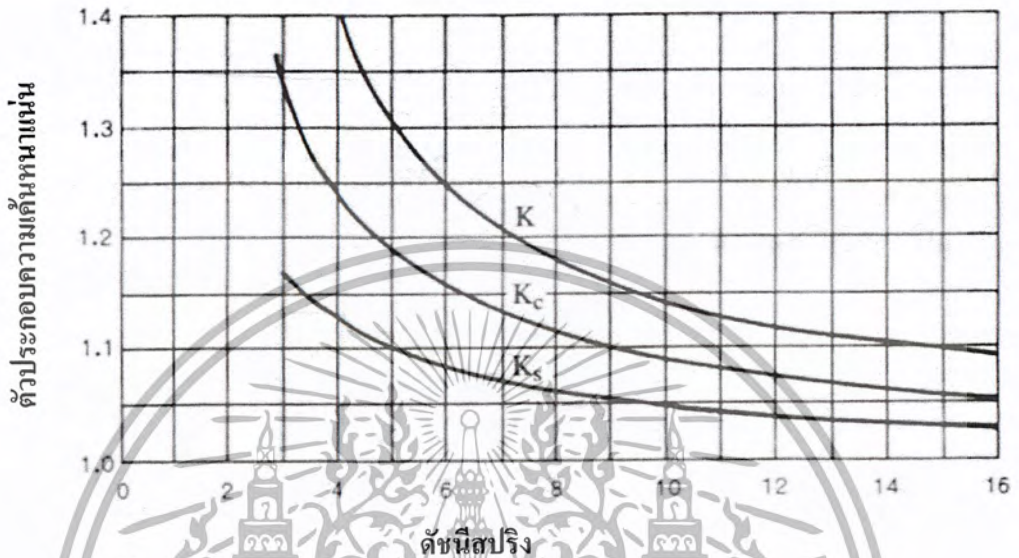
$$\begin{aligned} K &= K_c K_s \\ &= \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \end{aligned} \quad (6.9)$$

ค่า  $K$  นี้เรียกว่าตัวประกอบของวาห์ล (Wahl's factor) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการคำนวณจากสมการที่ (6.9) หรืออ่านค่าได้จากรูปที่ 6.2 ดังนั้นความเค้นเฉือนในสมการที่ (6.8) จึงกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

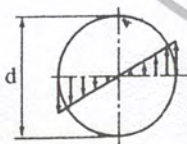
$$\tau = K \frac{8FD}{\pi d^3} \tag{6.10}$$

$$= K \frac{8FC}{\pi d^2} \tag{6.11}$$

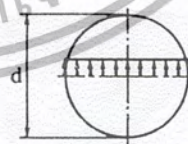


รูปที่ 6.2 ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับสปริงขดรับแรงดึงและรับแรงกด

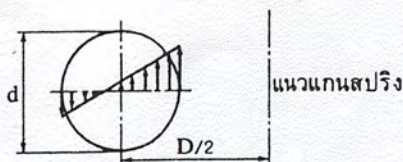
การกระจายความเค้นเฉือนในเส้นลวดสปริงที่เกิดจากโมเมนต์บิด T และแรงเหวี่ยง F จะดูได้จาก รูปที่ 6.3 (ก) และ รูปที่ 6.3 (ข) เมื่อรวมความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 6.3(ก) และ 6.3(ข) ก็จะได้ความเค้นเฉือนดังรูปที่ 6.3(ค) แต่เมื่อรวมความเค้นหนาแน่นอันเนื่องมาจากความโค้งของเส้นลวดสปริงเข้าไปด้วยจะได้ดังรูปที่ 6.3(ง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเค้นเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านในของลวดสปริง



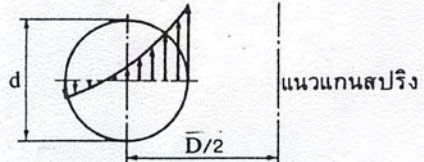
(ก) ความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด



(ข) ความเค้นเฉือนตรง



(ค) ผลรวมของความเค้นเฉือนตรง และความเค้นเฉือนบิด



(ง) ผลรวมของความเค้นเฉือนตรง ความเค้นเฉือนบิด และความเค้นเฉือนเนื่องจากความโค้ง

รูปที่ 6.3 การรวมความเค้นในสปริงขด

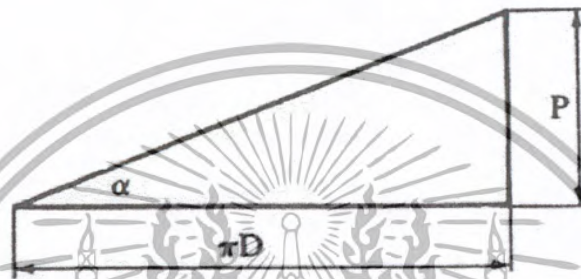
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (6.11) นี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อสปริงมีขนาดเล็กเท่านั้น

ถ้าให้ระยะพิชช์ของสปริงยาว  $p$  และให้นำสปริงหนึ่งรอบมาคลี่ออก มุมขนาด  $\alpha$  คือ

$$\tan \alpha = \frac{P}{\pi D} \quad (6.12)$$

สำหรับสปริงชนิดรับแรงกด ถ้ามุมขนาดของสปริงขณะที่ไม่มีแรงภายนอกมากกว่าเล็กน้อยกว่า  $12^\circ$  แล้ว ก็ให้ถือว่าสปริงชนิดนั้นมีขนาดเล็กได้

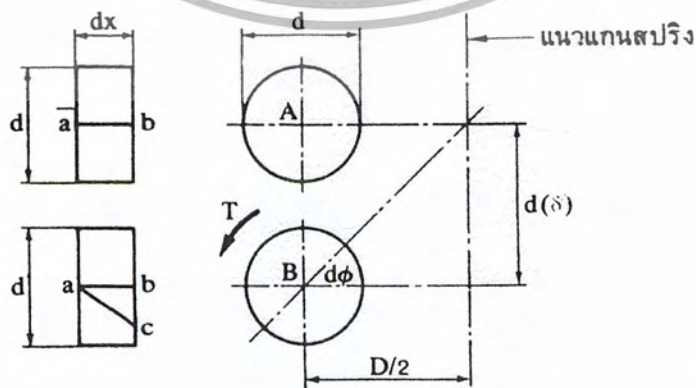


รูปที่ 6.4 มุมขนาดของสปริง

### 6.3 การยืดหดของสปริงชนิด

ในการหาการยืดหดของสปริงให้พิจารณาขนาดสปริง ซึ่งตัดออกมาเป็นชิ้นเล็ก ๆ ยาว  $dx$  ก่อนมรแรงมากระทำในแนวตั้ง ส่วนของลวดสปริงนี้จะอยู่ที่ A หลังจากรับแรงภายนอกแล้วลวดสปริงจะเลื่อนมาอยู่ที่ตำแหน่ง B โดยมีการยวบตัว  $d\delta$  และมุมบิดเล็กน้อยของลวดเท่ากับ  $d\phi$  นั่นคือเส้น  $ab$  จะบิดมาอยู่ที่ตำแหน่ง  $ac$  จากสูตรการบิด

$$d\phi = \frac{Tdx}{GJ} \quad (6.13)$$



รูปที่ 6.5 การยืดหดของลวดสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามุมบิดบนลวดสปริงชิ้นเล็กๆนี้เล็กมาก (เนื่องจากสปริงมีขดถี่) ระยะยวบตัวคือ

$$d\delta = \frac{D(d\phi)}{2} = \frac{TD(dx)}{2GJ} \quad (6.14)$$

ถ้าสปริงมีความยาวทั้งหมด  $L$  ระยะยวบตัวทั้งหมดคือ

$$\delta = \frac{TD}{2GJ} \int_0^L dx = \frac{TDL}{2GJ} \quad (6.15)$$

ถ้าจำนวนขดทำการ (active coils) เท่ากับ  $n$  ขด ความยาว  $L$  ของสปริง  $n$  ขด โดยประมาณเท่ากับ  $\pi Dn$  และเมื่อแทนค่า  $T = \frac{FD}{2}$  และ  $J = \frac{\pi d^4}{32}$  ลงในสมการที่ (6.15) จะได้ว่า

$$\text{ระยะยวบตัว} \quad \delta = \frac{8FD^3n}{Gd^4} = \frac{8FC^3n}{Gd} \quad (6.16)$$

#### 6.4 ความแข็งตึงของสปริง

ความแข็งตึงของสปริง (spring stiffness) หมายถึงปริมาณของแรงที่ใช้ในการทำให้สปริงยืดหดหนึ่งหน่วยความยาวในแนวแกนของสปริง ซึ่งยังมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อแตกต่างกันไป เช่น ค่าคงที่ของสปริง (spring constant) อัตราสปริง (spring ratio) โมดูลัสของสปริง และเกรเดียนของสปริง (spring gradient) เป็นต้น ถ้าให้  $\delta$  เป็นระยะยวบตัวของสปริงภายใต้แรงกด  $F$  ค่าความแข็งตึงของสปริงคือ

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (6.17)$$

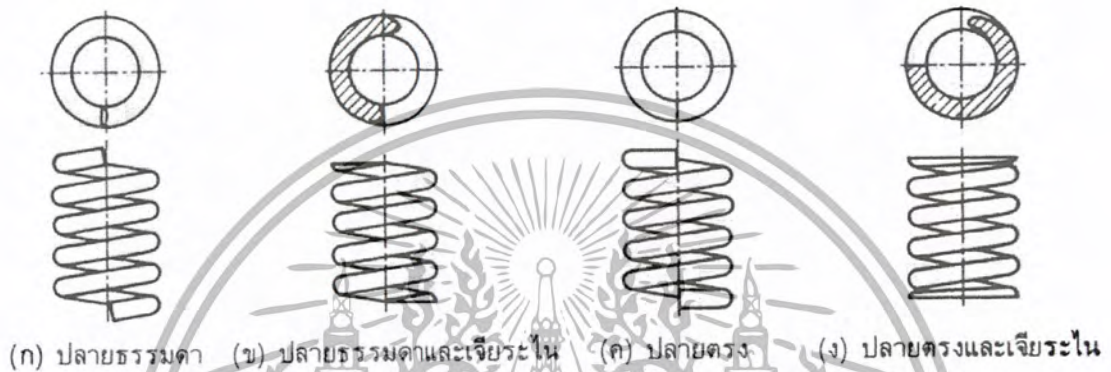
แทนค่าสมการที่ (6.7) ลงในสมการที่ (6.8) จะได้

$$K = \frac{Gd^4}{8D^3n} = \frac{Gd}{8C^3n} \quad (6.18)$$

ค่าความแข็งตึงของสปริงนี้ก็เป็นค่าที่สำคัญ ซึ่งผู้ใช้ต้องเลือกให้ถูกต้องกับชิ้นงานจึงจะทำให้เครื่องจักรกลทำงานได้ตามความมุ่งหมาย

### 6.5 จำนวนขดทำการ

สปริงรับแรงกดที่ใช้งานอยู่ทั่วไปจะมรปลายทั้งสองในลักษณะดังรูปที่ 6.6 โดยปกติแล้ว ต้องการให้ปลายสปริงสัมผัสกับสิ่งที่สปริงกดอยู่ให้มากที่สุด ในบางกรณีสปริงตั้งอยู่ในช่องซึ่งมีพื้นที่กคที่เรียบแบน ดังนั้นจึงนิยมตัดปลายสปริงชนิดนี้ให้เรียบเป็นฐานตั้ง เนื่องจากขดส่วนที่ตัดปลายไปจะสูญเสียผลในการเป็นสปริงไปมาก ฉะนั้นการคำนวณจึงให้หักเอาจำนวนขดเหล่านี้่ออก จำนวนขดที่เหลืออยู่ทั้งหมดเรียกว่า ขดทำการ ซึ่งก็เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ถ้าให้  $n$  เป็นจำนวนขดทั้งหมดของสปริงขดก็จะคิดจำนวนขดทำการได้ดังนี้คือ



รูปที่ 6.6 ปลายสปริงขดรับแรงกด

ปลายธรรมดา (plain ends)

$$n = n_r$$

ปลายธรรมดาและเจียรระไน (ground end)

$$n = n_r - 1$$

ปลายตรง (square ends)

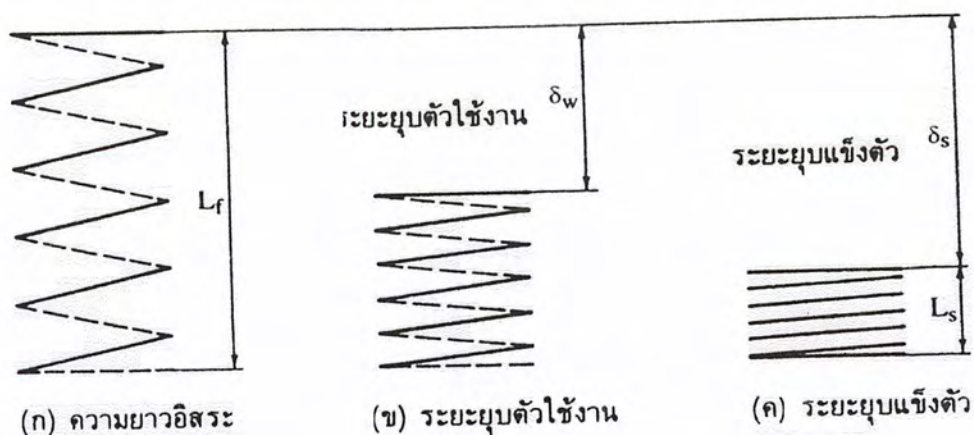
$$n = n_r - 1.5$$

ปลายตรงและเจียรระไน

$$n = n_r - 2$$

### 6.6 ระยะยวบตัวใช้งาน

ความยาวของสปริงขดในขณะที่ยังไม่มีแรงภายนอกมากกระทำเรียกว่า ความยาวอิสระ  $L_f$  ดังรูปที่ 6.7(ก) เมื่อมีแรงภายนอกมากดสปริงนี้ให้ทุกขดติดกันพอดีดังรูปที่ 6.7(ค) ความยาวของสปริงขดขณะนี้เรียกว่า ความยาวแข็งตัว (solid height)  $L_s$  แรงและความเค้นในขณะนี้เรียกว่า แรงแข็งตัว (solid force) และความเค้นแข็งตัว (solid stress) ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 ระยะยุบตัวของสปริงชนิด

สำหรับการออกแบบสปริงให้รับแรง  $F$  สูงสุดขณะใช้งาน โดยที่สปริงจะยุบตัวลงไป  $\delta_w$  ค่า  $\delta_w$  นี้จะเรียกว่า ระยะยุบตัวใช้งาน ดังรูปที่ 6.7(ข) ถ้าให้ระยะยุบตัวแข็งตัว (solid deflection)  $\delta_s$  เป็นผลต่างระหว่างความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวจะได้ว่า

$$\delta_s = L_f - L_s \quad (6.19)$$

ก็จะทำให้สามารถเพื่อการยุบตัวของสปริงให้มีการยุบตัวมากกว่าระยะยุบตัวใช้งานได้อย่างมีหลักเกณฑ์พอสมควร โดยใช้ค่าความเผื่อการกดติด (clash allowance) ซึ่งนิยามว่า

$$\text{ความเผื่อการกดติด } r_c = \frac{\delta_s - \delta_w}{\delta_w} \quad (6.20)$$

ค่าความเผื่อการกดติดนี้เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของระยะยุบตัว ที่อาจมีได้เกินกว่าระยะยุบตัวใช้งาน โดยทำหน้าที่ให้ความปลอดภัยแก่การใช้งานยิ่งขึ้นไปอีก ค่า  $r_c$  นี้แนะนำให้ใช้ประมาณ 0.20 ซึ่งก็หมายความว่าสามารถใช้สปริงรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าแรงที่ใช้ออกแบบอีก 20% สปริงทุกชุดจึงจะติดกันหมด จึงเป็นการป้องกันมิให้ผิวหน้าของสปริงเสียหายเนื่องจากการสัมผัสและเสียดสีกันระหว่างชุดได้ อีกประการหนึ่งถ้าสปริงยุบตัวจนถึงความยาวแข็งตัว สปริงก็จะหมดคุณสมบัติในการใช้งานรับแรงสั่นสะเทือนหรืออื่นๆตามต้องการไป

ความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวของสปริงขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายสปริงชนิด ซึ่งอาจจะหาค่าโดยประมาณได้จากตารางที่ 6.2

ลักษณะของปลายสปริงขด	ความยาวอิสระ ( $L_f$ )	$n_t$	ความยาวแข็งตัว ( $L_s$ )
ปลายธรรมดา	$Pn + d$	$n$	$d(n + 1)$
ปลายธรรมดาและเจียรระไน	$Pn + d$	$n + 1$	$d(n + 1)$
ปลายตรง	$Pn + 2.5d$	$n + 1.5$	$d(n + 2.5)$
ปลายตรงและเจียรระไน	$Pn + 2d$	$n + 2$	$d(n + 2)$

ตารางที่ 6.2 ค่าประมาณของความยาวอิสระและความยาวแข็งตัว

### 6.7 พลังงานที่เก็บโดยสปริง

สปริงทุกชนิดสามารถเก็บพลังงานเอาไว้ในตัวเองได้ในรูปของพลังงานศักย์ การออกแบบและเลือกสปริงมาใช้กับงานจำนวนมาก จะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการเก็บพลังงานของสปริง บางครั้งผู้ออกแบบอาจจะสนใจที่จะเก็บพลังงานไว้ในสปริงให้มากที่สุด โดยใช้เนื้อที่น้อยที่สุด หรืออาจจะสนใจความสามารถในการรับแรงกระแทก เป็นต้น ปริมาณพลังงานที่เก็บอยู่ในสปริงคำนวณได้ โดยพิจารณาคุณลักษณะของสปริงแต่ละประเภท ซึ่งอาจจะแบ่งออกได้เป็นสปริงแบบเส้นตรง (linear) และแบบไม่ใช่เส้นตรง (nonlinear) สปริงแบบเส้นตรงจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดหดของสปริงในลักษณะเส้นตรงดังรูปที่ 6.8(ข) สำหรับสปริงแบบไม่ใช่เส้นตรงยังแบ่งออกได้เป็นแบบเพิ่มเป็นเส้นโค้งขึ้น (progressive) และเพิ่มเป็นเส้นโค้งลง (degressive) ดังรูปที่ 6.8(ก) และรูปที่ 6.8(ข) พลังงานที่เก็บอยู่ในสปริงก็คือ งานภายใต้พื้นที่แรเงา ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U = \int Fd\delta \quad (6.21)$$

สำหรับสปริงที่มีความแข็งคงที่ เช่น สปริงขด พลังงานที่เก็บอยู่ในสปริงจะเป็นดังรูปที่ 6.8(ข) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$U = \frac{1}{2}F\delta = \frac{1}{2}k\delta^2 \quad (6.22)$$

ถ้าให้ปริมาตรของเนื้อสปริงโดยประมาณเท่ากับ

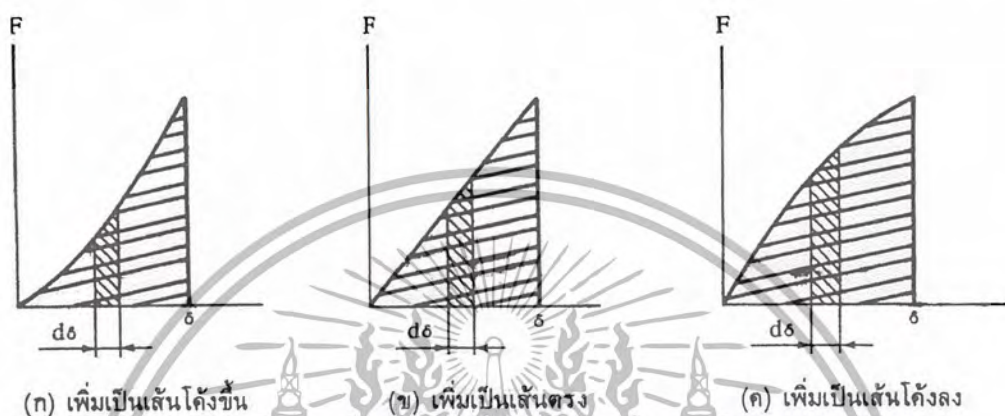
$$V = \left[ \frac{\pi d^2}{4} \right] (\pi Dn) \quad (6.23)$$

แล้วใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (6.5) และ (6.7) ก็จะสามารถจัดรูปสมการที่ (6.12) ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \frac{\tau^2 V}{4K^2 G} \quad (6.24)$$

พลังงานที่เก็บอยู่ในสปริงบางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน ดังนั้นงานที่จะได้กลับคืนมาจากสปริงก็จะน้อยกว่างานที่ให้กับสปริง ซึ่งเรียกว่าเกิดการดุดซึม (damping) สปริงบางชนิดก็ต้องการทำให้เกิดการดุดซึมเพื่อขจัดพลังงานที่สปริงได้รับเข้ามาบางส่วน เช่น สปริงที่ล้อรถยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 6.8 คุณลักษณะของสปริง

พิจารณารูปที่ 6.9 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้เส้นโค้ง 0 ถึง 1 เป็นพลังงานที่สปริงได้รับ แต่สปริงจะให้พลังงานกลับคืนมาเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้ง 0 ถึง 2 ดังนั้นพื้นที่ 012 คือพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการดุดซึม สำหรับสปริงที่ทำจากโลหะการสูญเสียพลังงานจะมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เพราะการดุดซึมซึ่งเกิดจากความเสียดทานภายในตัวสปริงเองมีค่าน้อย สำหรับสปริงแทนเบรคยนต์ซึ่งต้องการใช้ดูดพลังงานจากการกระแทกนั้นมีจำนวนแผ่นติดกันหลายแผ่น ฉะนั้นความเสียดทานภายนอกที่ผิวสัมผัสระหว่างใบของสปริงแทนเบรคแต่ละแผ่น จึงมีค่ามากเพียงพอที่จะใช้งานในด้านที่ต้องการให้เกิดการดุดซึมได้

### 6.8 การออกแบบสปริงรับแรงกด

การออกแบบสปริงมักจะต้องใช้วิธีทดลองแก้ความคลาดเคลื่อน (trial-and-error) บางครั้งก็มีข้อจำกัดอย่างอื่นซึ่งทำให้การออกแบบยากขึ้นไปอีก เช่น ขนาดจำกัดของช่องสำหรับใส่ขดสปริง เป็นต้น โดยปกติแล้วสปริงจะขยายตัวกว้างออกเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด ดังนั้นในกรณีที่มีช่องว่างจำกัดก็อาจจะต้องเหลือช่องไว้โดยรอบสปริงประมาณ  $\frac{d}{4}$  การขยายตัวของสปริงอาจจะประมาณค่าได้จากสมการ

$$\overline{D}_0 = [D_0^2 + 0.1\varepsilon^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\overline{D}_0$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของสปริงหลังขยายตัว

$D_0$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของสปริงขังก่อนขยายตัว

$$\varepsilon = \frac{L_f - d(n_t - n)}{n}$$

การคำนวณเกี่ยวกับสปริงขดอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ

1. ให้คิดว่าแรงที่มากกระทำต่อตัวสปริงเป็นแบบอยู่นิ่ง แล้วคิดว่าแรงที่กระทำกับสปริงนั้นจัดอยู่ในประเภทใด ซึ่งแบ่งออกเป็น

(ก) งานเบา (light service) หมายถึง แรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงไม่เกิน  $10^4$  ครั้ง

(ข) งานปานกลาง (average service) หมายถึง แรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงอยู่ระหว่าง  $10^4$  ถึง  $10^6$  ครั้ง

(ค) งานหนัก (severe service) หมายถึง แรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงมากกว่า  $10^6$  ครั้ง

2. ให้พิจารณาว่าแรงเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดไปถึงต่ำสุด แล้วคำนวณออกแบบสปริงโดยใช้สมการลักษณะเดียวกับของไซเคอร์เบอร์ก สำหรับการคำนวณ โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้สปริงมีอายุการใช้งานได้ไม่จำกัด (indefinite life) ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง

## 6.9 การออกแบบสปริงขดโดยคิดให้แรงอยู่นิ่ง

ในการออกแบบสปริงขดโดยคิดให้แรงอยู่นิ่ง ให้ผู้ออกแบบใช้ค่าของความเค้นเฉือนที่แสดงอยู่ในตารางที่ 6.3 เป็นค่าความเค้นออกแบบ แต่ถ้าสามารถได้ข้อมูลที่แน่นอนจากผู้ผลิตวัสดุสำหรับลวดสปริงได้ก็ควรใช้ค่านั้นแทน

วัสดุลวดสปริง	ความเค้นเฉือนออกแบบ $\tau_d$		
	งานเบา	งานปานกลาง	งานหนัก
Hard drawn wire (ASTM A227)	$0.344 \delta_u$	$0.275 \delta_u$	$0.244 \delta_u$
Stainless steel (ASTM A313)	$0.320 \delta_u$	$0.260 \delta_u$	$0.210 \delta_u$
วัสดุอื่นๆ ในตารางที่ 9.1	$0.405 \delta_u$	$0.324 \delta_u$	$0.263 \delta_u$

ตารางที่ 6.3 ค่าความเค้นเฉือนออกแบบสำหรับวัสดุสปริง

สำหรับขนาดมาตรฐานของเส้นลวดสปริง ในระบบหน่วยเอสไอนี้ยังมีได้มีการตกลงกัน

ระหว่างๆประเทศที่ต่างๆ ให้เป็นที่แน่นอน ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ค่าต่อไปนี้เป็นค่าที่ทดลองเลือกใช้ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอกเป็นมิลลิเมตร ถ้าขนาดลวดที่ต้องการใช้โตกว่าที่ให้ไว้ในที่นี้ก็ถือเอาตัวเลขที่คำนวณได้เป็นเกณฑ์  
ค่าที่แนะนำคือ

1.00	1.25	1.50	1.80	2.00	2.25	2.50
2.80	3.20	3.60	4.00	4.50	5.00	5.50
6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.50
14.00	16.00	18.00	20.00	22.50	25.00	

ทางการผลิตสปริงพบว่า ถ้าสปริงที่มีค่าดัชนี C น้อยกว่าม้วนหรือขดสปริงจะประสบปัญหา  
เรื่องการแตกร้าวของสปริง หรืออีกนัยหนึ่งคือการม้วนสปริงให้มีความโค้งมากจนเกินไปจะทำให้ยาก  
ดังนั้นในการออกแบบสปริงควรจะให้ม้วนสปริงมากพอสมควร โดยปกติแล้วไม่ควรจะให้น้อยกว่า 3  
สปริงขดรับแรงกดที่ใช้งานอยู่ส่วนมากจะมีดัชนีสปริงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ทั้งนี้เพราะทำให้ไม่มีปัญหา  
ทางการผลิตและมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี

ถึงแม้ว่าในการใช้งานสปริงจะไม่ถูกกดจนแข็งตัว แต่ในขณะที่ทำการติดตั้งสปริงหรือการ  
ซ่อมแซมชิ้นส่วนก็อาจมีการกดสปริงเข้าออกจนถึงความยาวแข็งตัวได้ เพื่อป้องกันความเสียหายของ  
สปริง ในการออกแบบจึงให้สวมเส้นเดือนในขณะที่สปริงถูกกดจนขดทุกขดติดกันหมดน้อยกว่าค่า  $\tau_y$   
ของวัสดุเสมอ

## บทที่ 7

### การคำนวณทางทฤษฎี

#### 7.1 แรงสปริง

จากการทดลองได้แรงที่ใช้ในการดึงสปริง

$$F = 2 \times 9.81 = 19.62 \text{ N}$$

$$K = \frac{F}{\delta}$$

$$\delta = 1.7 \text{ mm}$$

ค่าคงที่ของสปริง

$$K = \frac{19.62}{1.7} = 11.176 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

#### 7.2 Pressure

ความดันของน้ำที่กระทำกับวาล์ว

$$P = \frac{F}{A} = \frac{19.62}{\pi \times (3.5 \times 10^{-3})^2} = 509815.5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ Pa}$$

$$P_{\text{max}} = 5.098 \text{ Bar}$$

#### 7.3 ชุดลิ้อก

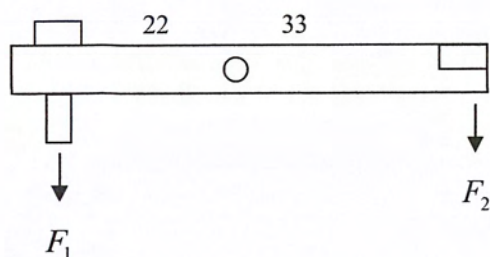


$$19.62 \times 11 = F_1 \times 10$$

$$F_1 = 21.58 \text{ N}$$

$$N = \frac{F}{\mu} = \frac{21.58}{0.5} = 43.16 \text{ N}$$

## 7.4 กระเดื่อง



แรงที่กระทำกับกระเดื่อง

$$21.58 \times 22 = F_2 \times 33$$

$$F_2 = 14.39N$$

## 7.5 ตัวปลด



แรงที่กระทำที่ตัวปลดกระเดื่อง

$$F_2 = F_3 = 14.39N$$

ทอร์กที่กระเดื่อง

$$T = F \times R$$

$$= 16.87 \times 26.5 \times 10^{-3}$$

$$= 0.447N.mm$$

$$= 4.47 \times 10^{-4} N.mm$$

$$F_2 = \mu F_3 = 14.39N$$

$$F_3 = \frac{F_2}{\mu} = \frac{14.39}{0.5} = 28.77N$$

$$T = F \times R$$

$$= 28.77 \times 26.5 \times 10^{-5}$$

$$= 0.762N$$

## 7.6 การคำนวณหาอัตราทดของฟันเฟือง

ตารางที่ 7.1 ค่าการคำนวณของอัตราทดชุดเฟืองทด

	จำนวนเฟือง	จำนวนเฟือง	อัตราทด
ใบพัด		10	
เฟืองชุดที่ 1	26	9	2.6
เฟืองชุดที่ 2	30	8	3.33
เฟืองชุดที่ 3	29	8	3.625
เฟืองชุดที่ 4	30	9	3.75
เฟืองชุดที่ 5	30	10	3.33
เฟืองชุดที่ 6	30	9	3
เฟืองชุดที่ 7	30	10	3.33
เฟืองชุดที่ 8	30	9	3
เฟืองชุดที่ 9	30		3.33
ชุดเฟืองทดที่เพิ่มขึ้น			
เฟืองชุดที่ 10		8	
เฟืองชุดที่ 11	29	8	3.625
เฟืองชุดที่ 12	30	9	3.75
เฟืองชุดที่ 13	30		3.33
เฟืองชุดที่ 14		26	1.15
		อัตราทดรวม	2036167.131

## 7.7 การคำนวณหาขนาดของเฟือง

เราเลือกที่จะคำนวณชุดเฟืองชุดสุดท้ายเพราะเป็นชุดที่รับแรงบิดมากที่สุด (เนื่องจากเฟืองทุกตัวมีขนาดฟันใกล้เคียงกัน)

เนื่องจาก โมดูลของแต่ละชุดทดมีขนาดใกล้เคียงกัน จึงใช้โมดูลเฉลี่ยมาคำนวณ

โมดูลของชุดเฟือง,  $m = 0.486$

จากตาราง 5.2 ค่าตัวประกอบของลูอิส

$$Y_g = 0.336$$

$$Y_p = 0.176$$

จากตาราง 5.3 ความเค้นของวัสดุ

$$\sigma = 70 \frac{N}{mm^2} = 70000 \frac{N}{m^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความเค้นคูณค่าแก้ไขจะได้ว่า

$$\sigma_g Y_g = 70 \times 0.336 = 23.82 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_p Y_p = 70 \times 0.176 = 12.32 \frac{N}{mm^2}$$

ตรวจสอบ  $\sigma_p Y_p < \sigma_g Y_g$  เลือกจำนวนที่พื้นของพีเนียน

ความเร็วพิตช์

$$V = \pi d n = \pi m N_p n$$

$$= \pi \times 30 \times 0.486 \times 1.2 \times 10^{-6}$$

$$= 5.496 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

$$W_p = 2\pi T n$$

$$= 2\pi \times 0.762 \times 1.2 \times 10^{-6}$$

$$= 5.745 \times 10^{-6} \frac{Nm}{s}$$

$$F_d = \frac{W_p}{V}$$

$$= \frac{5.745 \times 10^{-6}}{5.496 \times 10^{-5}}$$

$$= 5.745 \times 10^{-6}$$

$$= 9.56 N$$

ความเร็วพิตช์น้อยกว่า  $10 \frac{m}{s}$

$$K_v = \frac{3+V}{3} = \frac{3+5.496 \times 10^{-5}}{3} = 1.00001832$$

$$F_d = K_v F_f = 1.00001832 \times 9.56 = 9.56017 N$$

สมมติ  $K_f = 1.5, \sigma = 60 \frac{N}{mm}, b = 1mm, Y_p = 0.176$

$$F_b = \frac{\sigma b Y_p m}{K_f} = 3.42144 N$$

## 7.8 การคำนวณหาแรงที่กระทำกับใบพัด

หลักการคำนวณแรงบิดที่ได้จากใบพัด

- สมมติ
1. ให้ใบพัดหมุนในรูปแบบเชิงเส้น
  2. ไม่พิจารณาอัตราเร่ง
  3. ของไหลอัดตัวไม่ได้

เมื่อกำหนดตามที่ได้สมมติไว้จะได้ว่า

$$F_r = (m \times Q^2) + (n \times P)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $m = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ } 5.963 \times 10^6 \left(\frac{kg}{m^5}\right)$

$Q = \text{อัตราการไหลของน้ำ } \left(\frac{m^3}{s}\right)$

$n = \text{ค่าสัมประสิทธิ์ } 0.0015 m^2$

$P = \text{แรงดันของน้ำ } \left(\frac{N}{m^2}\right)$

ซึ่งในเวลาปกติเราสามารถวัดค่า  $P = 0.01 \frac{kg}{cm^2}$

เมื่อเปลี่ยนหน่วยจะได้ว่า  $P = 0.01 \times 9.81 \times 100^2 = 981 \frac{N}{m^2}$

และอัตราการไหลของน้ำ  $Q = 0.016 \frac{m^3}{min}$

เมื่อเปลี่ยนหน่วยจะได้ว่า  $Q = \frac{0.016}{60} = 0.000277 \frac{m^3}{s}$

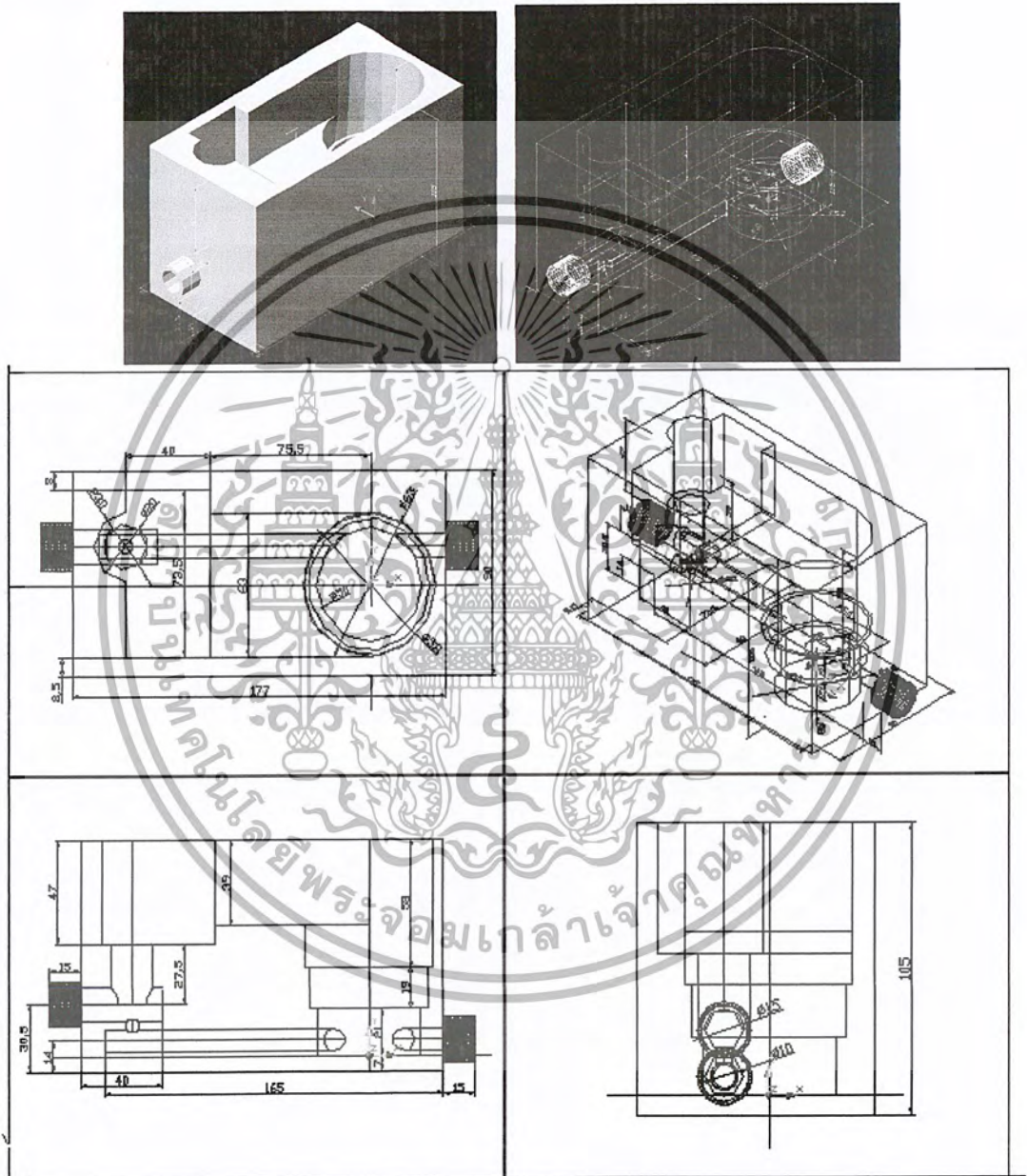
ดังนั้นจะได้แรงที่น้ำกระทำกับใบพัด

$$F_r = (5.963 \times 10^6 \times 0.000277^2) + (0.0015 \times 981) = 1.929 N$$

## บทที่ 8

### แบบและวิธีการสร้าง

#### 8.1 ชุดบล็อกล็อก

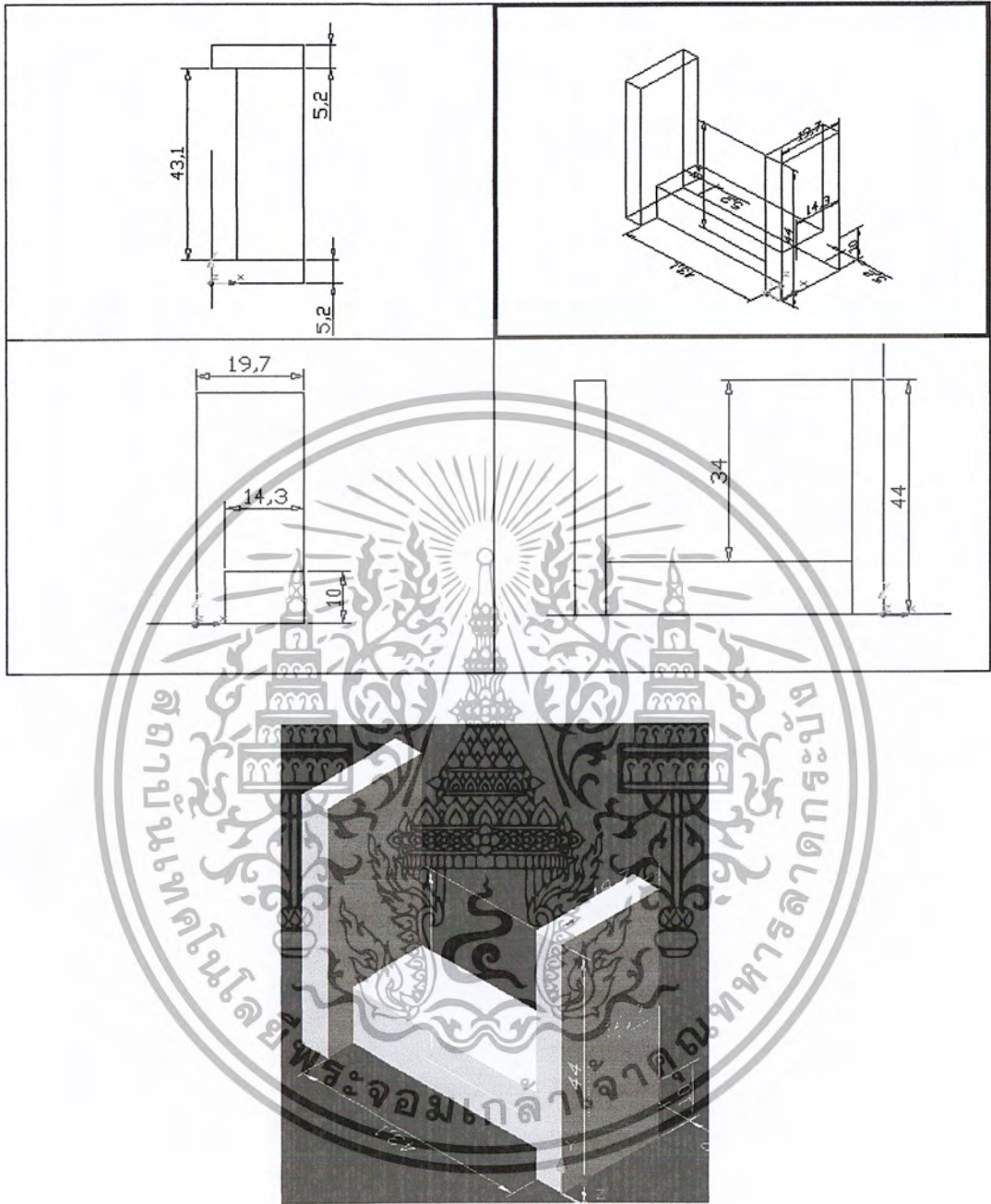


ชุดบล็อกล็อกทำจากวัสดุพลาสติกประเภทซูปเปอร์ลิน เพื่อป้องกันการเกิดสนิม เพราะเป็นอุปกรณ์ที่สัมผัสกับน้ำโดยตรง ขั้นตอนการสร้าง นำวัสดุที่ซื้อจากท้องตลาดที่ขนาดใกล้เคียงกับขนาดตามแบบ จากนั้นนำไปกัดและกลึงให้ได้ขนาดตามแบบ แล้วนำมาเจาะและทำเกลียว ข้อควรระวังควรทำให้ได้ตามแบบเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



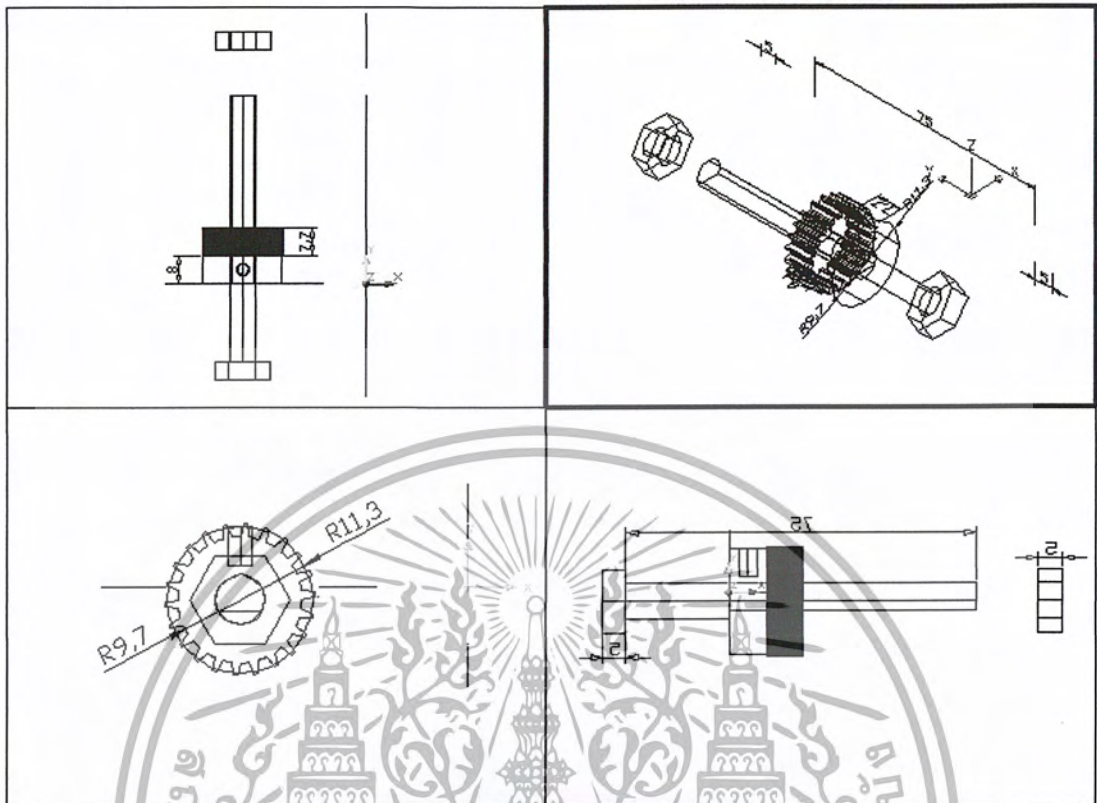
### 8.3 ตัวยึดตัวลือควาลัว



ตัวยึดตัวลือควาลัวทำมาจากทองเหลืองซึ่งสามารถใช้ได้กับน้ำ โดยนำก้อนทองเหลืองมากัดและเจาะรูตามแบบ ข้อควรระวังขณะทำการกัดอาจทำให้ทองเหลืองแตกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

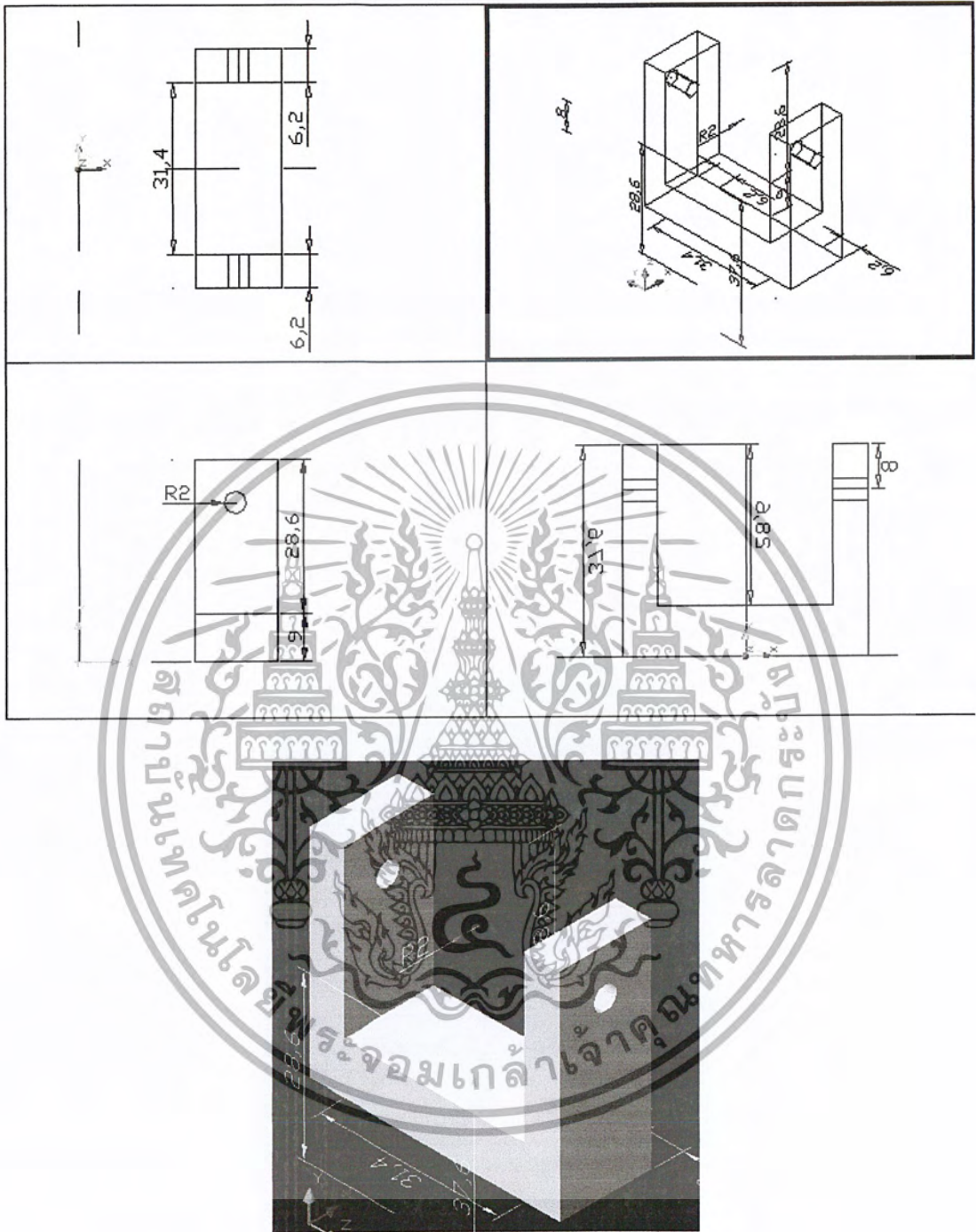
## 8.4 ตัวล็อกควาล์ว



ตัวแกนทำจากสแตนเลส ตัวเฟืองทำจากพลาสติก และตัวล็อกทำจากทองเหลือง นำมาลึงจะ  
เจาะตามแบบตัวแกนจะเจาะรูเพื่อนำสลักมาใส่ไว้ยึดเฟืองและตัวล็อกให้หมุนไปพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

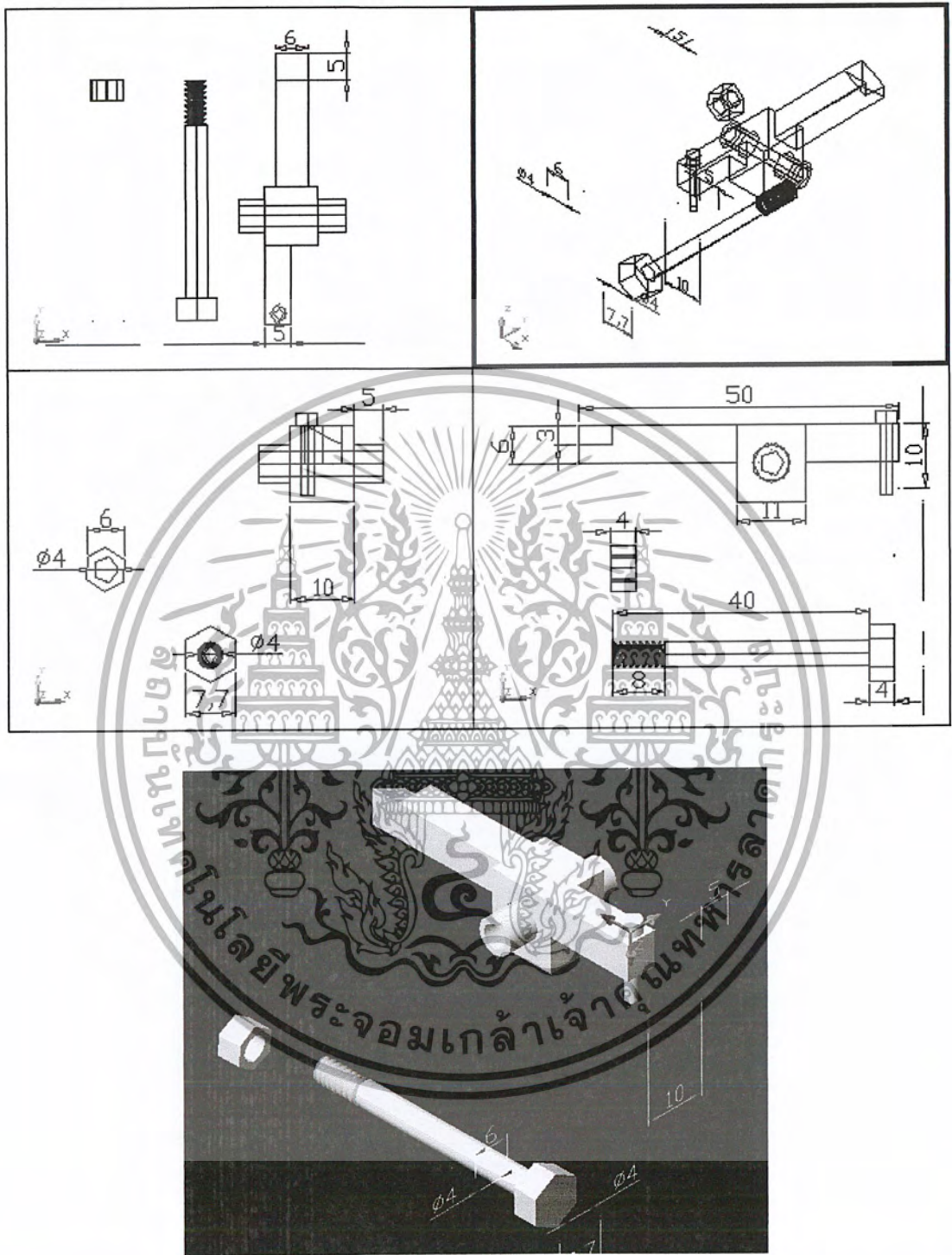
## 8.5 ตัวยึดกระเดื่อง



ทำจากทองเหลือง วิธีทำเหมือนกับตัวยึดตัวลือควาลัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

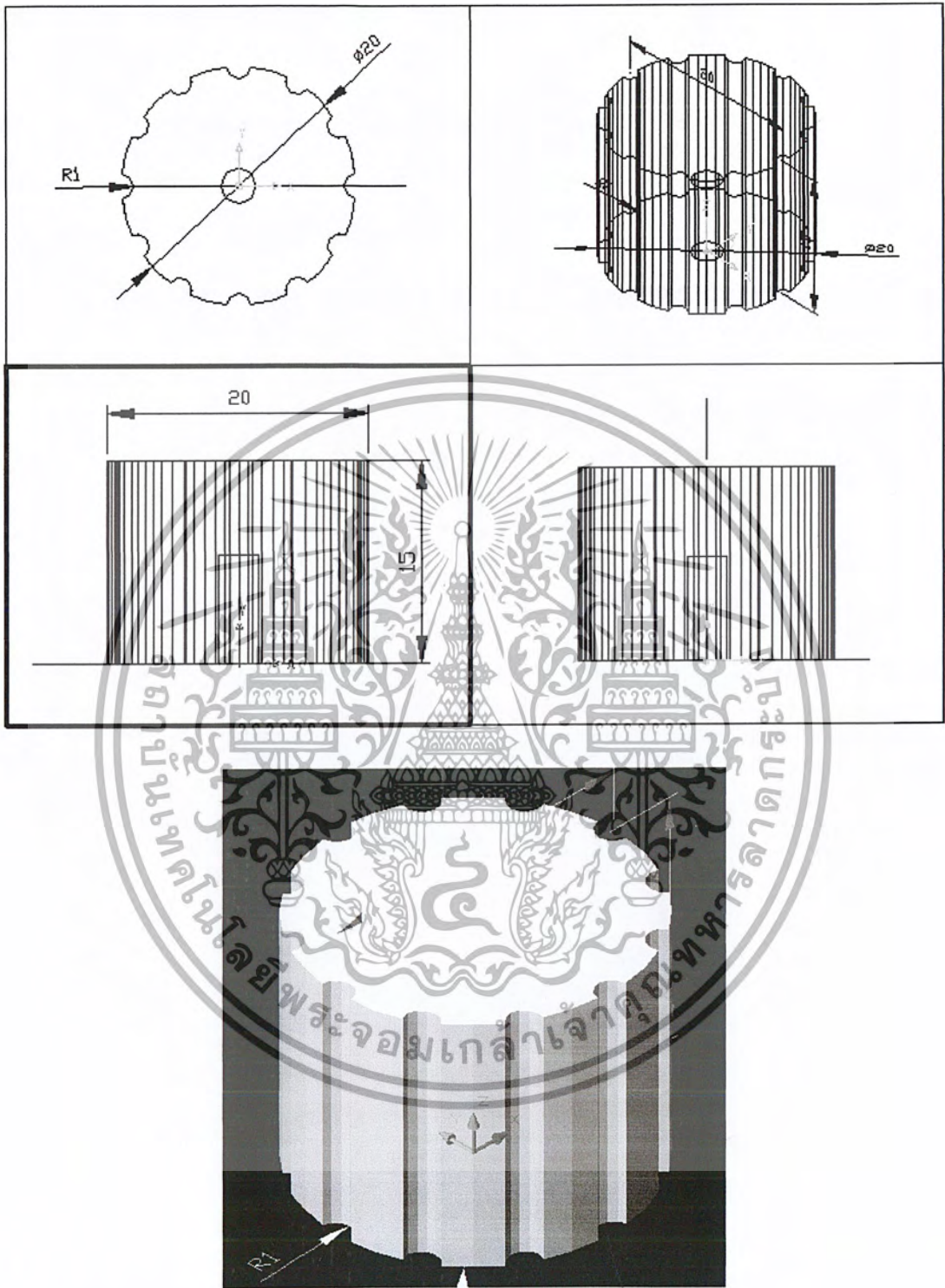
## 8.6 กระดิ่งและแกนกระดิ่ง



ตัวแกนกระดิ่งและกระดิ่งทำจากสแตนเลส โดยนำมากลึง กัด และเจาะรูตามแบบ ที่ปลายกระดิ่งใช้น็อตซึ่งสามารถปรับความยาวในการถือคได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

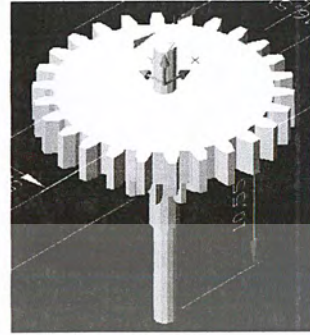
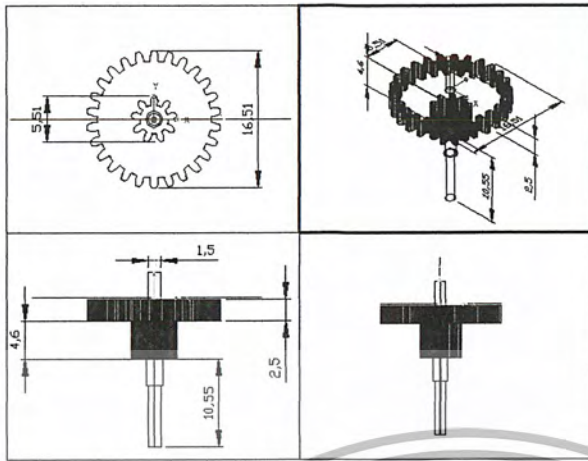
## 8.7 ตัวหมุดตั้งปริมาตร



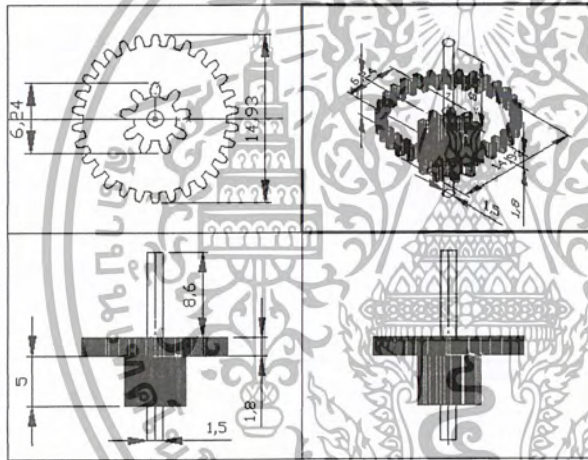
ทำจากพลาสติก นำมากลึงและตัดให้ได้ตามแบบ แล้วทำร่องโดยการตะไบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

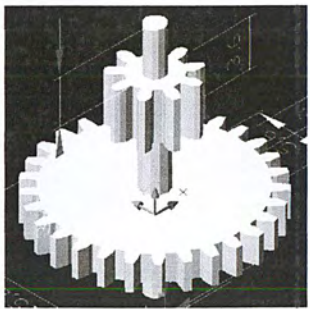
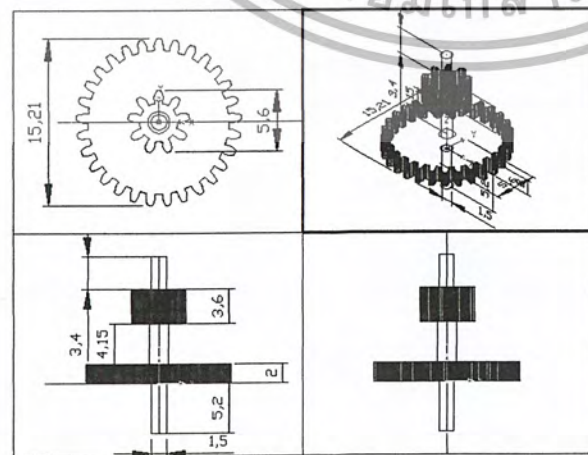
8.8 ชุดเฟือง



เฟืองตัวที่ 1

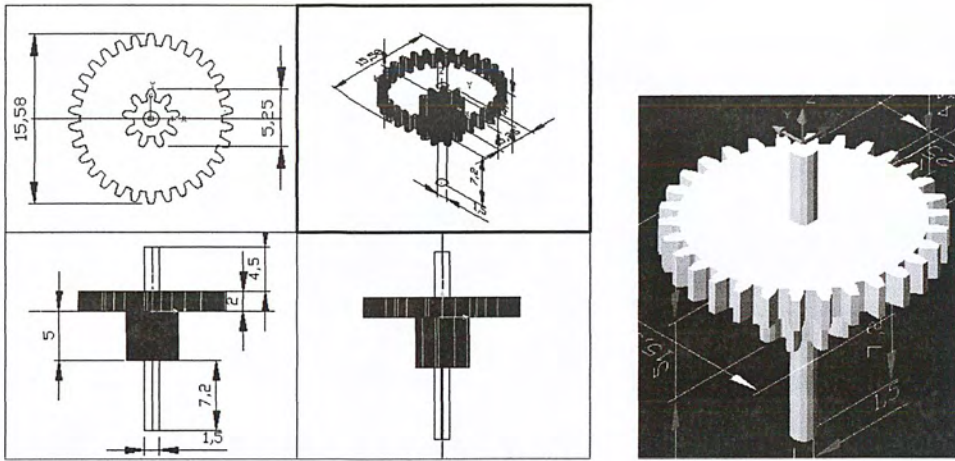


เฟืองตัวที่ 2

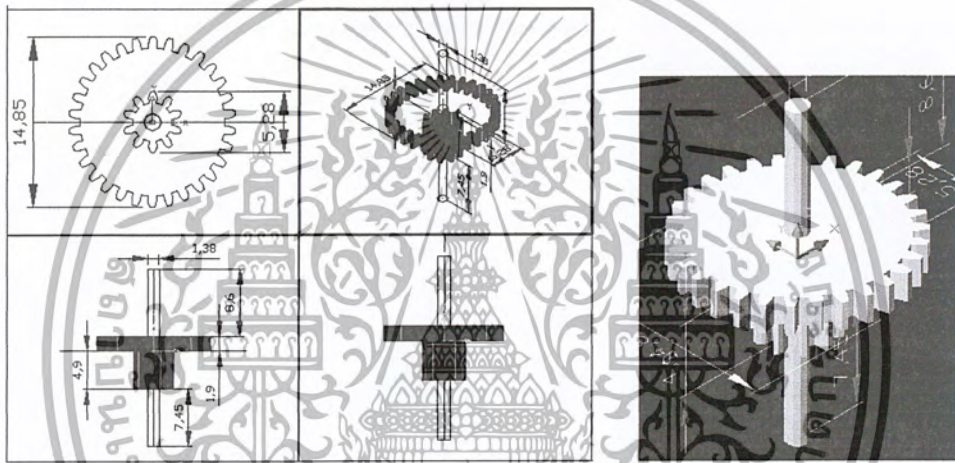


เฟืองตัวที่ 3

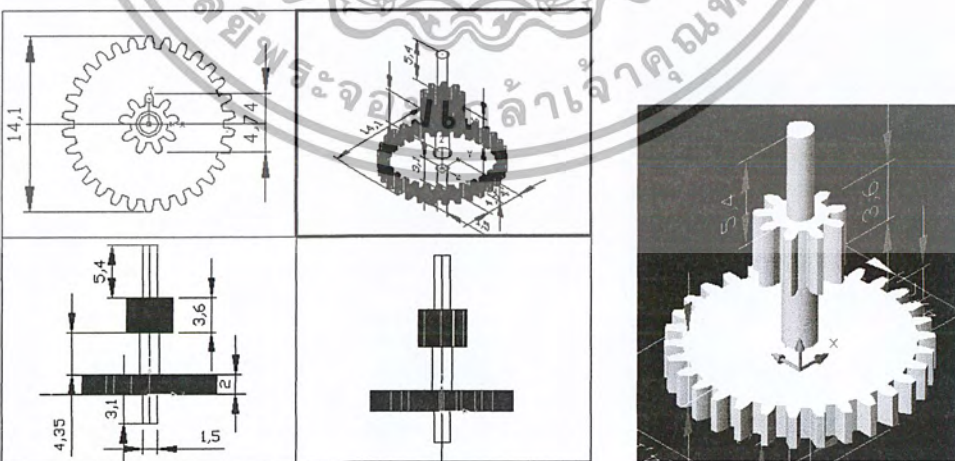
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เฟืองตัวที่ 4

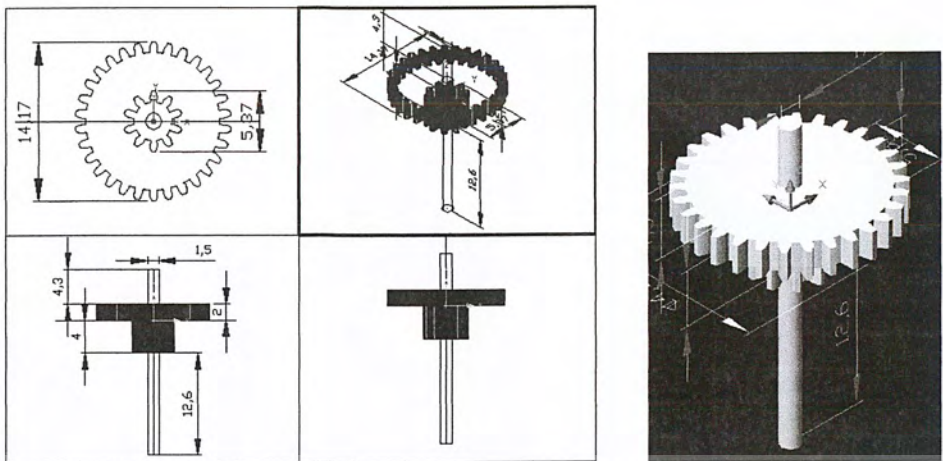


เฟืองตัวที่ 5

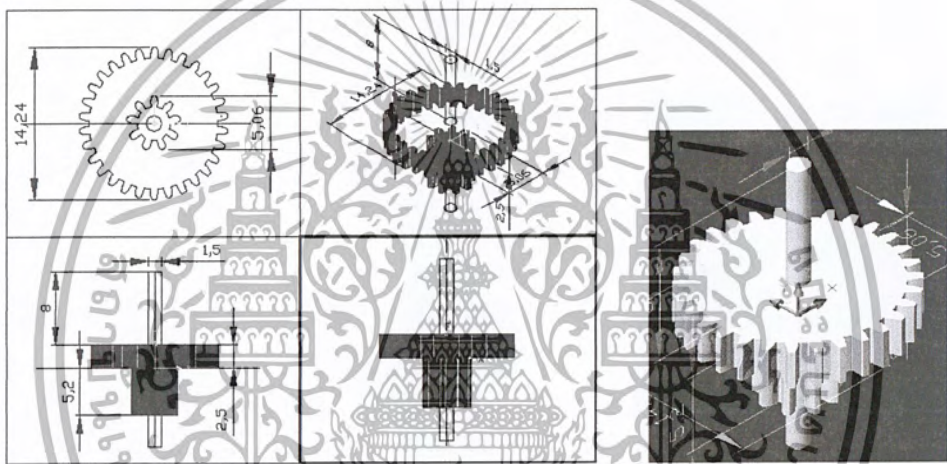


เฟืองตัวที่ 6

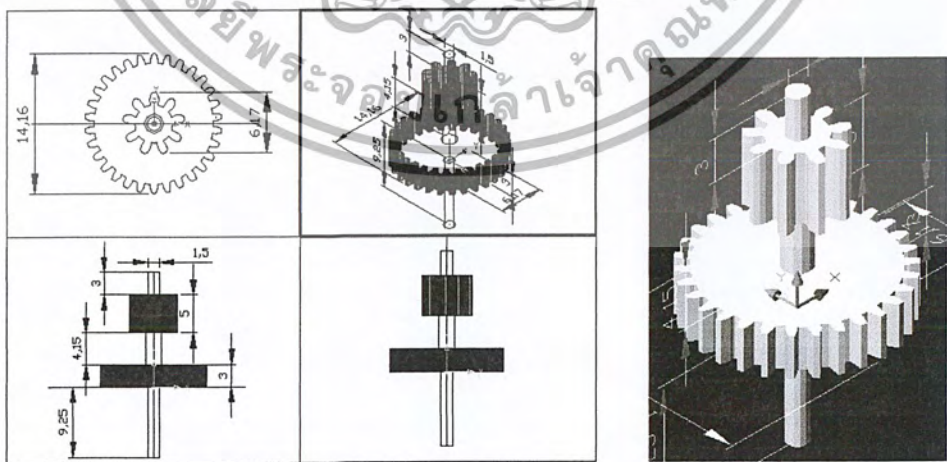
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เฟืองตัวที่ 7

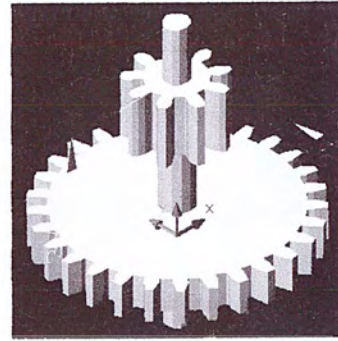
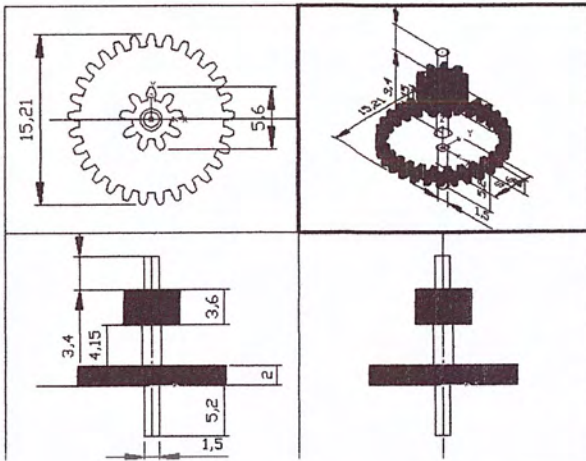


เฟืองตัวที่ 8

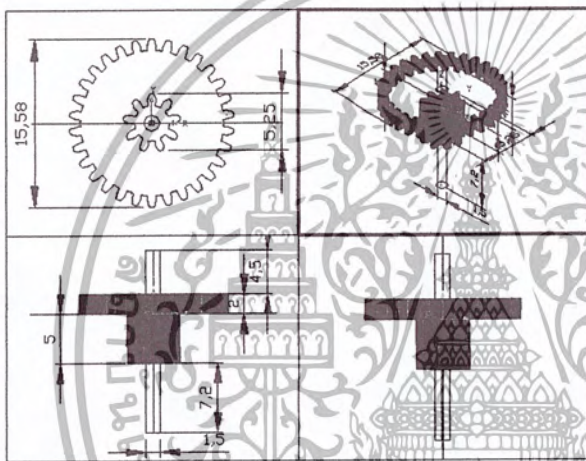


เฟืองตัวที่ 9

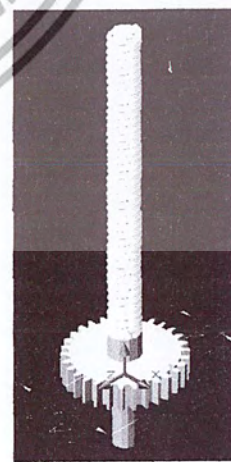
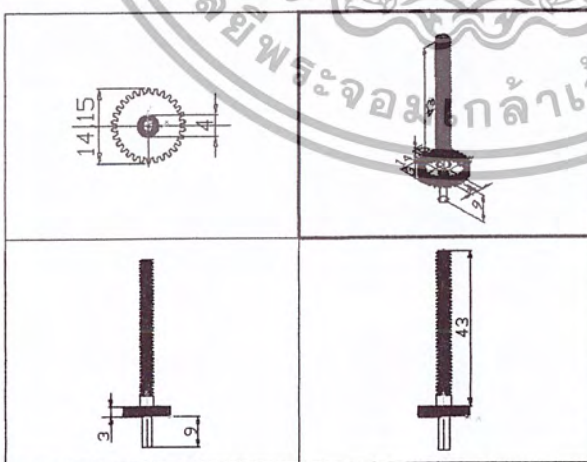
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เฟืองตัวที่ 10



เฟืองตัวที่ 11

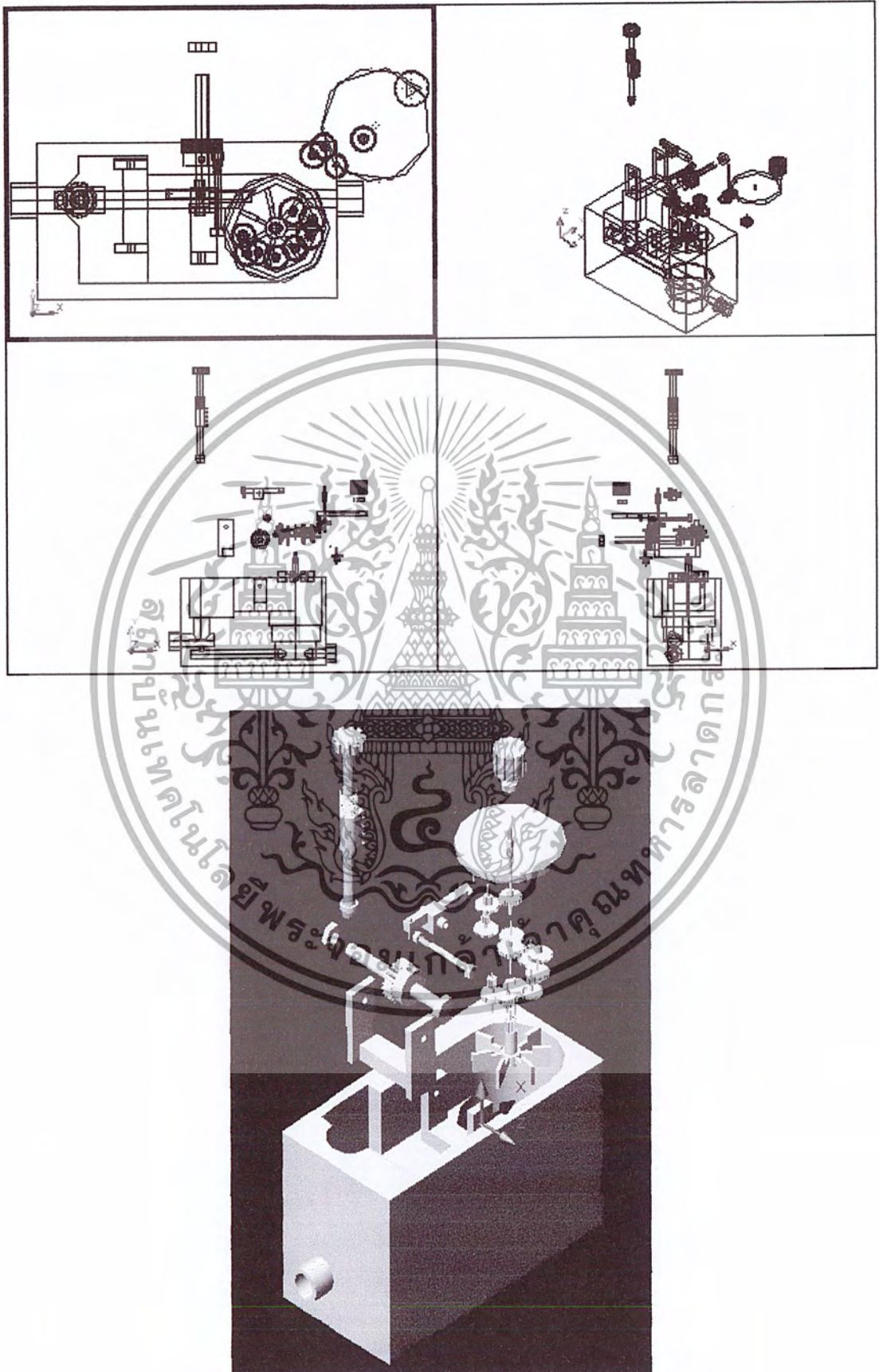


เฟืองตัวที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

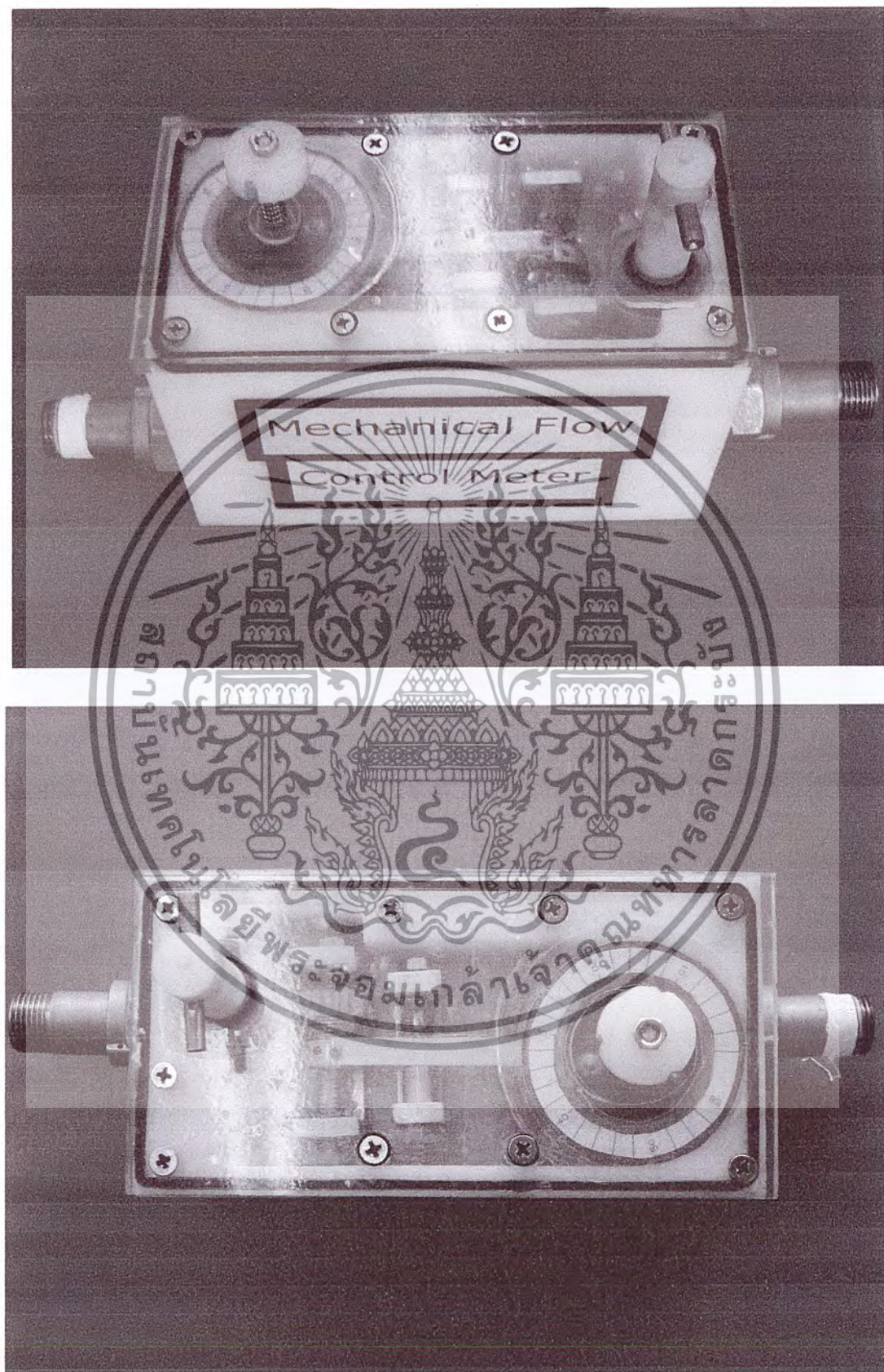


## 8.10 ชุดประกอบเสร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.11 ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น



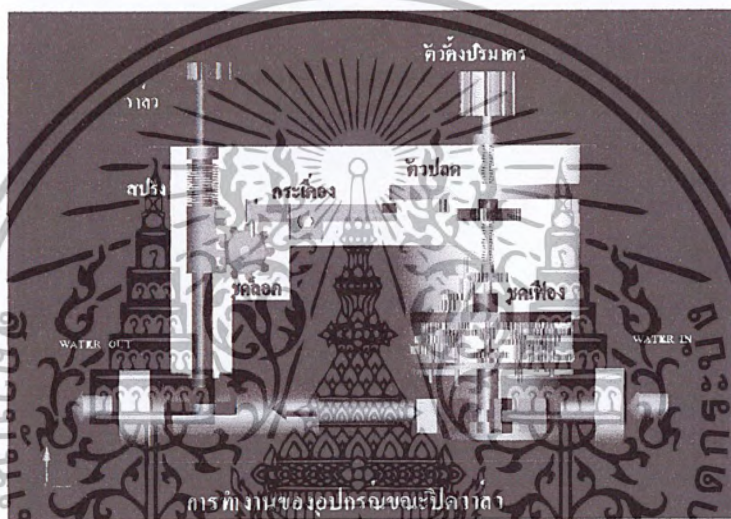
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

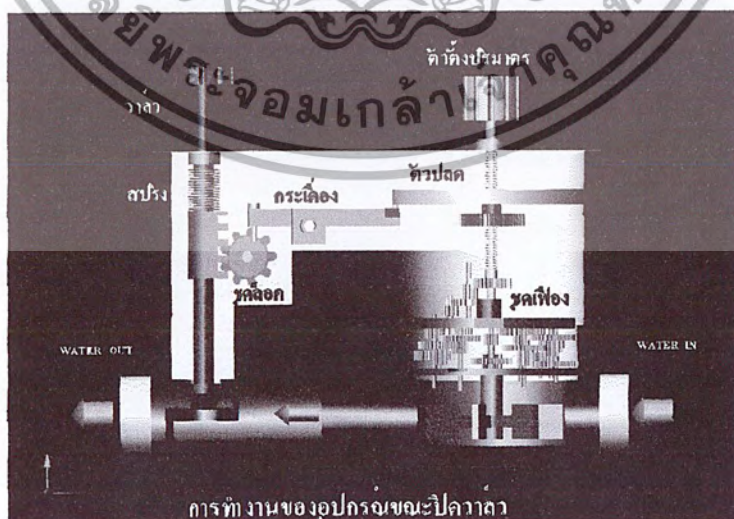
### หลักการทํางานและการทดสอบ

#### 9.1 หลักการทํางาน

เมื่อได้ตั้งค่าปริมาณการใช้น้ำ (ปริมาตรตั้งแต่ 2 - 56  $m^3$ ) และเปิดวาล์วแล้ว น้ำจะไหลผ่านอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อ ซึ่งมีผลให้น้ำไปหมุนใบพัดและทำให้ชุดเฟืองหมุนพร้อมตัวกดกระเดื่อง ทำให้ตัวปลดกระเดื่องที่ได้ตั้งไว้ลดลงจนกระทั่งถึง 0  $m^3$  จะทำให้ตัวปลดกระเดื่องไปปลดล๊อคชุดปิดวาล์ว น้ำจึงไม่สามารถผ่านอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อได้

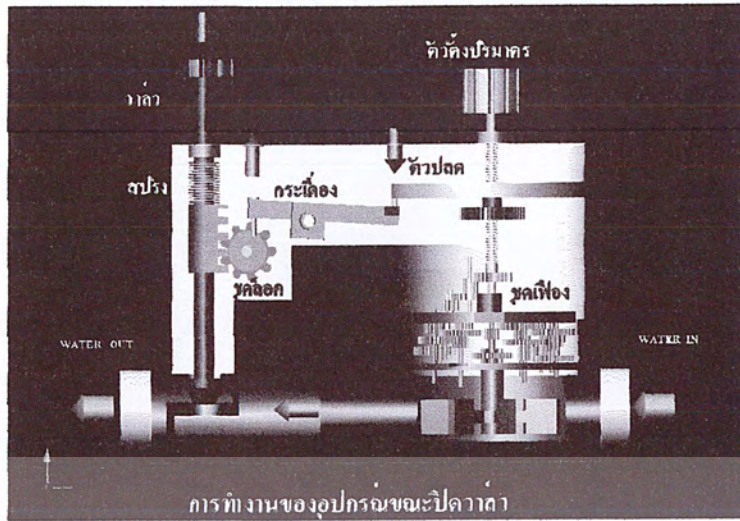


รูปที่ 9.1 แสดงชุดอุปกรณ์ขณะตั้งปริมาตร

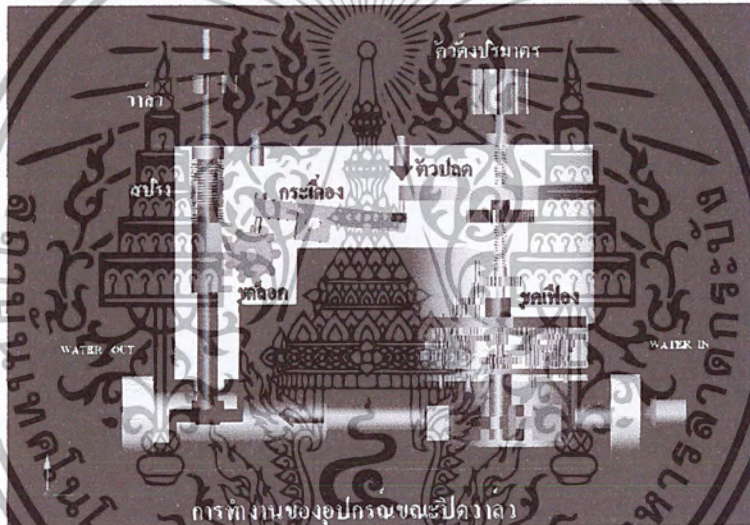


รูปที่ 9.2 แสดงปริมาณน้ำที่ไหลขณะใกล้ถึงจุดตัดปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.3 แสดงการทำงานของหัวปลด กระเดื่อง ขุดล็อกเมื่อถึงปริมาณที่ตั้งไว้



รูปที่ 9.4 แสดงกลไกในการปิดวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.2 การทดสอบอุปกรณ์

### 9.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปืนน้ำ
2. มิเตอร์น้ำ
3. สายยางความยาวประมาณ 1 เมตร
4. Pressure Gage ขนาด 0-30 psi

การออกแบบชุดทดสอบ แบ่งได้เป็น 2 แบบ

### 9.2.2 แบบที่ 1

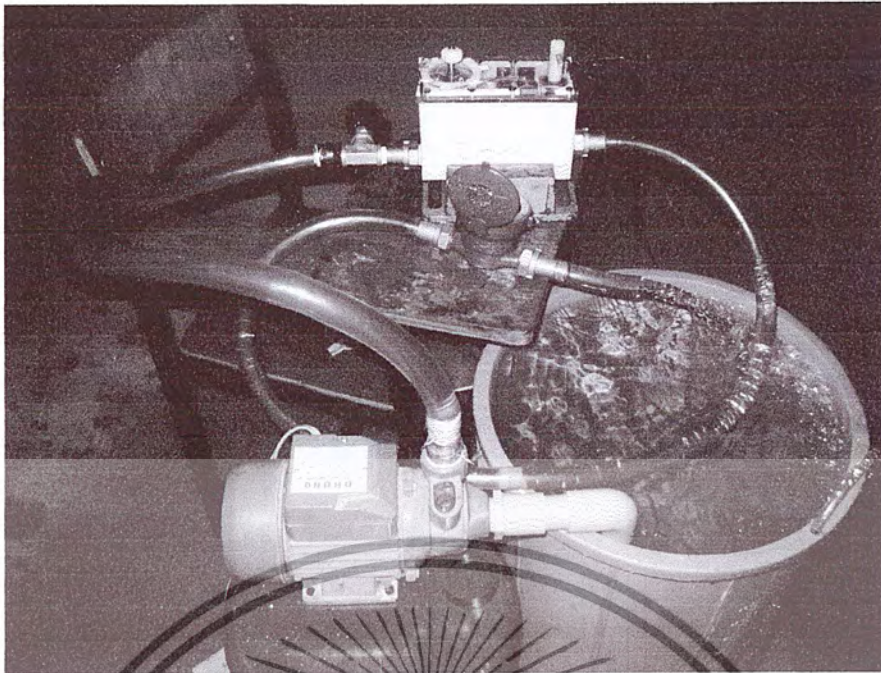
การทดสอบการทำงานของกลไกอุปกรณ์ โดยการใช้ลมผ่านอุปกรณ์และต้องมีการใช้น้ำเพื่อหล่อลื่นการทำงานของชุดเฟือง เพื่อป้องกันการเสียหายด้วย และตรวจสอบว่าอุปกรณ์ทำงานได้ตามต้องการหรือไม่



รูปที่ 9.5 การทดสอบการทำงานของกลไกอุปกรณ์

### 9.2.3 แบบที่ 2

การทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ โดยการต่ออุปกรณ์เข้ากับปืนน้ำ และต่อทางน้ำออกเข้ากับมิเตอร์วัดน้ำทั่วไป เพื่อดูความเที่ยงตรงของอุปกรณ์



รูปที่ 9.6 การทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 10

### ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

#### 10.1 ผลการทดลอง

จากการที่เราได้สร้างอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อ และได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ได้ระหว่างมิเตอร์น้ำทั่วไป ได้ดังนี้

จำนวน (ชั่วโมง)	มิเตอร์น้ำทั่วไป ( $m^3$ )	อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำ ( $m^3$ )
2	2.264	2.182
4	4.530	4.471
6	6.784	6.646
8	9.056	8.928
10	11.321	11.220

#### ตารางที่ 10.1 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ได้

ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์  
เมื่ออุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อได้ทำงานไป  $10 m^3$  จะเกิดความผิดพลาดขึ้น

$$[(\text{ผลต่างของค่าที่วัดได้}) / (\text{ปริมาณน้ำที่วัดได้จริง})] \times 100 \quad (10.1)$$

$$\text{จากสมการ 10.1} \quad \frac{(11.321 - 11.220)}{11.321} \times 100\% = 0.89\%$$

#### 10.2 สรุปผลการทดลอง

1. อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อ สามารถตั้งค่าและตัดการไหลของปริมาณน้ำตามที่ตั้งไว้ได้ตามต้องการ
2. อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อ จะเกิดข้อผิดพลาดเล็กน้อยถ้าการไหลในท่อเป็นแบบปั่นป่วน
3. อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อมีการเกิดแบล็คแล็ช

#### 10.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

1. อุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อยังมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขึ้นส่วนบางชิ้นงานต่อการสึกหรอเมื่อใช้กับน้ำเป็นเวลานาน
3. การดึงวาล์วเพื่อเปิดวาล์วให้แรงดึงมากเกินไป
4. การหมุนตั้งปริมาตรอาจมีการคลาดเคลื่อนได้

#### 10.4 ข้อเสนอแนะ

1. เราสามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ควบคุมการเปิด-ปิดน้ำในท่อให้มีขนาดเล็กลงได้ โดยการออกแบบ และใช้วัสดุที่เหมาะสม
2. การเจาะรูเพื่อวางเฟืองควรเจาะให้พอดี โดยการเลือกดอกสว่านที่เหมาะสม
3. การทดลองไม่ควรให้มีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน เพราะจะทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อน
4. ควรต่อท่อทดลองให้มีความยาว 1 เมตรขึ้นไป เพื่อลดการไหลแบบปั่นป่วน



### บรรณานุกรม

- [1] Machine Design 1, ดร. วรินทร์ อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 2541
- [2] Machine Design 2, ดร. วรินทร์ อิงภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 2541
- [3] กลศาสตร์ของแข็ง, บรรจบ อรชร, บริษัท พิมพ์ดี จำกัด, กรุงเทพฯ, 2542
- [4] Introduction to Fluid Mechanics, Robert W. Fox Alan T, Modonald , John Wiley & Sons , Inc.
- [5] ตารางงานโลหะ, รศ. บรรเลง ศรีนิต และ ผศ. ประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์ , สำนักพิมพ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้