



การศึกษาความล้าของเหล็กกล้า S45C ที่อยู่ภายใต้แรงบิด  
A Study Fatigue of Steel S45C Subjected to Torsion



ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การศึกษาความล้าของเหล็กกล้า S45C ที่อยู่ภายใต้แรงบิด  
A Study Fatigue of Steel S45C Subjected to Torsion



ประเสริฐ วิโรจน์ช้วน

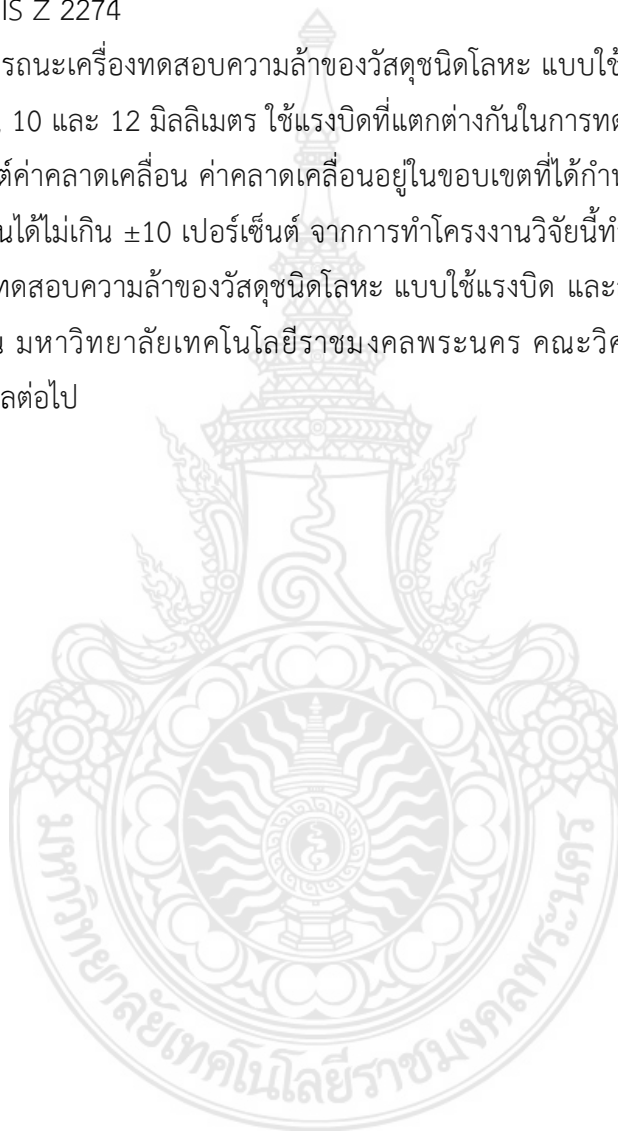
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### บทคัดย่อ

เครื่องทดสอบความล้าของวัสดุชนิดโลหะ แบบใช้แรงบิด ที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องที่มีขนาดกะทัดรัดใช้แรงบิดเป็นภาระแรงกระทำในการทดสอบ ซึ่งสามารถทดสอบได้สูงสุดถึง 200 นิวตัน-เมตร ใช้ระบบนิวแมติกเป็นต้นกำลัง ใช้ทดสอบวัสดุชนิดโลหะ คือ เหล็ก S45C ขึ้นรูปขึ้นงานตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274

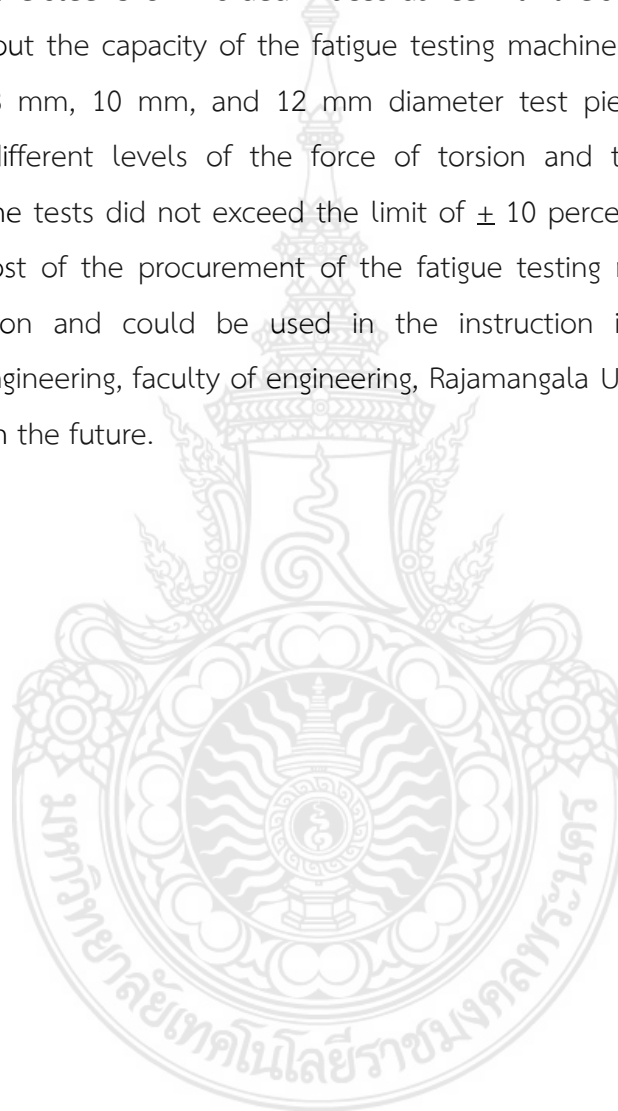
การหาสมรรถนะเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุชนิดโลหะ แบบใช้แรงบิด ขึ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันในการทดสอบ พบว่าในการทดสอบหาค่ามีเปอร์เซ็นต์ค่าคลาดเคลื่อน ค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ คือ มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์ จากการทำโครงการวิจัยนี้ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุชนิดโลหะ แบบใช้แรงบิด และสามารถนำไปประกอบการเรียนการสอนใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลต่อไป



## ABSTRACT

The fatigue testing machine that uses the force of torsion is invented to be a compact machine that uses the torsion as the force in the test. From the tests, it achieved the highest of 200 newton meters using pneumatics to test the metal materials, i.e. the steel S45C molded in accordance with the JIS Z 2274 standard.

To find out the capacity of the fatigue testing machine that uses the force of torsion with 8 mm, 10 mm, and 12 mm diameter test pieces, the machine was tested with different levels of the force of torsion and the percentage of the deviation of the tests did not exceed the limit of  $\pm 10$  percent. This research could reduce the cost of the procurement of the fatigue testing machine that uses the force of torsion and could be used in the instruction in the department of mechanical engineering, faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon in the future.



### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้สำเร็จล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่าน ทั้งนักศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบุคคลภายนอก ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ โดยได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี

ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีความล้า (Fatigue)	3
2.2 การทดสอบการล้า (Fatigue test)	7
2.3 ระบบนิวมแมติก	10
2.4 เพลาส่งกำลัง	16
2.5 เฟือง	18
2.6 ตลับลูกปืน	21
2.7 การบิด	24
2.8 โหลดเซลล์ (Load cell)	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.2 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและวางแผน	32
3.3 ออกแบบการสร้างเครื่องทดสอบ	32
3.4 การสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด	32

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการวิจัย	
4.1 การเตรียมการทดสอบ	44
4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	46
4.3 ผลการทดสอบ	52
4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	62
5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย	63
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	63
5.3 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก ก.	67
ภาคผนวก ข.	71
ประวัติผู้เขียน	73



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load	9
2.2 รายละเอียดโครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง	13
2.3 ขนาดระบุเพลตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969	17
4.1 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร	53
4.2 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 60 นิวตัน-เมตร	54
4.3 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 80 นิวตัน-เมตร	55
4.4 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 100 นิวตัน-เมตร	56
4.5 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 120 นิวตัน-เมตร	57
4.6 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 140 นิวตัน-เมตร	58
4.7 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 160 นิวตัน-เมตร	59
4.8 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 180 นิวตัน-เมตร	60
4.9 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 200 นิวตัน-เมตร	61
4.10 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ที่แรงบิดมีการเปลี่ยนแปลง	62



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พื้นผิวการแตกหักจากการลาของเหล็กกล้า 1040	4
2.2 พื้นผิวเรียบจากการขัดสีของรอยแตกเริ่มต้น	4
2.3 กลไกในการเกิดการขับออกและการยุบเขาของแถบการเลื่อน	5
2.4 ผลการทดสอบการลา S-N curve	7
2.5 ความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกิดจาก cyclic load	8
2.6 ตัวอย่าง S-N Curve ของเหล็ก A517	10
2.7 S-N Curve ของอะลูมิเนียม	10
2.8 วงจรระบบนิวแมติกพื้นฐาน	11
2.9 อุปกรณ์ในระบบนิวแมติก	11
2.10 องค์ประกอบภายในของกระบอกลูกสูบสองทาง	12
2.11 หลักการทำงานภายในของกระบอกลูกสูบสองทางเมื่อจ่ายลมอัดภายใน	12
2.12 โครงสร้างภายในของกระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง	12
2.13 กระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทางที่มีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทก	13
2.14 วาล์ว 3/2 ปกติปิด เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์กลับด้วยแรงสปริง	14
2.15 วาล์ว 5/2 เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว	15
2.16 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทำเพลลา	17
2.17 เพลลาอยู่ภายใต้แรงบิด	18
2.18 หลักการทำงานของเฟือง	19
2.19 เฟืองตรง (Spur Gears)	20
2.20 เฟืองสะพาน (Rack Gears)	20
2.21 ส่วนประกอบตลับลูกปืน (Bearing)	21
2.22 ลูกปืนกลมและลูกปืนทรงกระบอกลูก	22
2.23 ความสามารถในการรับแรงของตลับลูกปืน	22
2.24 ตลับลูกปืนตุ๊กตา (Bearing Units)	23
2.25 โมเมนต์ที่กระทำรอบแกน	24
2.26 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell)	25
2.27 สเตรนเกจ (Strain gauge)	26
2.28 วงจรวีตสโตนบริดจ์	26
3.1 Flow-Chart ขั้นตอนการดำเนินงาน	31
3.2 การเตรียมเหล็กแผ่น และตำแหน่งการเจาะรู	32
3.3 ลักษณะโครงสร้างของตัวเครื่อง	33
3.4 เฟืองขับ	33
3.5 เฟืองสะพาน	34
3.6 ตลับลูกปืน	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 เพลางานชิ้นที่ 1 ที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงาน	35
3.8 เพลางานชิ้นที่ 2 ที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงานและเฟืองขับ	35
3.9 โหลดเซลล์	35
3.10 ครอบอกสูบลม	36
3.11 วาล์ว 5/3 แบบเลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว	36
3.12 วาล์ว 3/2 แบบเลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับแรงสปริง	37
3.13 วาล์วควบคุมอัตราการไหล	37
3.14 Stopper Cylinder	37
3.15 ชุดควบคุมความดันและปรับสภาพลมอัด	38
3.16 ถังลม	38
3.17 ฐานเครื่องทดสอบ	39
3.18 การติดตั้งกระบอกสูบนิวแมติกยึดติดกับเฟืองสะพาน และตัวเครื่องทดสอบ ความล้าแบบบิด	39
3.19 การติดตั้งเพลางานที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงาน และเฟืองขับ เข้ากับตลับลูกปืน	40
3.20 โหลดเซลล์ ยึดติดกับเพลางาน	40
3.21 ลิมิทสวิตช์ยึดติดกับตัวเครื่อง	41
3.22 Stopper Cylinder ยึดติดกับตัวเครื่อง	41
3.23 ระบบนิวแมติก และชุดวาล์วควบคุม	42
3.24 ระบบควบคุม จอแสดงผล ยึดติดกับตัวเครื่อง	42
3.25 เครื่องทดสอบความล้าแบบบิด	43
4.1 เครื่องทดสอบความล้าแบบใช้แรงบิด	44
4.2 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร	45
4.3 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร	45
4.4 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร	45
4.5 เครื่องอัดลม	46
4.6 สวิตช์โยก ON-OFF ของกล่องควบคุม	46
4.7 การปรับตั้งค่าโหลดเซลล์	47
4.8 ชุดปรับระยะฐานของหัวจับขึ้นทดสอบที่ติดตั้งโหลดเซลล์	47
4.9 ตำแหน่งปุ่ม MNUAL	48
4.10 ตำแหน่งการติดตั้งขึ้นทดสอบ	48
4.11 ตำแหน่งปุ่ม MNUAL เป็น AUTOMATIC	48
4.12 สวิตช์สถานะการทำงานของเครื่องตำแหน่ง FORCE	49
4.13 ตำแหน่งจอและปุ่มควบคุมแรงบิด	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กดปุ่ม RESET ที่หน้าจอแสดงจำนวนรอบให้เป็นศูนย์	50
4.15 ตำแหน่งปุ่ม START เครื่องทดสอบ	50
4.16 ตำแหน่งปุ่ม STOP	51
4.17 ตำแหน่งปุ่ม EMERGENCY	51
4.18 งานที่เกิดความเสียหายจากความ	52
4.19 จอแสดงผลจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบขาด	52



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

##### คุณสมบัติทั่วไปของเหล็ก S45C

เหล็กกล้า S45C เป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (medium carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ จัดเป็นกลุ่มเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน ทั้งความแข็งแรง ความเหนียวและยังสามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่วไป มีการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ทั้งงานโครงสร้าง งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนประกอบแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เพลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อ ลูกกลิ้ง ลูกรีด แกนไฮดรอลิก กระบอกไฮดรอลิก เป็นต้น

##### การชุบแข็งผิว

เมื่อนำเหล็กกล้านี้มาใช้งานเพื่อรองรับภาระต่าง ๆ ที่มากระทำเป็นเวลานาน อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กกล้าชนิดนี้ เกิดความเสียหาย นั่นคือชิ้นส่วนเกิดการแตกหัก เช่น เพลาของเครื่องจักรกล เป็นต้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของเพลา นั้นภาระหรือแรงที่มากระทำจะมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงที่จุดคราก (yield strength) หรือต่ำกว่าความแข็งแรงเฉือนที่จุดคราก (yield shear strength) ความเสียหายนี้ เรียกว่า ความเสียหายเนื่องจากความล้า (fatigue failure) เพลาที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ทำด้วยเหล็กกล้า S45C จะต้องมีการทดสอบความแข็งแรงหรือความคงทนของชิ้นส่วนนั้น ก่อนนำไปประกอบชิ้นส่วนทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป ซึ่งในการทดสอบวัสดุของชิ้นส่วนมีหลายชนิด หนึ่งใน การทดสอบวัสดุชิ้นส่วนนั้น ๆ คือ การทดสอบความล้าตัวของวัสดุ ซึ่งจะใช้เครื่องทดสอบความล้า ในการทดสอบความล้าของวัสดุจะมีอยู่สามวิธี คือ การดึงหรืออัด การดัด และการบิด การทดสอบความล้าด้วยการดึงนั้นใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อยู่ภายใต้ภาระดึงที่มีการเปลี่ยนแปลง การทดสอบความล้าแบบดัดนั้นใช้กับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่อยู่ภายใต้ภาระดัดที่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เป็นเพลาสำหรับใช้ส่งถ่ายกำลัง ที่อยู่ภายใต้แรงบิดที่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าแรงบิดที่กระทำมีลักษณะกลับไปกลับมา ก็จะทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นควรได้รับการทดสอบด้วยการบิด

ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาความล้าที่เกิดขึ้นกับเพลาเหล็กกล้า S45C เพื่อให้รู้ถึงพฤติกรรมความเสียหายที่จะเกิดขึ้น โดยการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุแบบบิด เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการทดสอบความล้าแบบดัดและแบบดึง และเครื่องทดสอบนี้สามารถนำมาใช้ในการทดสอบวัสดุได้จริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

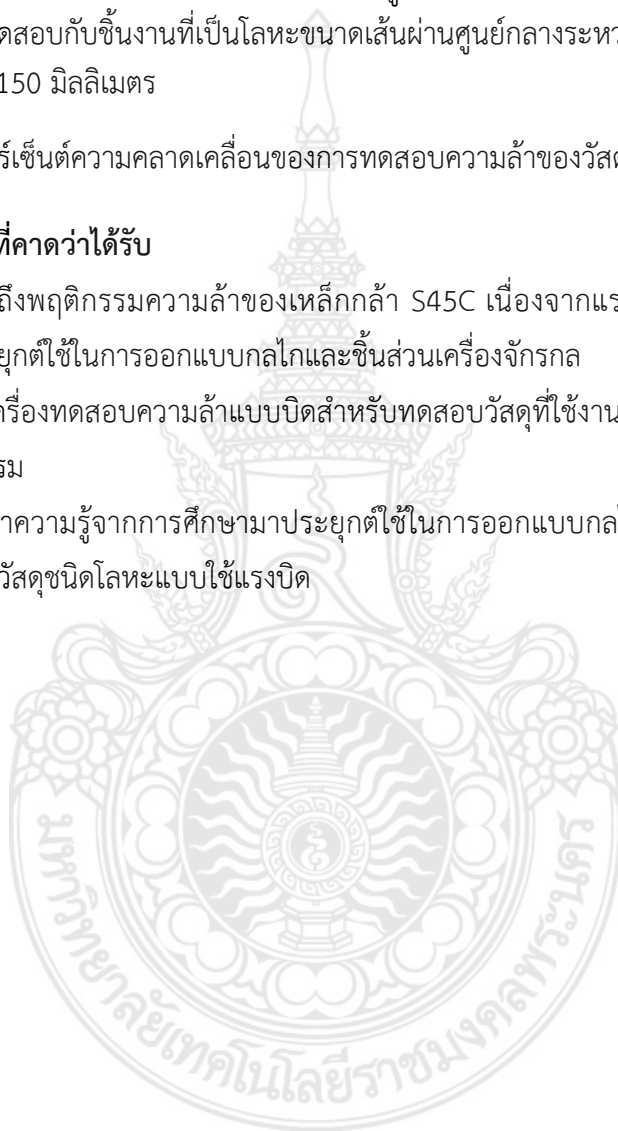
- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมความล้าของเหล็กกล้า S45C เนื่องจากแรงบิดที่มีขนาดแตกต่างกัน
- 1.2.2 เพื่อสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เครื่องสามารถทดสอบแรงบิดกระทำที่อยู่ในช่วง 40 ถึง 200 นิวตัน-เมตร
- 1.3.2 ใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่เป็นโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 6 ถึง 12 มิลลิเมตร มีความยาวไม่เกิน 150 มิลลิเมตร
- 1.3.3 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบความล้าของวัสดุ  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รู้ถึงพฤติกรรมความล้าของเหล็กกล้า S45C เนื่องจากแรงบิด เพื่อนำความรู้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกลไกและชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
- 1.4.2 ได้เครื่องทดสอบความล้าแบบบิดสำหรับทดสอบวัสดุที่ใช้งานได้จริง สำหรับทดสอบวัสดุในทางอุตสาหกรรม
- 1.4.3 ได้นำความรู้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกลไกและระบบของเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุชนิดโลหะแบบใช้แรงบิด



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีความล้า (Fatigue)

ความล้าเป็นความเสียหายประเภทหนึ่งของวัสดุ เกิดจากการได้รับความเค้นแบบซ้ำเติมหรือแบบเป็นวัฏจักรเป็นเวลานาน จำนวนรอบของการรับแรงที่ทำให้วัสดุแตกหัก จะขึ้นอยู่กับขนาดของความเค้นที่กระทำและเงื่อนไขอื่น ๆ ที่กระทำกับวัสดุ เช่น การดัดงอเส้นลวดจนขาดด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง พบว่าต้องทำการดัดงอนานกว่าด้วยจำนวนครั้งมากกว่า เมื่อเทียบกับการดัดงอ เส้นลวดเดียวกันด้วยอัตราการดัดงอที่เร็วขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ แม้จะใช้ความเค้นเท่ากัน แต่ถ้าเพิ่มอัตราเร็วและองศาของการดัดงอจะทำให้วัสดุแตกหักเร็วขึ้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับขนาดของความเค้นที่กระทำ

ชิ้นส่วนโลหะหลายประเภทที่นำไปใช้เพื่อการรับความเค้นแบบหมุนรอบหรือแบบซ้ำเติม จนเกิดความเสียหายที่ความเค้นต่ำกว่าความเค้นปกติที่สามารถรับได้อย่างมาก ความเสียหายเหล่านี้ที่เกิดขึ้นภายใต้การรับความเค้นแบบเป็นวัฏจักรหรือแบบซ้ำเติม เรียกว่า ความเสียหายจากการล้า (fatigue failures) ความเสียหายของชิ้นส่วนโลหะประเมินว่า 90% เกิดจากความล้า (Hosford, 2005) ยกตัวอย่าง ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีความเสียหายจากการล้า ความเสียหายจากการล้าของเพลาลูกเบี้ยวที่มีร่องบาก ดังรูปที่ 2.1 ปกติความเสียหายจากการล้าจะเริ่มเกิดที่จุดศูนย์กลางความเค้น เช่น ส่วนที่เป็นมุมหรือร่องบาก หรือบริเวณที่มีตำหนิหรือมีสิ่งเจือปนทางโลหะวิทยา จากจุดเริ่มแตก รอยแตกจะลุกลามไปยังด้านตรงข้ามของชิ้นส่วนภายใต้การหมุนหรือการรับความเค้นแบบซ้ำเติม ในระหว่างขั้นตอนนี้ของกระบวนการล้าบริเวณที่จับยึด (clamshell) หรือบริเวณขอบรอยบาก (beach mark) ของชิ้นส่วนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายบริเวณที่เป็นพื้นที่หน้าตัดจะลดจนไม่สามารถรับความเค้นได้อีก จากนั้นชิ้นส่วนจะเกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ โดยปกติพื้นผิวรอยแตกมีสองบริเวณที่ต่างกัน กล่าวคือ บริเวณที่มีผิวเรียบซึ่งเกิดจากการขัดสีกันของผิวรอยแตกเริ่มต้น ดังรูปที่ 2.1 กลายเป็นรอยแตกลุกลามไปทั่วหน้าตัด และอีกบริเวณหนึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งเกิดจากการแตกหักของพื้นที่หน้าตัดที่เหลือรับความเค้นที่สูงเกินไปกว่าจะรับได้ใน รูปที่ 2.2 รอยแตกจากการล้าจะลุกลามตลอดพื้นที่หน้าตัดก่อนเกิดการแตกหักในท้ายที่สุด



รูปที่ 2.1 พื้นผิวการแตกหักจากการล้าของเหล็กกล้า1040 (สิทธิชัย, 2545)



รูปที่ 2.2 พื้นผิวเรียบจากการขัดสี ของรอยแตกเริ่มต้น (สิทธิชัย, 2545)

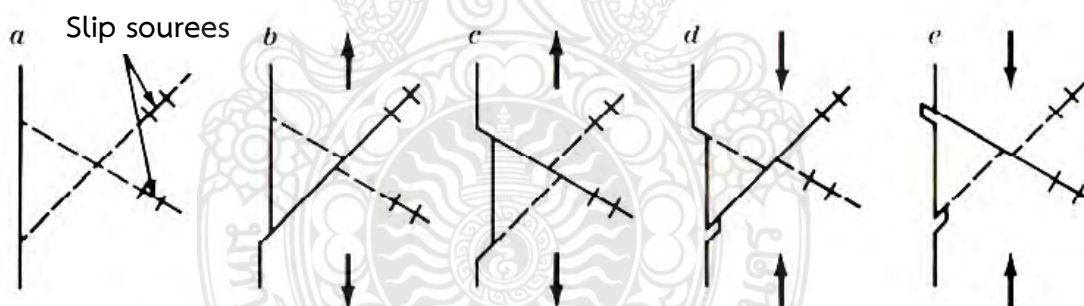
ชั้นสวนตะขอรถครนชั้นสวนเครื่องจักรและผิวของเครื่องบินจะเกิดการแตกหักเสียหายจากการรับความเค้นแบบเวียนรอบปกติ ความเค้นที่เกิดเฉพาะบริเวณเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างถาวร ภายในชิ้นงานตลอดจนเกิดรอยร้าวและแตกหักหลังจากรับแรงสลับไปมาจำนวนหนึ่ง โดยเริ่มแรกจะเกิดรอยร้าวจากนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นรอบรอยร้าวจะทำให้วัสดุแตกหัก โดยเฉพาะในวัสดุเปราะภายใต้ความเค้นดึงจะทำให้เกิดความเข้มข้นความเค้นที่บริเวณปลายของรอยร้าว ทำให้รอยร้าวลุกลามจนชิ้นงานแตกหัก ช่วงที่รอยร้าวลุกลามวัสดุจะมีความเครียดแบบถาวร ความเสียหายจากการล้า สวนใหญ่เริ่มจากรอยแตกขนาดเล็ก (microscopic cracks) ซึ่งเกิดการลุกลามและขยายตัวจากความเค้นที่สะสมเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกินจุดแตกหักของวัสดุ รอยร้าวเหล่านี้มักเกิดจากแนวการเลื่อน (slip lines) ซึ่งเกิดขึ้นในวัสดุจากการรับความเค้นแบบซ้ำ ๆ และเกิดจาก

การดิสโลเคชันขนาดเล็ก โดยมีความบกพร่อง เช่น รอยขีดข่วนที่พื้นผิว ร่องบาก สิ่งเจือปนและจุดบกพร่องอื่น ๆ เป็นจุดกำเนิดของรอยร้าว

การนำชิ้นงานโลหะเหนียวเนื้อเดียวกันไปปรับความเค้นแบบหมุนรอบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นฐานในระหว่างกระบวนการล้าดังนี้

1. การเกิดจุดเริ่มต้นของรอยแตกหักเป็นขั้นเริ่มต้นของการเสียหายจากการล้า

2. การเติบโตของรอยแตกในรูปของแถบการเลื่อน จุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดจากการเสียรูปถาวรมาจากกระบวนการที่ไม่สามารถเกิดการเสียรูปย้อนรอยเดิมได้อย่างสมบูรณ์ การเสียรูปถาวรในทิศทางหนึ่งแล้วเกิดสลับในทิศทางกลับกัน เป็นเหตุทำให้พื้นผิวเกิดสันและร่อง เรียกว่า การขับออกของแถบการเลื่อน (slip band extrusion) และการยุบเข้าของแถบการเลื่อน (slip band intrusion) เกิด ขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบโลหะ ดังรูปที่ 2.3 เช่นเดียวกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้น ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวและความเสียหายตลอดแถบการเลื่อนที่เกิดขึ้น เป็นเหตุทำให้เกิดรอยแตกที่บริเวณพื้นผิวหรือที่บริเวณใกล้พื้นผิว ซึ่งจะลุกลามเข้าไปในชิ้นทดสอบตลอดระยะนาบที่ได้รับความเค้นเฉือนสูงขั้นนี้เรียกว่า การเติบโตขั้นที่หนึ่ง (stage I) ของรอยแตกจากการล้าและอัตราการเติบโตของรอยแตกโดยปกติจะช้ามาก ประมาณ  $10^{-10}$  m/cycle



รูปที่ 2.3 กลไกในการเกิดการขับออกและการยุบเข้าของแถบการเลื่อน (สิทธิชัย, 2545)

3. การเติบโตของรอยแตกบนระยะนาบที่ได้รับความเค้นเฉือนสูง ในระหว่างขั้นที่หนึ่งรอยแตกอาจเติบโตในโลหะหลายผลึก แต่จะมีขนาดเพียงสองถึงสามเกรนเท่านั้น ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางไปในทิศ ตั้งฉากกับความเค้นดึงสูงสุดบนชิ้นทดสอบโลหะ การเติบโตในขั้นที่สอง (stage II) รอยแตกจะเกิดการลุกลามด้วยอัตราค่อนข้างเร็ว เช่น  $10^{-6}$  m/cycle จากนั้นร่องความล้า (fatigue striation) จะโตขึ้น อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นรอยแตกขวางกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 2.1 ร่องการล้าเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ความเสียหายจากการล้า ในการกำหนดจุดเริ่มและทิศทางของการลุกลามของรอยแตกจากความล้า



4. ความเสียหายแบบเหนียวสูงสุด (ultimate ductile failure) สุกท้ายเมื่อรอยแตกครอบคลุมพื้นที่มากพอจนหน้าตัดของเนื้อโลหะที่เหลือไม่สามารถรองรับแรงที่กระทำ ขึ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักแบบเหนียว

ตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของโลหะ ความแข็งแรงการล้าของโลหะหรือโลหะผสมนอกจากได้รับผลกระทบจากองค์ประกอบทางเคมีของโลหะ และยังได้รับผลกระทบจากตัวแปรอื่น ๆ ด้วยตัวแปรที่สำคัญที่สุดได้แก่

1. จุดรวมความเค้น (stress concentration) ความแข็งแรงการล้าจะลดลงอย่างมาก ถ้ามีจุดสะสมความเค้น เช่น รอยบาก ฟองอากาศ ร่องสลัก และการเปลี่ยนรูปของหน้าตัด ตัวอย่างเช่น ความเสียหายจากการล้า ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเริ่มเกิดจากร่องสลักในเพลาลูกเบี้ยว ความเสียหายจากการล้าสามารถลดได้โดยการออกแบบอย่างระมัดระวัง โดยหลีกเลี่ยงรูปทรงที่จะทำให้เกิดการสะสมของความเค้น

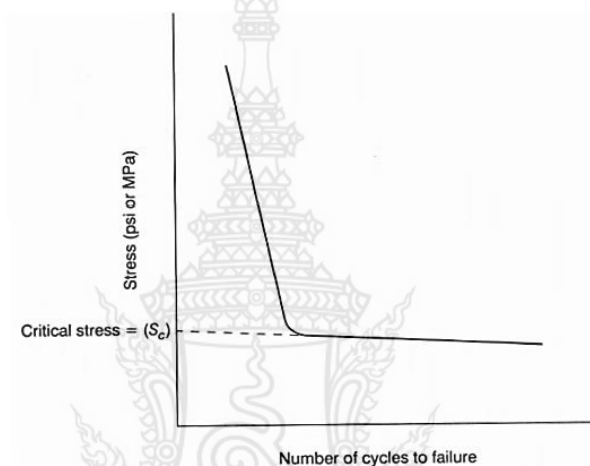
2. ความหยาบของพื้นผิว (surface roughness) ปกติพื้นผิวสุดท้ายของชิ้นทดสอบโลหะที่มีความเรียบมากกว่ามีความแข็งแรงการล้าที่สูงกว่า เนื่องจากพื้นผิวหยาบจะมีการสะสมความเค้นซึ่งจะทำให้เกิดการเกิดรอยแตกจากการล้า

3. สภาพของพื้นผิว (surface condition) เนื่องจากความเสียหายจากการล้าสูงสุดเริ่มเกิดที่ผิวของโลหะ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวจึงมีความสำคัญต่อความแข็งแรงการล้าของโลหะ ยกตัวอย่าง กระบวนการชุบผิวแข็ง เช่น carburizing และ nitriding ซึ่งจะทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้าแข็งขึ้นส่งผลทำให้มีอายุการล้าเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม decarburizing จะทำให้พื้นผิวของเหล็กอ่อนลงและมีอายุการล้าลดลง เช่นเดียวกับการทำให้พื้นผิวของโลหะมีความเค้นตกค้างโดยการขึ้นรูปจะช่วยเพิ่มอายุการล้าได้

4. สิ่งแวดล้อม (environment) ถ้าโลหะมีการรับความเค้นแบบหมุนรอบในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน การกัดกร่อนทางเคมีจะเร่งอัตราการลุกลามของรอยแตกจากการล้าการรวมกันของการกัดกร่อนกับการรับความเค้นแบบหมุนรอบของโลหะเรียกว่า การล้าจากการกัดกร่อน (corrosion fatigue)

ความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหักจากการล้าจะกำหนดจากระดับความแตกต่าง และชนิดของความเค้น โดยความเค้นอาจเป็นความเค้นตามแนวแกน ความเค้นเฉือนบิด หรือดัดงอ ค่าความเค้นที่วัสดุเกิดการแตกหักจากการล้าเรียกว่า ความแข็งแรงการล้า (fatigue strength) ขีดจำกัดความเค้น (limiting stress) หรือความเค้นวิกฤต (critical stress) เป็นความเค้นในช่วงที่วัสดุสามารถรับแรงแบบซ้ำ ๆ โดยไม่แตกหักและไม่ขึ้นกับจำนวนรอบ ซึ่งเรียกว่า ขีดจำกัดความทนทาน (endurance limit)

การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลายาว บางครั้งอาจเป็นเดือนหรือเป็นป  
 ปกติการทดสอบการล้าจะไม่ใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพหรือการตรวจสอบ เนื่องจากต้องใช้เวลา  
 และความพยายามค่อนข้างมากในการจัดเก็บข้อมูลที่จำเป็น โดยในการทดสอบความล้ามีเครื่องมือ  
 หลายชนิดแต่ทุกชนิดมีสองสิ่งที่เหมือนกัน คือ จำนวนรอบการหมุนต้องสามารถนับได้อย่างถูกต้อง  
 จนกระทั่งชิ้นงานแตกหัก และต้องสามารถบันทึกความเค้นที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้อย่างถูกต้อง ถ้ามี  
 การทดสอบกับชิ้นทดสอบหลายชิ้นด้วยความเค้น



รูปที่ 2.4 ผลการทดสอบการล้า (S-N curve) (สิทธิชัย, 2545)

จากรูปที่ 2.4 จะพบว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นที่ค่อนข้างตรงสองเส้นมาบรรจบกันและ  
 ถ้าทำการลากเส้นกราฟลงมาตัดกับแกนของความเค้นจะทำให้ได้ค่าขีดจำกัดความเค้น หรือความ  
 เค้นวิกฤต ( $S_c$ ) ของวัสดุ

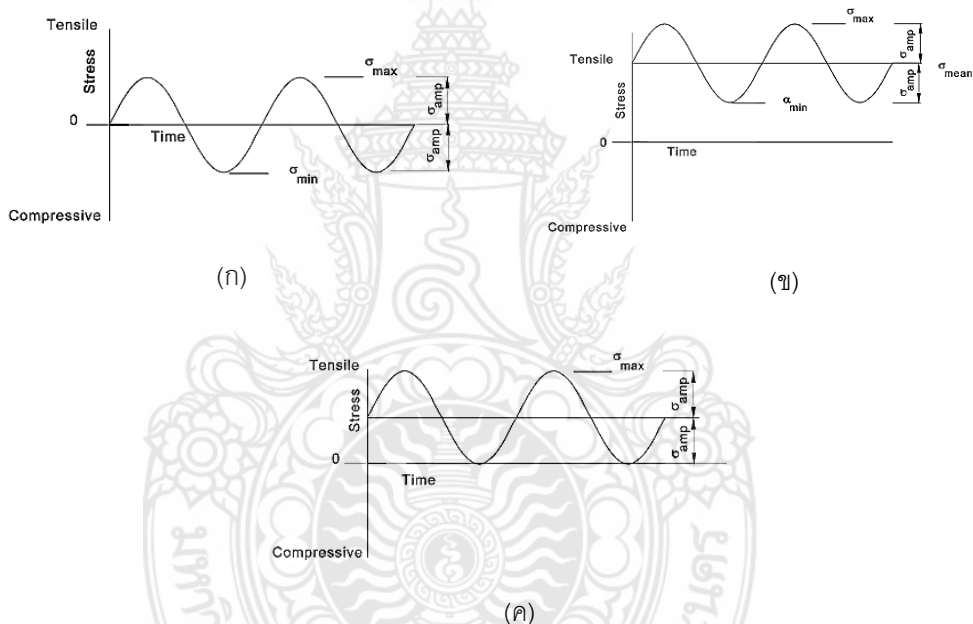
อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงการล้าของวัสดุ คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น  
 ความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง ทำให้ความแข็งแรงการล้าและขีดจำกัดการล้า (endurance limit)  
 ลดลง ด้วย นอกจากนั้นความแข็งแรงการล้าของโลหะยังได้รับผลกระทบจากสวนประกอบทางเคมี  
 และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เช่น การเติมธาตุผสมบางชนิดจะทำให้ความแข็งแรงการล้าของโลหะ  
 เพิ่มขึ้น รวมทั้งกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการทางความร้อนและการขึ้นรูปเย็นจะช่วยให้  
 โลหะมีความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การทำผิวสุดท้ายของวัสดุให้เรียบหรือ  
 กระบวนการต่าง ๆ ที่ จะช่วยลดการเกิดของตีสโลเคชั่น และลดจุดเริ่มเกิด หรือการขยายตัวของรอย  
 แตกกลวนช่วยให้วัสดุมี ความแข็งแรงการล้าเพิ่มขึ้น

## 2.2 การทดสอบการล้า (fatigue test)

ในบางกรณี โครงสร้างและเครื่องจักรกลจะถูกกระทำ โดยแรงกระทำที่กระทำซ้ำไปซ้ำมาเป็นรอบโดยมีขนาดของแรงจะมีค่าที่ไม่คงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แต่มีรูปแบบที่ซ้ำเดิมในหนึ่งช่วงเวลา แรงกระทำในลักษณะดังกล่าวมักจะถูกเรียกว่า cyclic load การกระทำของแรงในลักษณะนี้จะทำให้ความเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เมื่อ cyclic load กระทำต่อโครงสร้างเป็นเวลานานพอควรแล้ว แรงดังกล่าวอาจจะทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติได้ โดยการวิบัตินี้จะถูกเรียกว่า การล้า (fatigue)

จากรูปที่ 2.5 จะสามารถหาความสัมพันธ์ของความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ cyclic load ได้ดังต่อไปนี้

1. stress range เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุด



รูปที่ 2.5 ความเค้นแบบต่าง ๆ ที่เกิดจาก cyclic load (สิทธิชัย, 2545)

2. mean stress เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเค้นต่ำสุด ค่า mean stress นี้อาจจะเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.5 (ก) หรือไม่เท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 2.5(ข) และรูปที่ 2.5(ค) ก็ได้
3. stress amplitude หรือ alternating stress เป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าความเค้นสูงสุดหรือค่าความเค้นต่ำสุดกับค่าความเค้นเฉลี่ย
4. stress ratio หรือ range ratio เป็นอัตราส่วนของค่าความเค้นต่ำสุดกับค่าความเค้นสูงสุด

โดยทั่วไปแล้ว จะบ่งบอกลักษณะของ cyclic load ได้ 2 แบบ คือ บอกค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) ร่วมกับ range ratio และบอกค่า mean stress ร่วมกับ alternating stress ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load เมื่อขึ้นทดสอบถูกทดสอบไปเป็นจำนวนรอบค่าหนึ่งจะถูกเรียกว่า ความแข็งแรงความล้า (fatigue strength) ของวัสดุ และวัสดุ

โดยส่วนใหญ่จะมีค่าความเค้นที่วัสดุนั้นสามารถรองรับได้โดยไม่เกิดการล้าเลย ซึ่งจะเรียกค่าความเค้นดังกล่าวว่า endurance limit ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 เท่าของกำลังของวัสดุที่หาได้จากการทดสอบแบบ static

ตารางที่ 2.1 ค่าความเค้นที่โลหะเกิดการวิบัติโดย cyclic load (สิทธิชัย, 2545)

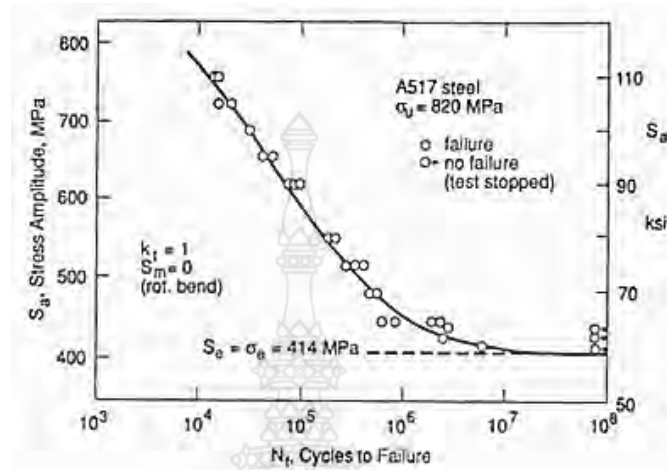
Type of stress variation		Range-ratio nomenclature		Mean-stress nomenclature	
Description	Diagram	Maximum stress	Range ratio	Mean stress	Alternating stress
Steady stress, $\sigma_1$		$\sigma_1$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1.0$	$\sigma_m$	0
Pulsating stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$		$\sigma_1$	$0 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 1$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Pulsating stress, between $\sigma_1$ and 0		$\sigma_1$	$\frac{0}{\sigma_1} = 0$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Partly reversed stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$ , where $-\sigma_1 < \sigma_2 < 0$		$\sigma_1$	$-1 < \frac{\sigma_2}{\sigma_1} < 0$	$\sigma_m$	$\pm \sigma_a$
Completely reversed stress, between $\sigma_1$ and $\sigma_2$ , where $\sigma_2 = -\sigma_1$		$\sigma_1$	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1.0$	0	$\pm \sigma_a = \sigma_1$

ในการทดสอบการล้า (fatigue test) จะนำข้อมูลของความเค้นที่เกิดขึ้นในขึ้นทดสอบกับจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติมาเขียนกราฟ โดยที่กราฟที่ได้จะถูกเรียกว่า S-N Curve ซึ่งกราฟดังกล่าวจะมีแกนตั้งแสดงค่าของความเค้นและมีแกนนอนแสดงจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติแบบล้า ซึ่งมักจะถูกวาด โดยใช้ scale แบบ logarithm ดังรูปที่ 2.6 จากรูป จะเห็นได้ว่า เหล็ก A 517 จะมีค่า endurance limit ที่ 414 MPa ซึ่งมีค่าประมาณ 50% ของกำลังประลัย (ultimate strength) ของเหล็ก

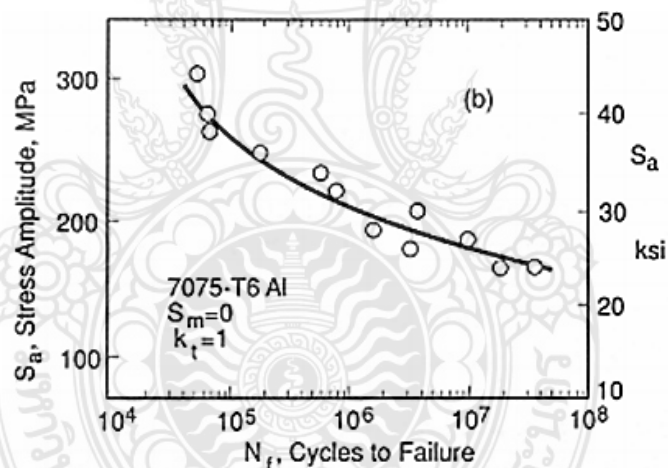
รูปที่ 2.7 แสดง S-N Curve ของอะลูมิเนียม ซึ่งในกรณีนี้ จะเห็นว่าอะลูมิเนียม ไม่มี endurance limit ที่ชัดเจน ซึ่งมาตรฐานการทดสอบจะกำหนดให้ endurance limit ของอะลูมิเนียม เป็นค่าของความเค้นที่ขึ้นทดสอบถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนรอบมาก ๆ เช่น  $10^7$  หรือ  $10^8$  รอบ เป็นต้น ซึ่งจะใช้ค่าเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของวัสดุ

ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล จะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการล้า (fatigue) ขึ้นในโครงสร้างและเครื่องจักรกล เมื่อโครงสร้างและเครื่องจักรกลดังกล่าวถูกกระทำโดย cyclic load เป็นจำนวนรอบมาก ๆ ดังนั้น เมื่อทราบ S-N Curve ของวัสดุแล้ว จะสามารถหาค่ากำลังรับความล้า (fatigue strength) ของวัสดุได้ และเมื่อหารค่า fatigue strength ด้วยค่าองค์ประกอบความ

ปลอดภัย (factor of safety) แล้วจะหาค่าความเค้นที่ยอมให้ (allowable stress) ที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างและเครื่องจักรกล เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากการล้าได้



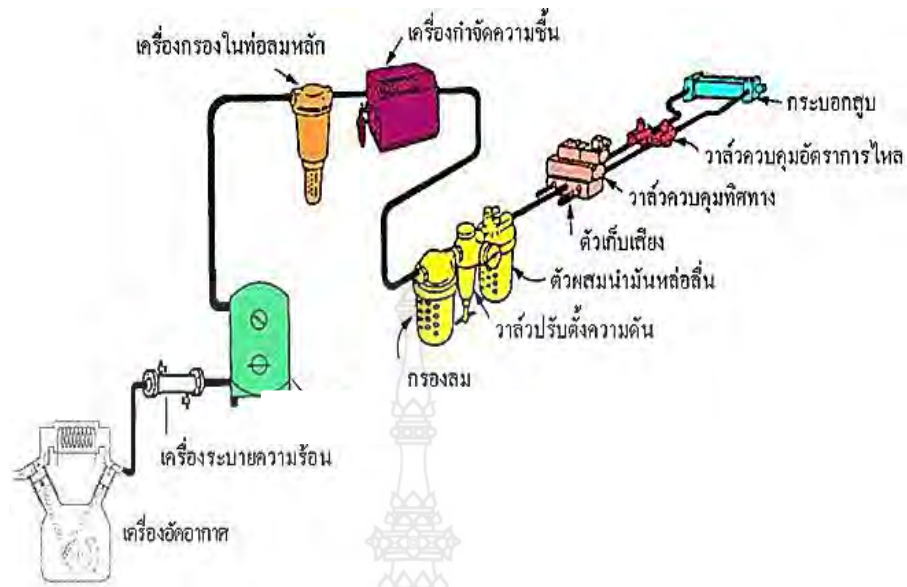
รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง S-N Curve ของเหล็ก A517 (สิทธิชัย, 2545)



รูปที่ 2.7 S-N Curve ของอะลูมิเนียม (สิทธิชัย, 2545)

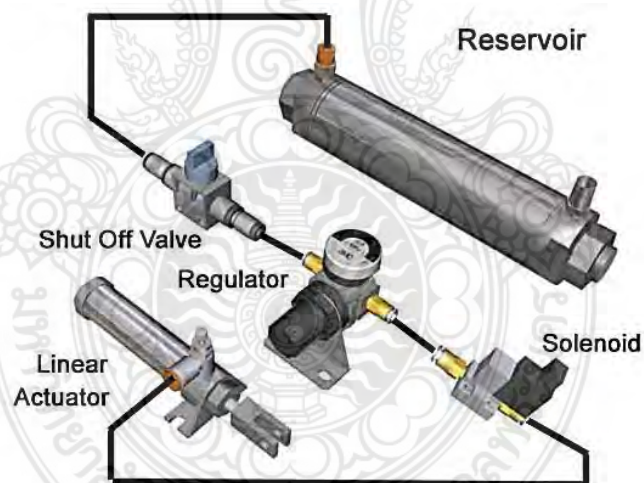
### 2.3 ระบบนิวแมติก

ระบบนิวแมติก หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ลมอัดเป็นต้นกำลังในการทำงานและถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยวาล์วควบคุมทิศทางของลมอัดที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ทำงาน วิธีการควบคุมวาล์วควบคุมทิศทางสามารถเลือกใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ลมอัด ไฟฟ้า แรงเชิงกล (กลไกและมนุษย์) รูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของวงจรนิวแมติกพื้นฐานและรูปถ่ายอุปกรณ์จริงที่ต่อตามวงจรนิวแมติก



รูปที่ 2.8 วงจรระบบนิวแมติกพื้นฐาน

[http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon\\_vis/download/automation/Automation02.pdf](http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon_vis/download/automation/Automation02.pdf)



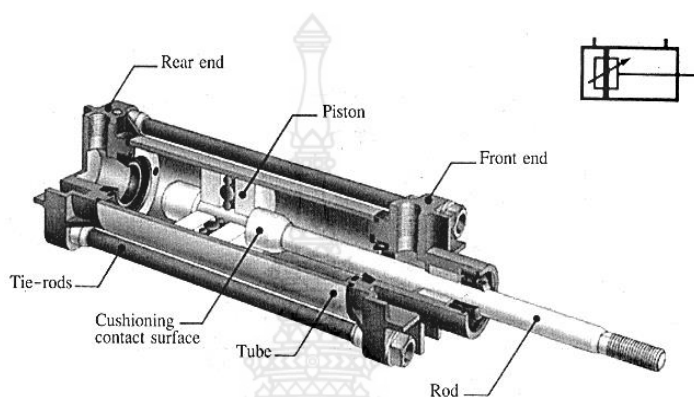
รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ในระบบนิวแมติก

[http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon\\_vis/download/automation/Automation02.pdf](http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon_vis/download/automation/Automation02.pdf)

### 2.3.1 ระเบิดสองทาง (Double-acting cylinder)

ระเบิดสองทางชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานและรูปลักษณ์ภายนอก เช่นเดียวกับระเบิดสองทางเดี่ยว แตกต่างเฉพาะภายใน ดังรูปที่ 2.10 และสามารถสั่งงานได้ทั้งสองทิศทาง ด้วยการจ่ายลมอัดเข้าระเบิดที่หัวหรือที่ท้ายระเบิดสองทางจะทำให้ก้านสูบเคลื่อนที่เข้าหรือออก เมื่อ

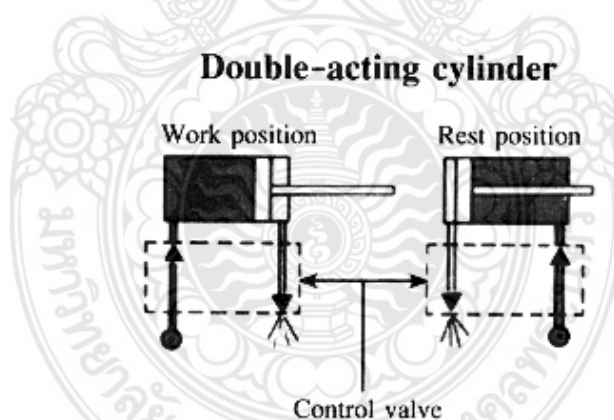
จ่ายลมอัดเข้าที่ท้ายกระบอกลูกสูบ จะทำให้แกนสูบเคลื่อนที่ออกและเกิดการระบายลมที่ค้างในกระบอกลูกสูบออกทางด้านหัวกระบอกลูกสูบ แสดงการทำงานดังรูปที่ 2.11 เมื่อไม่มีลมอัดจ่ายให้กระบอกลูกสูบด้านสูบจะหยุดค้างอยู่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายที่เคลื่อนที่และสามารถไขมือดึงแกนสูบได้เคลื่อนไปมาได้โดยอิสระ แสดงสวนประกอบภายในกระบอกลูกสูบสองทางดังรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.2 แสดงชื่อสวนประกอบภายในกระบอกลูกสูบ



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในของกระบอกลูกสูบสองทาง

<http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning>

/chalermchon\_vis/download/automation/Automation02.pdf

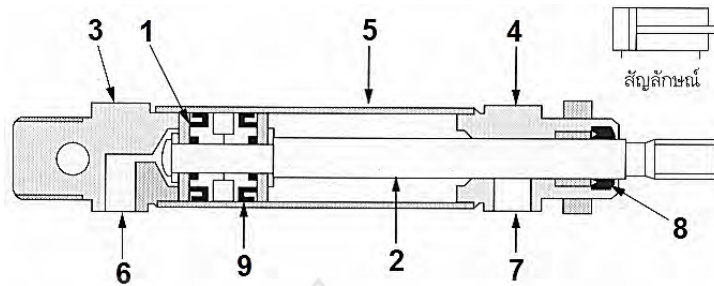


รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานภายในของกระบอกลูกสูบสองทางเมื่อจ่ายลมอัดภายใน

<http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning>

/chalermchon\_vis/download/automation/Automation02.pdf





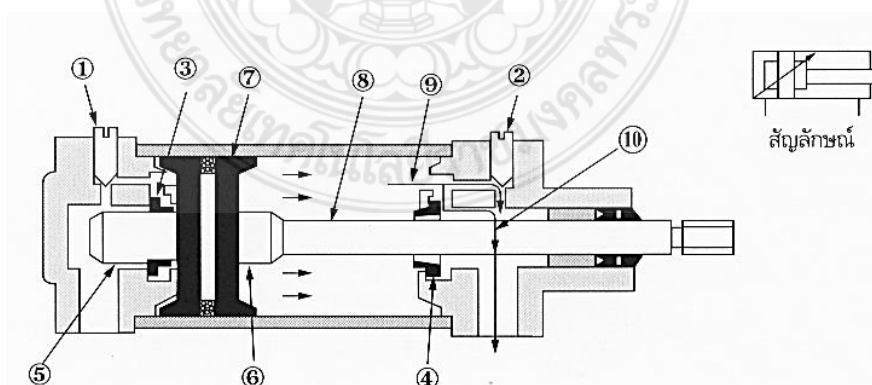
รูปที่ 2.12 โครงสร้างภายในของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง

<http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning>

/chalermchon\_vis/download/automation/Automation02.pdf

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของกระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทาง

หมายเลข	รายละเอียด
1	ลูกสูบ (piston)
2	ก้านสูบ (piston rod)
3	ฝาครอบท้าย (base end cover)
4	ฝาครอบหัว (head end cover)
5	กระบอกสูบ (cylinder tube)
6	รูต่อลมด้านลูกสูบ (pressure connector , base side)
7	รูต่อลมด้านก้านสูบ (pressure connector , head side)
8	ซีลก้านสูบ (bush and sealing element)
9	ซีลลูกสูบ (piston seal)



รูปที่ 2.13 กระบอกสูบชนิดทำงานสองทิศทางที่มีอุปกรณ์ป้องกันการกระแทก

<http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning>

/chalermchon\_vis/download/automation/Automation02.pdf

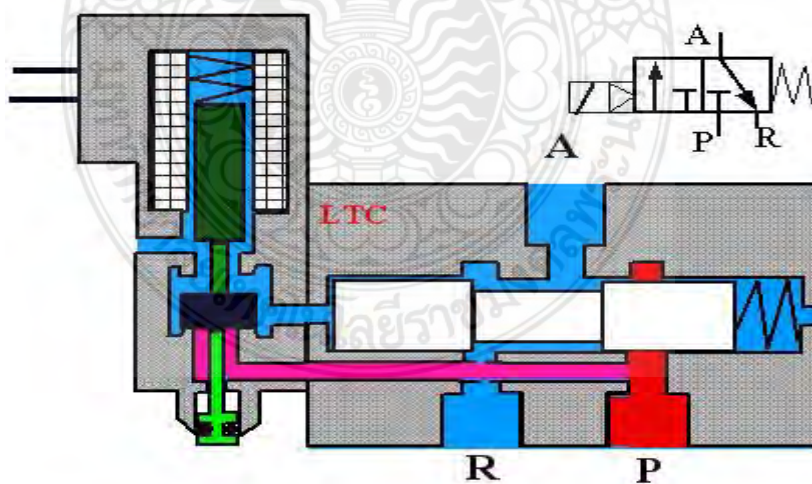


จากรูปที่ 2.13 เป็นกระบอกสูบสองทางที่มีอุปกรณ์กันการกระแทก เพื่อป้องกันความเสียหายจากการชนของก้านสูบกับกระบอกสูบ เมื่อก้านสูบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือเมื่อมีการใช้งานลมอัดความดันสูง หลักการในการลดความเร็วของก้านสูบบมี ดังนี้ คือ ปกติลมอัดภายในกระบอกสูบจะระบายออกทางเส้นทางหมายเลข (9) และ (10) โดยสะดวก แต่เมื่อเดือย (6) เคลื่อนที่มาดันซีล (4) จะ ปิดทางลมหมายเลข (10) ทำให้ความเร็วของก้านสูบก่อนการกระแทกจะลดลงเนื่องจากลมจะระบายออกจากกระบอกสูบได้ เฉพาะเส้นทางหมายเลข (9) ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลเส้นทางหมายเลข (9) ได้จากการปรับวาล์วลีลม (2) ทำให้เกิดแรงต้านจากลมอัดที่ค้างอยู่ภายในกระบอกที่ไม่สามารถระบายออกอย่างรวดเร็วได้

### 2.3.2 โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve)

โซลินอยด์ (Solenoid) เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีหลักการทำงานคล้ายกับรีเลย์ (Relay) ภายในโครงสร้างของโซลินอยด์จะประกอบด้วยขดลวดที่พันอยู่รอบแท่งเหล็กที่อยู่ในประกอบด้วยแม่เหล็กชุดบนกับชุดล่าง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบแท่งเหล็กทำให้แท่งเหล็กชุดล่างมีอำนาจแม่เหล็กดึงแท่งเหล็กชุดบนลงมาสัมผัสกันทำให้ครบวงจรทำงาน เมื่อวงจรถูกตัดกระแสไฟฟ้า ทำให้แท่งเหล็กส่วนล่างหมดอำนาจแม่เหล็ก สปริงก็จะดันแท่งเหล็กส่วนบนกลับสู่ตำแหน่งปกติ จากหลักการดังกล่าวของโซลินอยด์ก็นำมาใช้ในการเคลื่อนลิ้นวาล์วของระบบนิวแมติกไฟฟ้า โครงสร้างของโซลินอยด์วาล์ว โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยสปริง (Single Solenoid Valve) และเลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว (Double Solenoid Valve)

วาล์ว 3/2 ปกติปิด เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์กลับด้วยแรงสปริง (3/2 Way Single Solenoid Valve)



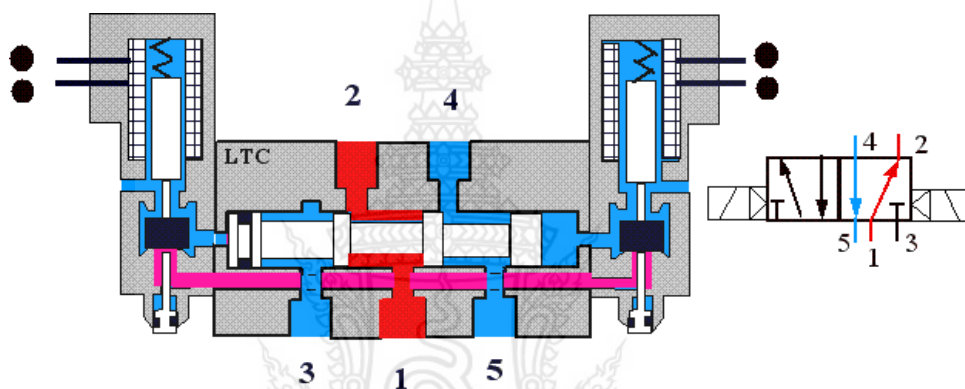
รูปที่ 2.14 วาล์ว 3/2 ปกติปิด เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์กลับด้วยแรงสปริง

<http://webserv.kmitl.ac.th/s1010958/web/php/Solenoidvalves.php>

### หลักการทํางาน

ตำแหน่งปกติ Solenoid Valve Y1 ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ไม่มีอำนาจแม่เหล็ก สปริงจะดันลิ้นวาล์วให้ปิด ทำให้ลมจาก 1 (P) ไม่สามารถออกไปที่ 2 (A) ได้แต่ 2 (A) จะต่อถึง 3 (R) ได้ ตำแหน่งทํางาน เมื่อกดปุ่ม Start ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Solenoid Valve Y1 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กไปเลื่อนลิ้นวาล์ว มีผลทำให้ลมจาก 1 (P) ไปออกที่ 2 (A) ส่วน 3 (R) ถูกปิด เมื่อปล่อยปุ่ม Start จะทำให้ Solenoid Valve Y1 หมดยอำนาจแม่เหล็ก สปริงจะดันลิ้นวาล์วให้กลับสู่สภาวะปกติ

วาล์ว 5/2 เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว (5/2 Way Double Solenoid Valve)



รูปที่ 2.15 วาล์ว 5/2 เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว

<http://webserv.kmitl.ac.th/s1010958/web/php/Solenoidvalves.php>

### หลักการทํางาน

ตำแหน่งปกติ Solenoid Valve Y1 ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ไม่มีอำนาจแม่เหล็ก จะอยู่ในสภาวะปกติ ตำแหน่งทํางาน เมื่อกดปุ่ม Start (S1) ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Solenoid Valve Y1 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กไปเลื่อนลิ้นวาล์วไปทางขวามือ มีผลทำให้ลมจาก 1(P) ไปออกที่ 2(B) ส่วน 4(A) จะต่อถึง 5(R) และ 3(S) จะถูกปิด เมื่อปล่อยปุ่ม Start (S1) จะทำให้ Solenoid Valve Y1 ค้างสภาวะเดิมอยู่ เมื่อกดปุ่ม Start (S2) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน Solenoid Valve Y2 ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กเลื่อนลิ้นวาล์วไปทางซ้ายมือ มีผลทำให้ลมเปลี่ยนทิศทางจาก 1(P) ไปออกที่ 4(A) ส่วน 2(B) จะต่อถึง 3(S) และ 5(R) จะถูกปิด เมื่อปล่อยปุ่ม Start (S2) จะทำให้ Solenoid Valve Y2 ค้างอยู่สภาวะเดิมเช่นเดียวกัน

### 2.3.3 การคำนวณระบบนิวแมติก

#### กฎของปาสคาล

$$F = PA \quad (2.1)$$

$F$  – แรงที่กระทำจากภายนอก หน่วยเป็นนิวตัน (N)

$P$  – ความดัน หน่วยเป็นบาร์ (bar)

$A$  – พื้นที่หน้าตัด หน่วยเป็นตารางเมตร ( $m^2$ )

## 2.4 เพลาส่งกำลัง (Shaft) (วริทธิ์ และชาญ, 2522)

### 2.4.1 การออกแบบเพลลา

เพลลาเป็นส่วนที่มีอยู่ในเครื่องจักรเกือบทุกชนิด ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังหรือทำให้เกิดการหมุนระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่อง ขณะใช้งานเพลลาจะอยู่ภายใต้ภาระการกระทำชนิดต่าง ๆ เช่น แรงกด แรงดึง โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด ซึ่งอาจมีทั้งแรงสถิตและแรงแบบวิญญจักร ทำให้เกิดการล้าได้เพลลาอาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานดังนี้ คือ

- 1) เพลลา (Shaft) เป็นชิ้นส่วนที่หมุนและใช้ในการส่งกำลัง
- 2) แกน (Axle) เป็นชิ้นส่วนลักษณะเดียวกันกับเพลลาแต่ไม่หมุน ส่วนมากเป็นตัวรองรับชิ้นส่วนที่หมุน เช่น ล้อ ล้อสายพาน เป็นต้น อย่างไรก็ตามทั้งเพลลาและแกนก็นิยมเรียกรวมกันว่าเพลลาไม่ว่าชิ้นส่วนนั้นจะหมุนหรือไม่ก็ตาม
- 3) สปินเดิล (Spindle) เป็นเพลลาขนาดสั้น เช่น เพลลาที่หัวแท่นกลึง (Head-Stock spindle)
- 4) สตับชาฟ (Stub Shaft) เป็นเพลลาที่ติดเป็นชิ้นส่วนต่อเนื่องจากเครื่องยนต์มอเตอร์หรือ เครื่องต้นกำลังอื่น ๆ มีขนาด รูปร่าง และส่วนยื่นออกมา สำหรับใช้ต่อกับเพลลาอื่น ๆ
- 5) เพลลาแนว (Line Shaft) หรือเพลลาส่งกำลัง (Power Transmission Shaft) หรือเพลลาเมน (Mainshaft) เป็นเพลลาซึ่งต่อตรงจากเครื่องต้นกำลัง ใช้ในการส่งกำลังไปยังเครื่องจักรกลอื่น ๆ โดยเฉพาะ
- 6) แจ็คชาฟ (Jack Shaft) เป็นเพลลาขนาดสั้นที่ต่อระหว่างเครื่องต้นกำลังกับเพลลาเมนหรือเครื่องจักรกล
- 7) เพลลาอ่อน (Flexible Shaft) เป็นเพลลาที่สามารถอ่อนตัวหรือโค้งได้เพลลาประเภทนี้ทำด้วยสายลวดใหญ่ (Cable) ลวดสปริงหรือลวดเหนียว (Wire Rope) ใช้ในการส่งกำลังในลักษณะที่แกนหมุนทำมุมกันได้แต่ส่งกำลังได้น้อย

### 2.4.2 วัสดุเพลลา

ในการเลือกวัสดุและวิธีที่ใช้ในการทำเพลลา จะต้องคำนึงถึงสภาพการใช้งานและภาระที่เพลลาต้องรับเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาเลือกวัสดุและวิธีการผลิตเพลลาตามขนาดระบุเพลลาวัสดุที่ใช้สำหรับทำเพลลาทั่วไป คือ เหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) ถ้าต้องการให้มีความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระตุกเป็นพิเศษแล้ว มักจะใช้เหล็กกล้าผสมโลหะอื่นทำเพลลา เช่น AISI 1347, 3140 และ 4150 เป็นต้น เพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 90 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.16 มักจะกลึงมาจากเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งผ่านการรีดร้อน อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพลลามีราคาถูกที่สุดผู้ออกแบบควรพยายามเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา ก่อนที่เลือกใช้เหล็กกล้าชนิดอื่น



รูปที่ 2.16 การเลือกวัสดุที่ใช้ในการทำเพลลา

<http://www.bssteel.co.th/product-detail-SCM440.php>

#### 2.4.3 ขนาดของเพลลา

เพื่อให้เพลลามีมาตรฐานเหมือนกัน องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศจึงได้กำหนดมาตรฐานของเพลลา ซึ่งระบุขนาด ใน ISO / R 775 - 1969 เอาไว้สำหรับผู้ออกแบบเลือกใช้ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถหาซื้อได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของแบริ่งที่ใชัรองรับเพลลา ด้วยขนาดระบุของเพลลาได้จากตารางที่ 2.3

#### 2.4.4 หลักพิจารณาในการออกแบบเพลลา

การคำนวณหาขนาดเพลลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังนั้นมุมบิดของเพลลาที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ นั่นคือ เพลลาจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ภายในพิกัดที่ต้องการ ถ้ามุมบิดมากเกินไปนอกจากจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้ว ยังอาจก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีผลให้เฟืองและแบริ่งที่รองรับเพลลาอยู่เกิดความเสียหายได้ง่ายยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 ขนาดระบุเพลลาตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969 (วิธีที่ และชายู, 2522)

ขนาดระบุของเพลลาตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969					
ลำดับที่	ขนาดระบุ (มม.)	ลำดับที่	ขนาดระบุ (มม.)	ลำดับที่	ขนาดระบุ (มม.)
1	6	16	55	31	160
2	7	17	60	32	170
3	8	18	65	33	180
4	9	19	70	34	190
5	10	20	75	35	200
6	12	21	80	36	220
7	14	22	85	37	240
8	18	23	90	38	260
9	20	24	95	39	280
10	25	25	100	40	300

11	30	26	110	41	320
12	35	27	120	42	340
13	40	28	130	43	360
14	45	29	140	44	380
15	50	30	150	45	400

#### 2.4.5 การออกแบบเพลตามาโคัดของ ASME

ก่อนปี พ.ศ. 2497 ได้มีการยอมรับวิธีการคำนวณหาขนาดของเพลาส่งกำลังซึ่งกำหนดเป็นโคัด (Code) โดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) แม้ว่าเวลาจะล่วงเลยมานานแล้วก็ตามวิธีการออกแบบเพลตามาโคัดของ ASME ก็ยังมีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป วิธีการดังกล่าวนี้ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลลา ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตศาสตร์ (Static Design Method) ในการหาสมการสำหรับออกแบบเพลลาให้พิจารณาเพลลาใน รูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงเพลลาอยู่ภายใต้แรงบิด (วริทธิ และชาญ, 2522)

2.4.6 การออกแบบการคำนวณเพลลา ในการออกแบบหาขนาดของเพลลา จะต้องพิจารณาสิ่งเหล่านี้

- กำลังงาน (Power) และภาระ (Load) ที่ใช้เพลลาส่งกำลัง
- ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลา รวมทั้งรูปร่าง ขนาดวัสดุ และผิวสำเร็จ ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดความเค้นตกค้าง (Stress Concentration) ขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเพลลา
- ความแกร่ง (Stiffness หรือ Rigidit) หมายถึง ความคงทนต่อการแอ่นตัวหรือการบิดไปของเพลลา เมื่อรับภาระ
- ความเร็ววิกฤต (Critical Speed) หมายถึง การสั่นตัวของเพลลาอันเป็นผลเนื่องมาจากการแอ่นตัวของเพลลา

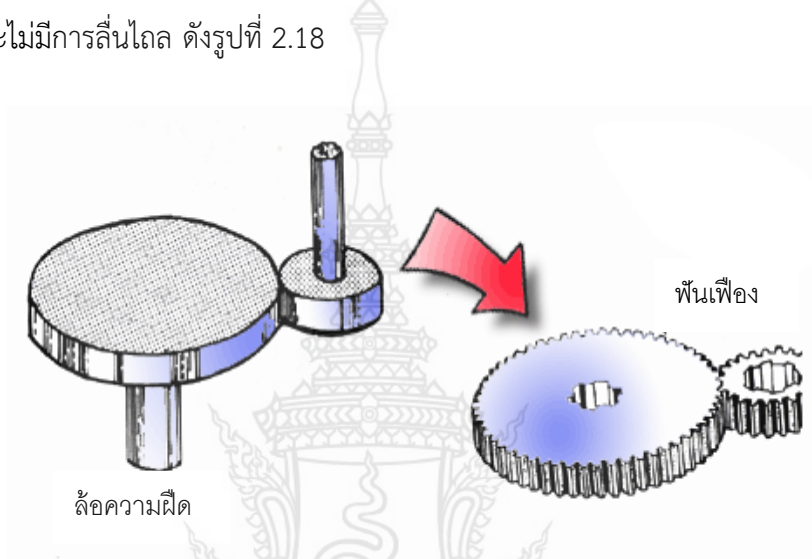
## 2.5 เฟือง (Gears)

เฟือง คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลังระหว่างเพลลา กับเพลลา โดยอาศัยฟันและเฟืองทั้งสองขบกัน นอกจากนี้เฟืองยังสามารถใช้ในการทดสอบเพื่อเพิ่มและลดความเร็วของเฟืองตัวที่ใช้ขับได้

### 2.5.1 หลักการของเฟือง



การถ่ายทอดการหมุนจากต้นกำลังนั้น ทำได้หลายวิธี เช่น ด้วยการใช้สายพาน โซ่ ล้อ ความฝืด เป็นต้น ล้อความฝืดก็คือ ล้อสองล้อที่ถูกกดให้ติดกัน เมื่อล้อหนึ่งหมุน หรือเป็นล้อขับก็จะทำให้อีกล้อหนึ่งหมุนตาม เพราะผิวหน้าของล้อทั้งสองเกิดความฝืด เนื่องจากการสัมผัส แต่ถ้าหากมีภาระมาก ๆ เช่น มีการส่งกำลังสูง ๆ จะทำให้เกิดการลื่นไถล การส่งกำลังจึงไม่แม่นยำ เพื่อที่จะแก้ไขข้อเสียเหล่านี้จึงได้มีการนำเอาฟันเฟืองมาติดไว้ที่ผิวของล้อโดยรอบล้อ จึงมีลักษณะเป็นล้อฟันเฟือง ซึ่งต่อ ๆ มาจึงเรียกว่า เฟือง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่สามารถส่งกำลังหรือถ่ายทอดการหมุนได้แม่นยำ ทึ่ียงตรงและไม่มีการลื่นไถล ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของเฟือง

<http://www.dc338.4shared.com/doc/d1FB6mOj/preview.html>

### 2.5.2 ชนิดของเฟือง

เฟืองที่ใช้เป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับชิ้นส่วนอื่น ๆ ของเครื่องจักรกลต่อไป เช่น เฟืองที่อยู่ในเครื่องจักรต่าง ๆ ลักษณะ รูปร่าง และการใช้งานของเฟืองแบบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) เฟืองตรง (Spur Gear)

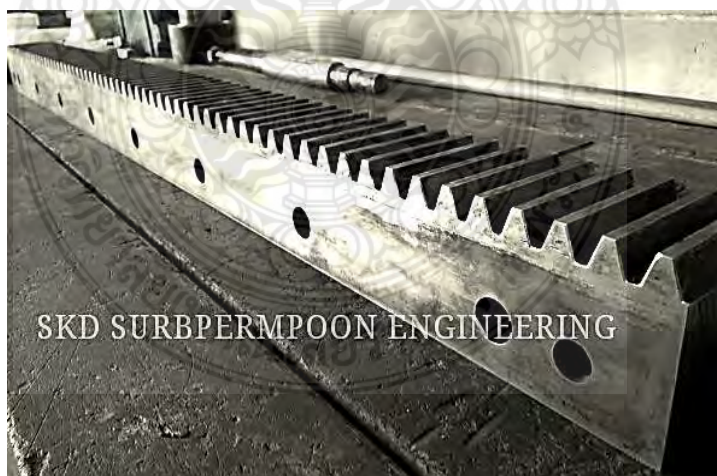


รูปที่ 2.19 เฟืองตรง (Spur Gears)

[http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post\\_07.html](http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post_07.html)

เฟืองตรง เป็นเฟืองที่ใช้ส่งกำลังกับเพลาที่ขนานกัน เฟืองตรงเหมาะสำหรับการส่งกำลังที่มีความเร็วรอบต่ำ หรือความเร็วรอบปานกลางไม่เกิน 20 เมตรต่อนาที เช่น ชุดเฟืองทดลองของเครื่องกลึงเพื่อเดินกลึงอัตโนมัติ หรือชุดเฟืองทดลองของเครื่องจักรกลการเกษตรที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ ข้อดีของเฟืองตรงขณะใช้งานจะไม่เกินแรงในแนวแกน ประสิทธิภาพในการทำงานสูง หน้ากว้างของเฟืองตรงสามารถเพิ่มได้เพื่อให้เกิดผิวสัมผัสที่มากขึ้น เพื่อลดการสึกหรอให้น้อยลง

2) เฟืองสะพาน (Rack Gear)



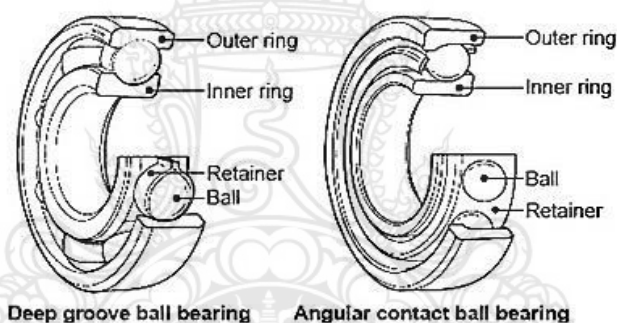
รูปที่ 2.20 เฟืองสะพาน (Rack Gears)

[http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post\\_07.html](http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post_07.html)

เฟืองสะพาน เป็นเฟืองตรงชนิดหนึ่ง มีลักษณะรูปร่างยาวเป็นเส้นตรงเหมือนสะพาน ฟันเฟืองทำมุมกับลำตัว 90 องศา โดยประมาณ ในการใช้งานของเฟืองสะพาน จะต้องใช้คู่กับเฟืองตรงที่เรียกว่าพินเนียน (Pinnion) เสมอก็จะสามารถทำการส่งกำลังได้ ลักษณะการใช้งานของเฟืองสะพาน ตัวอย่างเช่น เฟืองสะพานของเครื่องกลึงยืนศูนย์ ที่ช่วยให้แทนเลื่อนเคลื่อนที่ ซ้าย-ขวา หรือเฟืองสะพานของเครื่องเจาะที่ทำหน้าที่เคลื่อนเพลลาเครื่องเจาะให้ขึ้นลง

## 2.6 ตลับลูกปืน (Bearing)

ตลับลูกปืน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนของเพลลา โดยตลับลูกปืนมีหน้าที่ถ่ายทอดแรงที่เกิดขึ้นจากเพลลาและลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลต่าง ๆ ลดการสึกหรอ แต่ตลับลูกปืนมักจะเสื่อมสภาพเร็วเนื่องจากตลับลูกปืนถือว่าเป็นจุดวิกฤตของเครื่องมือกล ตลับลูกปืน ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก คือ เม็ดลูกกลิ้ง (Balls) แหวนใน (Inner ring) แหวนนอก (Outer ring) และรัง (Retainer) ดังรูปที่ 2.21



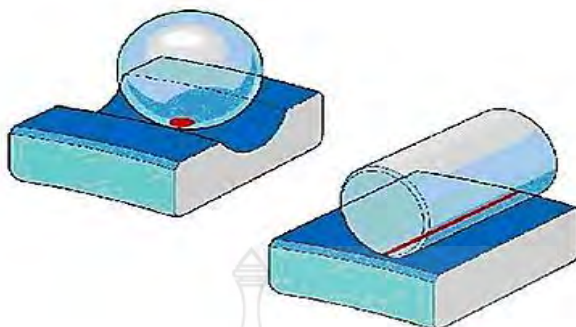
รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบตลับลูกปืน

<http://www.replicainspection.blogspot.com/2011/01/bearing-skf-bearing-iso.html>

### 2.6.1 การแบ่งประเภทของตลับลูกปืน

มีวิธีการแบ่งประเภทของตลับลูกปืน โดยอาศัยปัจจัยในด้านโครงสร้างออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ดังรูปที่ 2.22





รูปที่ 2.22 ส่วนประกอบตลับลูกปืน

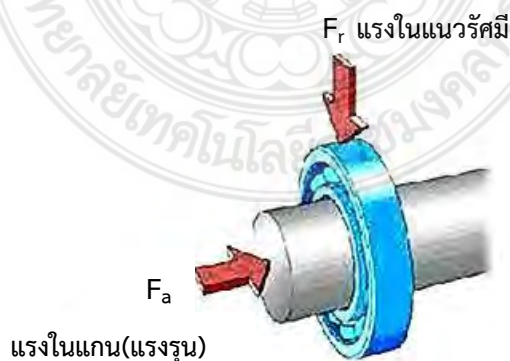
<http://www.replicainspection.blogspot.com/2011/01/bearing-skf-bearing-iso.html>

1) ตลับลูกปืนประเภทที่ไม่มีเม็ดลูกกลิ้ง (Plain bearing) และตลับลูกปืนประเภทที่มีเม็ดลูกกลิ้ง (Rolling bearing) สำหรับเครื่องจักรที่มีการผลิตในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะเลือกใช้ตลับลูกปืนที่มีเม็ดลูกกลิ้ง

2) ตลับลูกปืนที่มีเม็ดกลมและตลับลูกปืนที่มีเม็ดยาว ด้วยการออกแบบของเม็ดลูกกลิ้งที่แตกต่างกัน แต่มีมิติขนาดเท่ากัน เม็ดยาวจะสามารถรับแรงได้มากกว่าเม็ดกลม แต่ในทางตรงกันข้ามสามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบต่ำกว่าเม็ดกลม เนื่องจากความเสียดทานที่สูงกว่าของผิวสัมผัสนั่นเอง

2.6.2 ความสามารถในการรับแรง ซึ่งตลับลูกปืนอาจแบ่งประเภทตามการรับแรงได้เป็น 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.23

- 1) ตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมี
- 2) ตลับลูกปืนรับแรงรุนในแนวแกน
- 3) ตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมีและแรงรุนได้ขณะเดียวกัน



รูปที่ 2.23 ความสามารถในการรับแรงของตลับลูกปืน

<http://www.replicainspection.blogspot.com/2011/01/bearing-skf-bearing-iso.html>

### 2.6.3 ปัจจัยในการเลือกใช้งานตลับลูกปืน

1) ภาระหรือแรงกระทำ (Loads) แรงทุกแรงที่เกี่ยวข้องจะต้องนำมาพิจารณา โดยทั่วไปตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้งจะถูกเลือกใช้กับงานที่มีแรงกระทำสูง ๆ ส่วนตลับลูกปืนชนิดเม็ดกลมจะใช้กับงาน ที่มีขนาดของแรงไม่สูงมากนัก

2) ความเร็ว (Speed) ความเร็วในการใช้งานมีผลต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืนและสารหล่อลื่น ดังนั้น ขนาด ชนิดของรังตลับลูกปืน การหล่อลื่น และชนิดของซีลจะต้องพิจารณาด้วย

3) วัสดุของเพลลาและตัวเสื้อ (Housing) วัสดุสามารถหดหรือขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรือลดลง จะมีผลโดยตรงต่อช่องว่างภายในตลับลูกปืน ดังนั้น จะต้องนำเอาสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวมาพิจารณา เมื่อมีการเลือกวัสดุของเพลลาและตัวเสื้อ

4) อุณหภูมิ (Temperature) ภาระการทำงานปกติ อุณหภูมิของมอเตอร์จะอยู่ที่ 70 – 110 องศาเซลเซียส จะต้องใช้จาระบีที่ทนความร้อนสูง ปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม เช่น มอเตอร์นั้นใช้กับเครื่องจักรอื่น ๆ โดยการต่อเชื่อมด้วยคัปปลิง (Coupling) สายพานหรือชุดเกียร์และการติดตั้ง เป็นการติดตั้งแนวนอนหรือแนวตั้ง ปัจจัยเหล่านี้ทั้งหมดจะต้องนำมาพิจารณาอย่างรอบคอบก่อนการใช้งานและติดตั้ง

### 2.6.4 ตลับลูกปืนตึกตา (Bearing Units)



รูปที่ 2.24 ตลับลูกปืนตึกตา (Bearing Units)

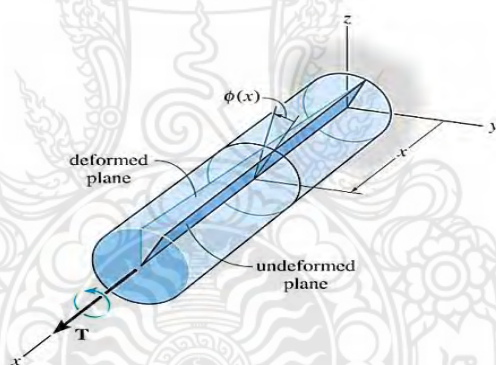
[http://th.misumiec.com/contents/mech/campaign/email\\_20110127/bearing.html](http://th.misumiec.com/contents/mech/campaign/email_20110127/bearing.html)

โดยหลักการของการทำงานเครื่องมือกลแทบทุกชนิด จะต้องประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักที่สำคัญชิ้นส่วนหนึ่ง คือตลับลูกปืนตึกตา ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ รองรับและประคองการหมุนของเพลลา ทั้งเพลลาแกน และ เพลลาชุดเฟือง ทดรอบ นอกจากนี้ ตลับลูกปืนตึกตายังทำหน้าที่ถ่ายทอดหรือส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นจากการทำงานบนเพลลา ให้ผ่านลงไป สู่ฐานเครื่องหากเปรียบหน้าที่การทำงานของตลับลูกปืนกับส่วนอื่น ๆ ของเครื่องมือกลแล้ว จะเห็นได้ว่าตลับลูกปืนตึกตาเป็นจุดวิกฤตจุดหนึ่งของเครื่องมือกล เพราะต้องเป็นชิ้นส่วนที่ต้องทำหน้าที่การทำงานหลาย ๆ อย่างในขณะเดียวกันและสามารถที่จะทำการยึดหรือประกอบเข้ากับการเชื่อมต่อได้หลายลักษณะ

เพราะโครงสร้างหลักมีรูปร่างสำหรับทำการยึดกับสลักเกลียวได้จึงสะดวกในการติดตั้ง ดังนั้น ชิ้นส่วนที่หมดสภาพการใช้งานหรือเสียหายจึงมักเกิดขึ้นที่ตลับลูกปืน การเลือกชนิดของตลับลูกปืนการถอดและประกอบตลับลูกปืนรวมถึงการบำรุงรักษา จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในงานเครื่องมือกล

## 2.7 การบิด

โมเมนต์บิดหรือแรงบิด คือ โมเมนต์ที่กระทำรอบแกนที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่ามีแกนอยู่ 3 แกน แกนที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดคือแกน X มีโมเมนต์บิด T กระทำรอบแกน X ในที่นี้เรียกว่า แรงบิดหรือโมเมนต์บิด จากรูปที่ 2.25 เมื่อใส่แรงบิด T ให้กับเพลลา ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูป แต่หน้าตัดเพลลาไม่มีการเปลี่ยนรูป ไม่บิดเบี้ยว (Not Warp) หรือไม่นูนออกมา รัศมียังคงเป็นเส้นตรงระหว่างการเปลี่ยนรูป จะสังเกตเห็นว่าหน้าตัดเพลลา ยังคงเป็นระนาบอยู่ และหมุนผ่านมุมระหว่างการเปลี่ยนรูป ยิ่งกว่านั้นสมมติว่า มุมของการหมุนเล็กน้อย ความยาวและรัศมียังคงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าให้เพลลาถูกยึดปลายข้างหนึ่ง ดังรูปที่ 2.25 และใส่แรงบิดที่ปลายอีกข้างหนึ่ง ระนาบที่แรงจะถูกบิดจนเสียรูป ในที่นี้ มุมที่เปลี่ยนไปบนหน้าตัดเพลลา ระยะ X เป็นมุม  $\phi$  (X) และมุมนี้ เรียกว่า มุมบิด (Angle of Twist) ถ้าเพลลา มีความยาว L มุมบิดจะเป็น  $\phi$



รูปที่ 2.25 โมเมนต์ที่กระทำรอบแกน  
<http://www.industrial.cmru.ac.th>

สมการที่ใช้คำนวณการบิด

$$T = Fr \quad (2.2)$$

$T$  – โมเมนต์แรงบิด มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (N.m)

$F$  – แรงที่มากกระทำ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

$r$  – รัศมีของเพลลา มีหน่วยเป็น เมตร (m)

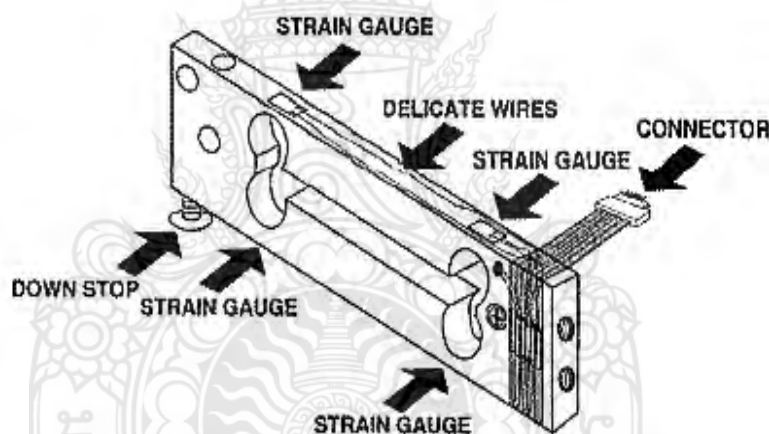
## 2.8 โหลดเซลล์ (Load Cell)

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลด

เซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ

### 2.8.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load Cell)

หลักการของโหลดเซลล์ ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว (วงจร Wheatstone Bridge Circuit) ในการวัด โดยเกจตัวต้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน เพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของมันไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง ส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับโหลดเซลล์ที่มีขนาด 2 mV/V ที่ภาระสูงสุด สมมติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ทำให้เป็นแรงเท่ากับ 19,620 N ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อ Load cell ที่น้ำหนักภาระสูงสุด สัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 mV ดังรูปที่ 2.26

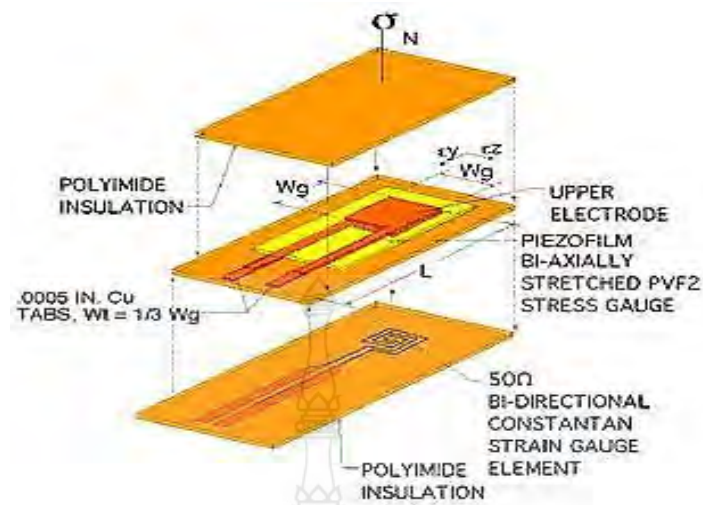


รูปที่ 2.26 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ

<http://vrbme.blogspot.com/2010/08/load-cell.html>

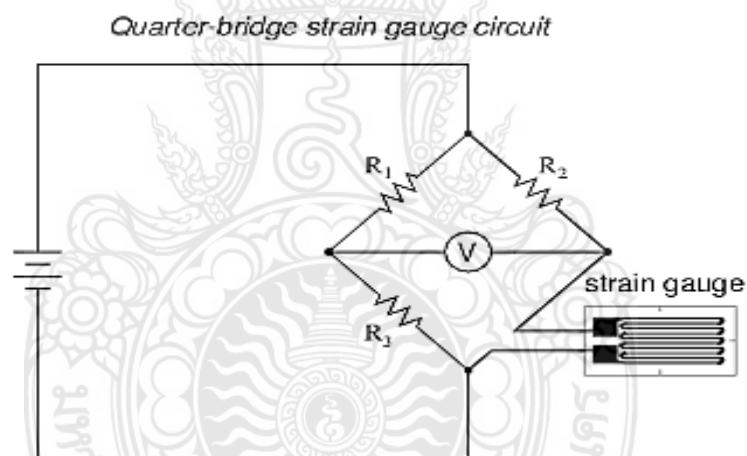
### 2.8.2 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ หรือที่เรียกว่าความเครียด (strain) ค่าสัญญาณที่ได้จากการวัดเป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าความต้านทานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด และความเครียดนี้มีความสัมพันธ์อยู่กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ด้วยเหตุนี้ การวัดค่าความต้านทานจึงสามารถนำไปหาค่าแรงที่กระทำได้ สเตรนเกจโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง มีโลหะแผ่นบาง (foil) ขดตัวอยู่ภายใน ดังรูปที่ 2.27 เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนรูปจะทำให้ค่าความต้านทานภายในตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไป ในการใช้งาน สเตรนเกจจะถูกแปะติดกับชิ้นงานด้วยกาว การเปลี่ยนความต้านทานของสเตรนเกจมักถูกวัดด้วยวงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 สเตรนเกจ (strain gauge)

<http://vrbme.blogspot.com/2010/08/load-cell.html>



รูปที่ 2.28 วงจรวีตส์ตันบริดจ์

<http://vrbme.blogspot.com/2010/08/load-cell.html>

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ (2013) ได้ทำการทดสอบด้วยขั้นตอนรูปทรงกระบอกกลมตันที่อยู่ภายใต้ความเค้นเฉือนเฉลี่ย (mean shear stress) เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเสียหายเนื่องจากความล้าจากแรงบิดของอะลูมิเนียมผสม 2A12-T4 ผลลัพธ์จากการทดลองพบว่า อายุการใช้งานเนื่องจากความล้าจะลดลงเมื่อเพิ่มค่าความเค้นเฉือน

Zhang และคณะ (2012) ได้ทำการทดสอบด้วยขั้นตอนรูปทรงกระบอกกลมตันที่อยู่ภายใต้อัตราส่วนความกว้างของความเค้น (stress amplitude ratio) และช่วงมุมที่ส่งผลต่อความเสียหาย



จากความล้าที่รอบสูงเนื่องจากแรงดึงและแรงบิดของอะลูมิเนียมผสม 2A12-T4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างทั่วไป (macro-and micro analysis) ของรอยแตกของชิ้นทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะของรอยแตกภายใต้ภาวะผสม (แรงดึง-แรงบิด) ด้วยอัตราส่วนความกว้างของความเค้นที่แตกต่างกันและช่วงมุมที่แตกต่างกัน ค่า soft factor ของความล้าจะนำมาใช้พิจารณารูปแบบของความเสียหายภายใต้ภาวะผสม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่า soft factor ของความล้าจะสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างทั่วไป

Zhang และคณะ (2011) ได้ทำการทดสอบด้วยชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกกลมตันที่อยู่ภายใต้อัตราส่วนความเค้นตามแนวแกน (axial stress ratio) และความเค้นเฉือนเฉลี่ย (mean shear stress) ที่ทำให้อะลูมิเนียมผสม 2A12-T4 เกิดความเสียหายจากความล้าที่รอบสูงเนื่องจากแรงดึงและแรงบิด ผลลัพธ์จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนความเค้นตามแนวแกนจะทำให้อายุความล้า (fatigue life) จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเค้นตามแนวแกน

Branco และคณะ (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมการความล้าของเหล็กเส้นกลมที่มีรอยบาก (notched) ด้านข้าง ที่ทำจากเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงตามมาตรฐาน DIN 34CrNiMo6 ภายใต้การดัดอย่างเดี่ยว การบิดอย่างเดี่ยว และรวมการดัดและบิด เพื่อตรวจสอบการเริ่มต้นและการเติบโตของรอยแตก ผิวรอยแตกได้รับการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการจำลองแบบด้วยสมการสามมิติด้วยเลเซอร์ ผลของรอยบากได้รับการวิเคราะห์โดยใช้แนวคิดความหนาแน่นพลังงานความเครียดเทียบเท่า (the equivalent strain energy density) และคาดการณ์อายุความล้าโดยใช้แบบจำลองของ Coffin-Manson (Coffin-Manson model) เกณฑ์ที่ถูกนำมาใช้บนย่านความเค้นหลัก เพื่อคาดการณ์ตำแหน่งที่เกิดรอยร้าวมากที่สุด เส้นทางเดินของรอยแตกที่ผิวและมุมรอยแตกที่ผิว สุดท้ายความสัมพันธ์ที่ตีมากระหว่างการทดลองและคาดการณ์อายุความล้า

Kluger K. (2015) ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับการประเมินอายุความล้าภายใต้สภาวะความเค้นหลายแนวแกน (multiaxial stress state) บนพื้นฐานของแนวคิดของระนาบวิกฤต (critical plane concepts) โดยคำนึงถึงผลกระทบของค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ย ผลการทดสอบอายุความล้าได้คำนวณบนพื้นฐานของแบบจำลองที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับการทดลองที่เกี่ยวข้องกับชิ้นทดสอบอะลูมิเนียม 2017A-T4 และ 6082-T6 ภายใต้การดัด การบิด และการร่วมกันของการดัดและการบิดที่คงตัว เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้รับการวิเคราะห์ทางสถิตินำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยข้อมูลจากการทดลอง

H.Q. Xue และ C. Bathias (2010) ทำการทดสอบความล้าด้วยแรงบิดด้วยระบบทดสอบความล้าแบบอัลตราโซนิกที่ 20 เฮิรตซ์ และเมื่อเทียบกับความล้าที่ 35 เฮิรตซ์ ด้วยเครื่องทดสอบแบบเดิม เพื่อหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยใช้เหล็กกล้า D38MSV5S และเหล็กกล้า 100C6 ผลการศึกษาพบว่า จากเส้นโค้ง S-N แสดงให้เห็นการลดลงของความแข็งแรงเนื่องจากความล้าเมื่อเกิน 107 รอบ

Milan Sáгаа และคณะ (2012) ได้หาอายุความล้าจากการใช้งานของวัสดุโครงสร้างในระหว่างที่มีภาระที่กระทำเป็นวงรอบหลายแนวแกน (multiaxial cyclic loading) ชิ้นส่วนทางทฤษฎีที่มุ่งเน้นไปที่ความล้าและหลักเกณฑ์การประเมินอายุการความล้าในหลายแนวแกน ชิ้นส่วนที่ใช้ในการทดลองหาที่ดำเนินการด้วยแบบจำลองของภาระ ที่กระทำร่วมกันระหว่างการดัด-การบิด และหาจำนวนรอบ

ที่ทำให้เกิดการแตกหักในช่วงความล้ารอบต่ำ (low-cycle fatigue) และในช่วงที่ภาระกระทำด้วยรูปคลื่นไซน์ภายใต้มุม บนพื้นฐานผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำไปวาดเส้นโค้งการออกแบบความล้า เทียบกับข้อมูลความล้าจากโลหะและการเชื่อมต่อ (weldments)

ศิริวุฒิ สาหร่าย (2550) ได้ทำงานวิจัยการสร้างเครื่องทดสอบการหาความล้าของวัสดุ เป็นการหาค่าความล้าจากการใช้จำนวนรอบของการหมุนกับน้ำหนักที่ถ่วงลงอย่างคงที่ 1000 กรัมทดสอบวัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็ก ทองเหลือง และอะลูมิเนียม ขนาดที่ใช้ในการทดลองมี 3 ขนาด คือ 6 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร เครื่องทดลองหาค่าความล้าของวัสดุนี้สร้างขึ้นด้วยวัตถุประสงค์ เพื่อการสร้างเครื่องทดลองหาค่าความล้าของวัสดุ และเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้เครื่องทดลอง จากการทำการวิจัย เครื่องทดลองการหาความล้าของวัสดุนี้พอสรุปได้ดังนี้ จากการทดลองพบว่า ชั้นทดลองที่เป็นทองเหลือง เป็นชั้นทดลองที่มีจำนวนรอบที่สูงกว่าเหล็กซึ่งมีจำนวนรอบลดลงมา และอะลูมิเนียมจะขาดในจำนวนรอบที่น้อยที่สุด ชั้นทดสอบขนาด 6 มิลลิเมตร จะเป็นชั้นทดสอบที่เหมาะสมกับเครื่องทดลองนี้คือเหล็กกับทองเหลือง เพราะจะสามารถ ได้จำนวนรอบที่แท้จริงจากการที่วัสดุขาดจากกันส่วนชั้นทดสอบที่ขนาด 8 มิลลิเมตรเป็นชั้นทดสอบที่เหมาะสมที่สุด เพราะสามารถทดสอบได้กับวัสดุทั้ง 3 ชนิด แต่ต้องใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลานานเนื่องจากจำนวนรอบที่ได้มีจำนวนรอบประมาณ 1,000,000 รอบ ส่วนชั้นทดสอบที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร เป็นชั้นทดสอบที่ไม่เหมาะสมกับเครื่องทดลองเครื่องนี้ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลานาน และจะต้องใช้เครื่องวัดจำนวนรอบที่สูงมากใช้ถึง 8 หลัก ถึงจะทำการวัดจำนวนรอบได้ เพราะฉะนั้นที่ขนาดชั้นทดสอบขนาด 10 มิลลิเมตรจึงทดลองได้เฉพาะอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุที่อ่อนที่สุด

K. K. Alaneme (2011) ได้ทำงานวิจัยในออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดปลายอิสระ ใช้น้ำหนักเป็นตัวถ่วง มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องทดสอบความล้าที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำและราคาถูก เช่นเดียวกับงานของ อนุวัฒน์ และ อัญชลี (2555) ได้ทำการสร้างเครื่องทดสอบความล้าตัวของวัสดุชนิดโลหะ แบบหมุนตัดปลายอิสระ ที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องที่มีขนาดกระทัดรัด ใช้แผ่นน้ำหนักเป็นภาระกระทำ ในการทดสอบสามารถทดสอบใช้ภาระสูงสุดได้ถึง 520 นิวตัน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวส่งกำลังขนาด 1 แรงม้า ความเร็ว 2850 รอบต่อนาที ใช้เซนเซอร์ในการตรวจนับรอบการขาด ประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบความล้าตัวของวัสดุชนิดโลหะ แบบหมุนตัดปลายอิสระ โดยทำการทดสอบความล้าของเหล็กเพลากรด ST-37 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร (รูปร่างชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐานที่ทดสอบกับเครื่องทดสอบความล้ายี่ห้อ GUNT รุ่น WP140 จำนวน 10 ชิ้น แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความล้ากับเครื่องที่มีมาตรฐาน พบว่าเครื่องมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง + 1.71% และ -2.47% อยู่ในขอบเขตของความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยจะพบว่า การการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความล้าจะเป็นแบบลักษณะหมุนตัด นั่นคือให้ชั้นทดสอบเกิดการตัดด้วยแรงหรือภาระที่กระทำกับชั้นทดสอบและให้ชั้นทดสอบเกิดการหมุนในเวลาเดียวกัน เพื่อให้ชั้นทดสอบเกิดความเค้นดึงและความเค้นอัดสลับไปมา ซึ่งการเกิดความเค้นสลับไปมาตรงตำแหน่งเดียวกันนี้จะทำให้เกิดความล้าขึ้นภายในเนื้อวัสดุ เมื่อชั้นทดสอบหมุนไปเป็นจำนวนรอบที่มากก็จะทำให้ชั้นทดสอบเกิดการแตกหักเสียหาย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด นั่นคือจะออกแบบให้เครื่อง

ทดสอบจับหมุนขึ้นทดสอบให้เกิดการหมุนในทิศทางสลับไป โดยมีมุมบิดไม่เกิน 90 องศา ทำให้ขึ้นทดสอบเกิดความล้าเนื่องจากการบิด จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดการแตกหักเสียหาย เพื่อทดสอบความล้าของวัสดุด้วยแรงบิดและศึกษาถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุ ที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในอุตสาหกรรม





## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความล้าและลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นรวมทั้งเครื่องทดสอบความล้าแบบต่าง ๆ และมาตรฐานการทดสอบความล้าของวัสดุ

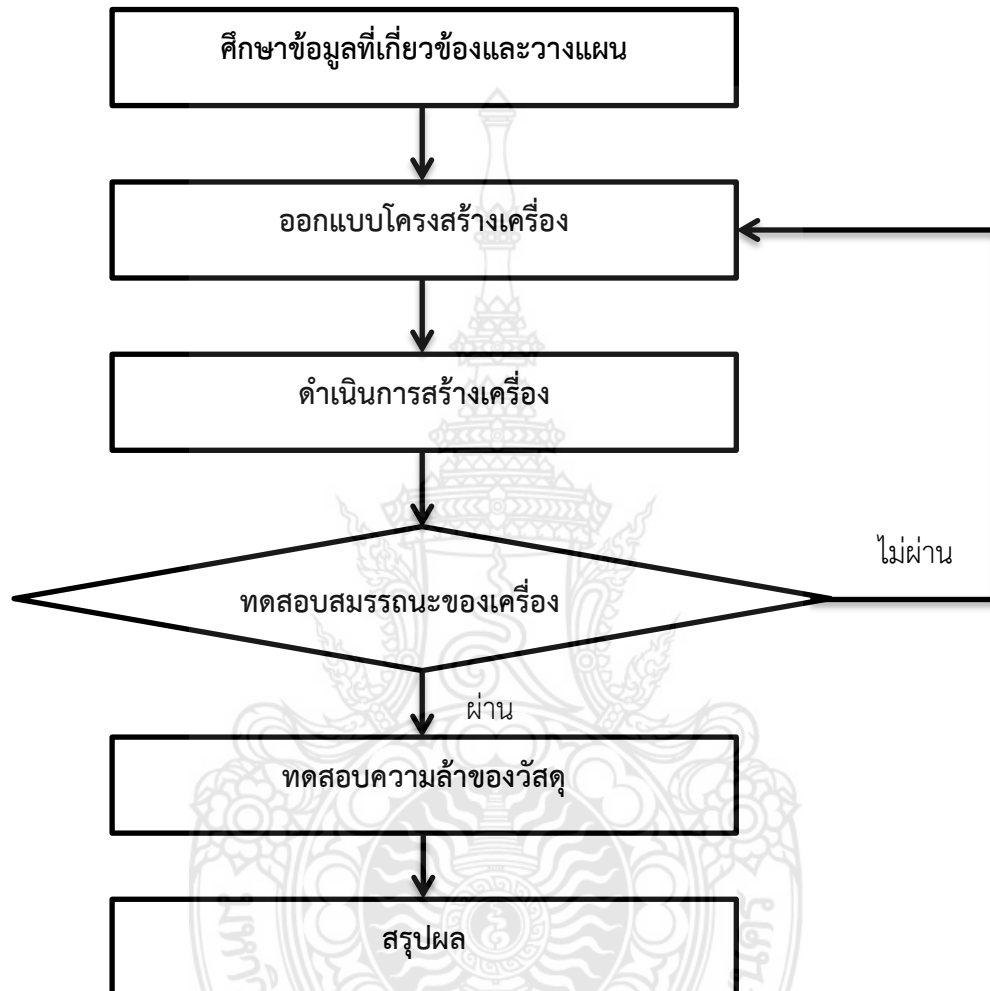
3.1.2 ในการออกแบบเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบความล้าตัวของวัสดุต่าง ๆ มีข้อพิจารณาดังนี้ ในขั้นตอนแรกต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องทดสอบความล้าแบบบิดของวัสดุชนิดโลหะ จากนั้นทำการออกแบบเครื่องและชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องทดสอบด้วยโปรแกรม SolidWorks

3.1.3 จัดการสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิดตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยเครื่องจะมีส่วนประกอบที่สำคัญประกอบด้วย โครงสร้างหลักของเครื่อง ระบบส่งกำลัง และระบบควบคุมของตัวเครื่อง

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบความล้าแบบบิดของเหล็กกล้า S45C ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ โดยทำการทดสอบอย่างน้อยตัวอย่างละ 10 ชิ้น หลังจากนั้นทำการบันทึกค่าแรงบิดไปและบิดกลับ และจำนวนรอบของการบิด โดยทดสอบครั้งที่ 1 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร ทดสอบครั้งที่ 2 ถึง 5 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันไป คือ 60, 80, 100 และ 120 นิวตัน-เมตร และทดสอบครั้งที่ 6 ถึง 7 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันไปคือ 140 และ 160 นิวตัน-เมตร

3.1.5 จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการวิเคราะห์และทำการสรุปผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงถึงขั้นตอนการทำงาน โดยในขั้นตอนแรกต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด จากนั้นทำการออกแบบเครื่องด้วยโปรแกรม SolidWorks และทำการออกแบบเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด ทำการทดสอบการใช้งาน หาสมรรถนะของเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบความล้าของวัสดุ และสรุปผลการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Flow-Chart ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและวางแผน

การสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิต มีขั้นตอนและรายละเอียดต่าง ๆ มากมาย อีกทั้งต้องคำนึงถึงความปลอดภัยตลอดการสร้างเครื่องรวมทั้งการใช้งานจริง จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการทำงานอย่างรอบคอบและรัดกุม

### 3.3 ออกแบบการสร้างโครงสร้างเครื่อง

ในการออกแบบเครื่องทดสอบความล้าแบบบิต สร้างขึ้นเพื่อใช้งานจริงในการทำการทดสอบความล้าตัวของวัสดุต่าง ๆ มีข้อพิจารณาดังนี้

3.3.1 เครื่องประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ คือ โครงสร้างเครื่อง วงจรควบคุม ระบบส่งกำลัง ระบบนิวแมติก

3.3.2 เป็นเครื่องที่ใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน

3.3.3 เครื่องทำงานเป็นระบบ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งาน

3.3.4 สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบความล้าแบบบิต

### 3.4 การสร้างเครื่องทดสอบความล้าแบบบิต

เครื่องทดสอบความล้าแบบบิตนี้จะประกอบด้วย ส่วนการทำงานที่สำคัญ 3 ส่วน ประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละส่วนจะทำงานสอดคล้องและต่อเนื่องกันต่อไปนี้

- ส่วนของโครงสร้าง

- ส่วนของกลไก

- ส่วนระบบนิวแมติก

3.4.1 ส่วนของโครงสร้าง

1) เหล็กแผ่น ขนาด 800 mm × 400 mm × 15 mm จำนวน 1 แผ่น เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm จำนวน 8 รู เพื่อยึดติดกับโครงเครื่อง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมเหล็กแผ่น และตำแหน่งการเจาะรู

2) โครงสร้างของเครื่องทำจากเหล็กกล่องขนาด 1.2 in × 1.2 in ความหนา 1.5 mm ทำการเชื่อมยึดติดเข้าด้วยกัน โดยมีขนาด 400 mm × 800 mm × 740 mm แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างของตัวเครื่อง

#### 3.4.2 ส่วนของกลไก

1) เฟืองขับ ทำจากเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm มอดุล 3 จำนวน 32 ฟัน แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เฟืองขับ

2) เฟืองสะพาน ทำเหล็กกล้า S45C ขนาด 25.4 mm × 25.4 mm × 350 mm มอดูล 3 จำนวน 37 ฟัน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เฟืองสะพาน

3) ตลับลูกปืน UCP 210 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm จำนวน 4 ตัว ใช้เป็นตัวรองรับเพลลาที่ใช้จับยึดชิ้นทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตลับลูกปืน

4) เพลางานและปากจับชิ้นงาน เพลางานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 mm ยึดกับปากจับชิ้นงานขนาด 3 in จำนวน 2 ตัวดังรูปที่ 3.7 และ 3.8





รูปที่ 3.7 เพลางงานชิ้นที่ 1 ที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 เพลางงานชิ้นที่ 2 ที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงานและเฟืองขับ

5) โหลดเซลล์ แบบสเตรนเกจ ที่รับน้ำหนักได้ 300 kg จำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โหลดเซลล์

### 3.4.3 ระบบนิวแมติก

- 1) กระบอกสูบลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ระยะชัก 200 mm แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กระบอกสูบลม

- 2) ชุดวาล์วควบคุม (รูปที่ 3.11 – 3.15)



รูปที่ 3.11 วาล์ว 5/3 แบบเลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว





รูปที่ 3.12 วาล์ว 3/2 แบบเลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยแรงสปริง



รูปที่ 3.13 วาล์วควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 3.14 Stopper Cylinder



รูปที่ 3.15 ชุดควบคุมความดันและปรับสภาพลมอัด

3) ถังลม (ดังรูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.16 ถังลม

3.4.4 การประกอบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องทดสอบความล้าแบบใช้แรงบิด

1) การประกอบเหล็กแผ่น ยึดติดกับโครงสร้างของตัวเครื่อง เพื่อทำหน้าที่เป็นฐานเครื่องทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.17



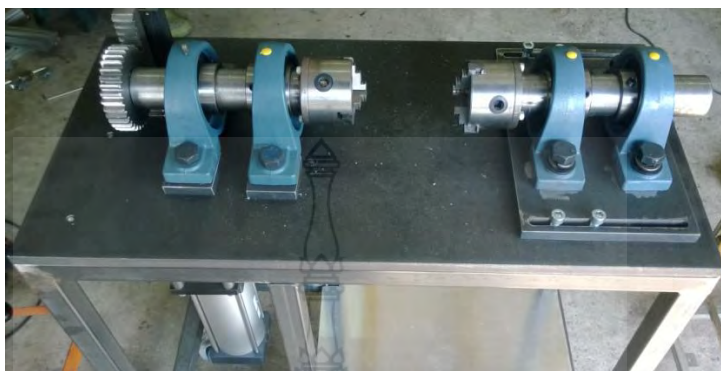
รูปที่ 3.17 ฐานเครื่องทดสอบ

2) การประกอบกระบอกสูบลม ยึดติดกับเฟืองสะพานและตัวเครื่อง เพื่อส่งถ่ายการเคลื่อนที่ให้กับเพลาทิ้งสองของเครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การติดตั้งกระบอกสูบนิวแมติกยึดติดกับเฟืองสะพาน และตัวเครื่องทดสอบความล้าแบบบิด

3) การประกอบเพลางานที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงาน และเฟืองขับ เข้ากับตลับลูกปืน แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การติดตั้งเพลางานที่ยึดติดกับปากจับชิ้นงานและเฟืองขับ เข้ากับตลับลูกปืน

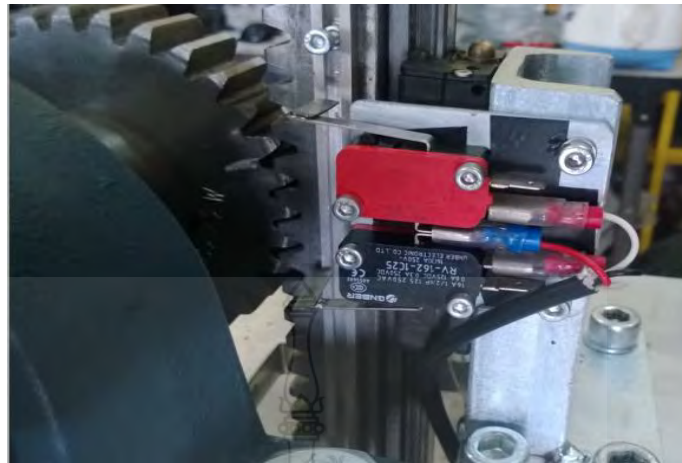
4) การประกอบโหนดเซลล์ ยึดติดกับเพลางาน แสดงดังรูปที่ 3.20



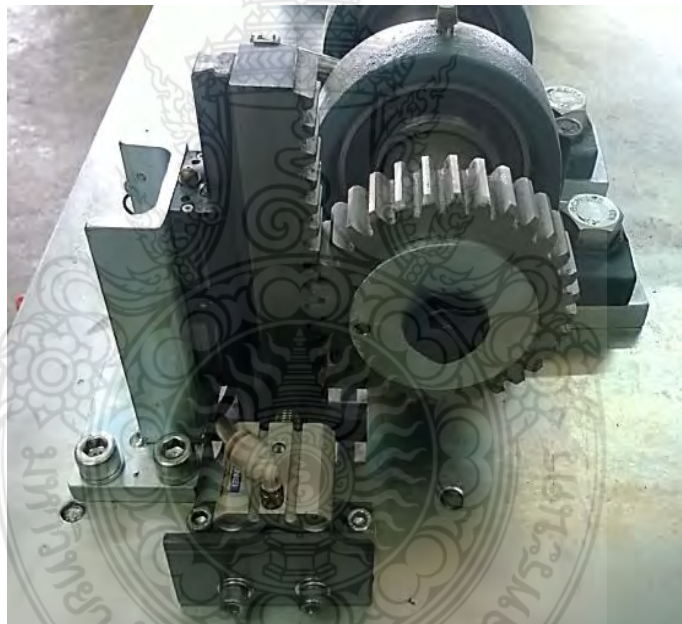
รูปที่ 3.20 โหนดเซลล์ ยึดติดกับเพลางาน

5) การประกอบบลิมิตสวิทช์ และ Stopper Cylinder ยึดติดกับตัวเครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.21 ถึง 3.22





รูปที่ 3.21 ลิ้มิตสวิทช์ยึดติดกับตัวเครื่อง



รูปที่ 3.22 Stopper Cylinder ยึดติดกับตัวเครื่อง

6) การประกอบระบบนิวแมติก และชุดวาล์วควบคุม แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ระบบนิวแมติกและชุดวาล์วควบคุม

7) การประกอบระบบควบคุม และจอแสดงผล ยึดติดกับตัวเครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ระบบควบคุม จอแสดงผล ยึดติดกับตัวเครื่อง

8) เครื่องทดสอบความล้าแบบบิด ที่ประกอบจนเสร็จสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบความล้าแบบบิด





## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 การเตรียมการทดสอบ

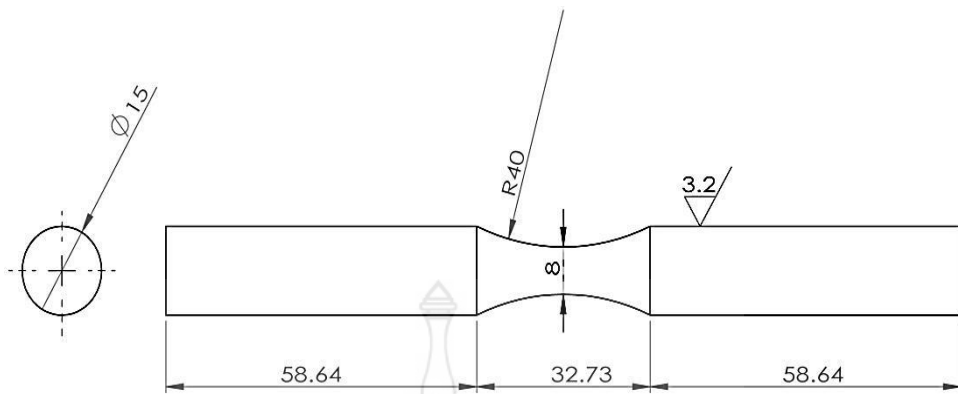
4.1.1 จัดเตรียมบริเวณพื้นที่ ๆ จะทำการทดสอบ

4.1.2 ตรวจสอบสภาพความพร้อมของเครื่องทดสอบความล้าแบบใช้แรงบิด ที่จะทำการทดสอบให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 4.1

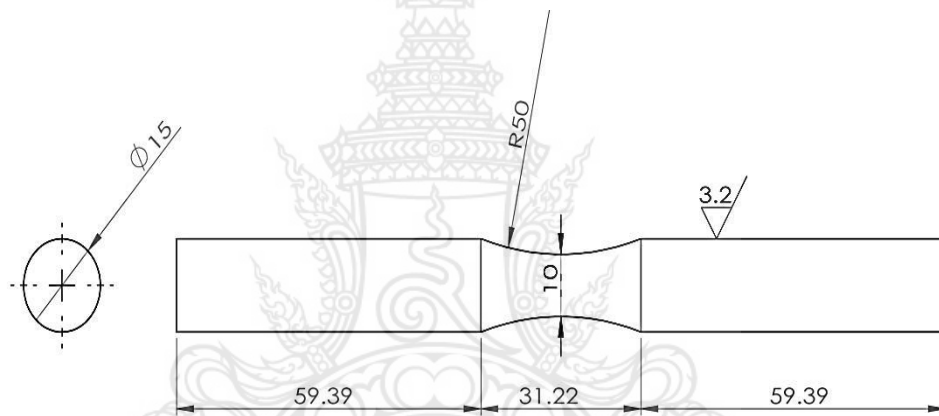


รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบความล้าแบบใช้แรงบิด

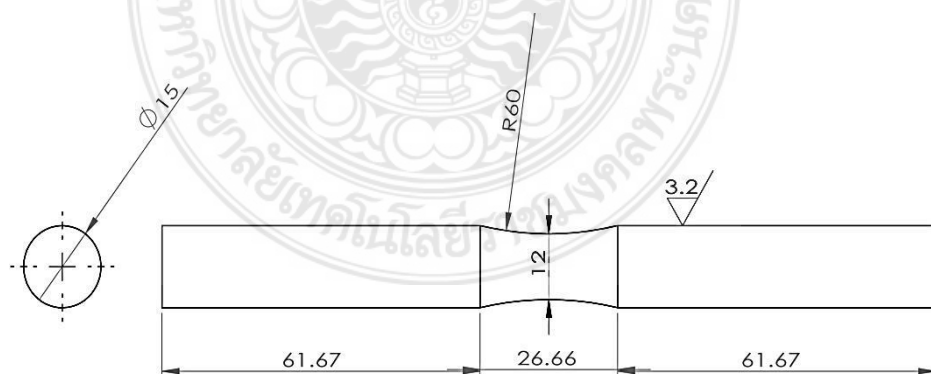
4.1.3 เตรียมชิ้นทดสอบที่ทำการขึ้นรูปให้เป็นไปตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 แบบขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร

4.1.4 เตรียมเครื่องปั๊มลม โดยตั้งค่าความดันลมที่ต้องการใช้งานไว้ที่ 7 บาร์ (bar) ดังรูปที่ 4.5

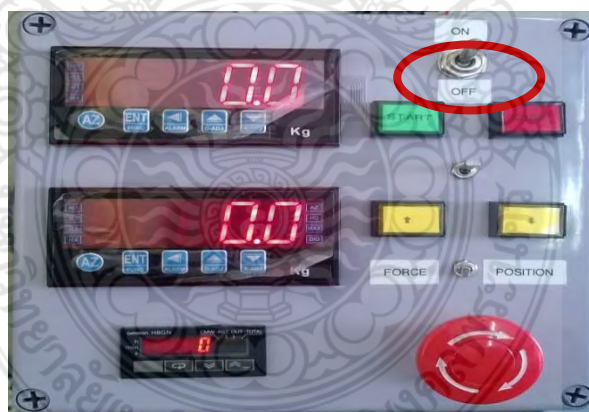


รูปที่ 4.5 เครื่องอัดลม

4.1.5 ตรวจสอบอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าต่าง ๆ ของเครื่องทดสอบ ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

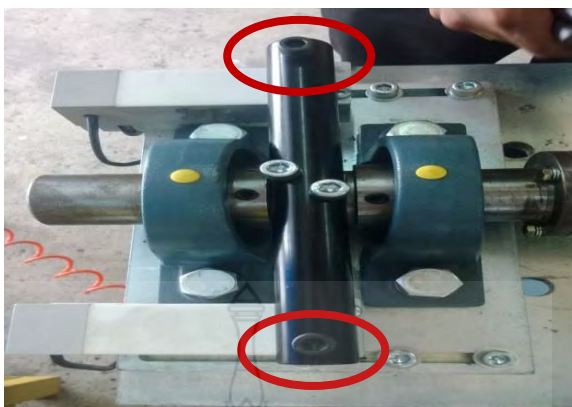
#### 4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

4.2.1 ที่กล่องควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ สวิตช์โยกเปิดระบบไฟฟ้าของเครื่องให้โยกไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อเปิดระบบไฟฟ้าของเครื่องทดสอบ ดังรูปที่ 4.6



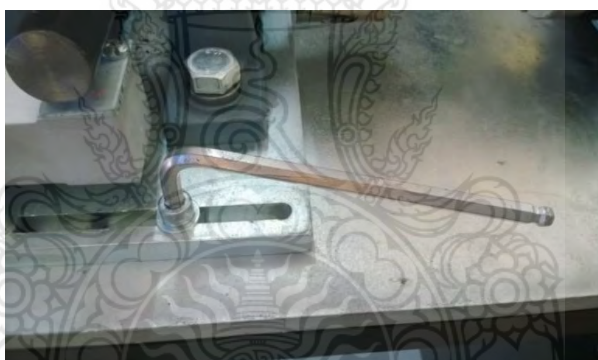
รูปที่ 4.6 สวิตช์โยก ON-OFF ของกล่องควบคุม

4.2.2 ปรับตั้งค่าโหลดเซลล์ โดยการขันสลักเกลียวจนปลายของสลักเกลียวสัมผัสกับโหลดเซลล์ทั้งสองตัว ให้ความยาวของสลักเกลียวที่ยื่นออกมาทั้งสองตัวเท่ากัน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การปรับตั้งค่าโหลดเซลล์

4.2.3 ปรับระยะของหัวจับขึ้นทดสอบด้านโหลดเซลล์ โดยการคลายสลักเกลียวที่ยึดฐานของหัวจับขึ้นทดสอบ ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อที่จะจับขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การปรับระยะฐานของหัวจับขึ้นทดสอบที่ติดตั้งโหลดเซลล์

4.2.4 ปรับตำแหน่งของหัวจับขึ้นทดสอบให้อยู่กึ่งกลาง โดยโยกสวิทซ์การทำงานของเครื่องทดสอบไปตำแหน่ง MANUAL แล้วกดปุ่มลูกศรขึ้นหรือลง จนหัวจับขึ้นทดสอบอยู่กึ่งกลาง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งปุ่ม MANUAL

4.2.5 นำชิ้นทดสอบมาติดตั้งที่หัวจับทั้งสองด้าน โดยขันสลักเกลียวยึดชิ้นทดสอบให้แน่น ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งการติดตั้งชิ้นทดสอบ

4.2.6 จากนั้นทำการโยกสวิตซ์การทำงานของเครื่องทดสอบจากตำแหน่ง MANUAL เป็น AUTOMATIC ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งปุ่ม MANUAL เป็น AUTOMATIC



4.2.7 โยกสวิตช์สถานะการทำงานของเครื่องให้อยู่ในตำแหน่ง FORCE ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สวิตช์สถานะการทำงานของเครื่อง ตำแหน่ง FORCE

4.2.8 ตั้งค่าแรงบิดตามที่ต้องการทดสอบ โดยกดปุ่มเพิ่มแรงหรือลดแรงที่หน้าจอบควบคุมแรงบิด ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งจอและปุ่มควบคุมแรงบิด

4.2.9 กดปุ่ม RESET ที่หน้าจอแสดงจำนวนรอบทุกครั้งก่อนการทดสอบ เพื่อปรับรอบเริ่มต้นให้เป็น 0 (ศูนย์) ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กดปุ่ม RESET ที่หน้าจอแสดงจำนวนรอบให้เป็น 0 (ศูนย์)

4.2.10 กดปุ่ม START เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ปุ่ม START เครื่องทดสอบ



4.2.11 กดปุ่ม STOP เมื่อต้องการหยุดเครื่อง ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งปุ่ม STOP

4.2.12 กดปุ่มฉุกเฉิน EMERGENCY เมื่อเครื่องเกิดเหตุขัดข้อง ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งปุ่ม EMERGENCY

4.2.13 เมื่อขึ้นทดสอบขาด เครื่องจะหยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 งานที่เกิดความเสียหายจากความล้า

4.2.14 บันทึกจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบขาด ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 จอแสดงผลจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบขาด

### 4.3 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบความล้าของวัสดุเหล็กกล้า S45C และบันทึกค่าแรงบิดที่ใช้บิดกลับไปกลับมา เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุ ซึ่งผลการทดสอบมีผล ความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 โดยทดสอบครั้งที่ 1 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร ทดสอบครั้งที่ 2 ถึง 5 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันไป คือ 60, 80, 100 และ 120 นิวตัน-เมตร และทดสอบครั้งที่ 6 ถึง 9 ใช้ชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันไปคือ 140, 160, 180 และ 200 นิวตัน-เมตร แสดงดังตารางที่ 4.1-4.9

4.3.1 การทดสอบครั้งที่ 1 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	43.1	40	7.75	26	41.2	40	3.00
2	42.7	40	6.75	27	40.9	40	2.25
3	43.1	40	7.75	28	41.7	40	4.25
4	42.6	40	6.50	29	41.8	40	4.50
5	41.6	40	4.00	30	41.4	40	3.50
6	41.9	40	4.75	31	41.7	40	4.25
7	41.5	40	3.75	32	41.4	40	3.50
8	41.7	40	4.25	33	41.4	40	3.50
9	41.3	40	3.25	34	41.9	40	4.75
10	41.4	40	3.50	35	41.8	40	4.50
11	42.0	40	5.00	36	40.9	40	2.25
12	41.7	40	4.25	37	40.9	40	2.25
13	41.0	40	2.50	38	41.2	40	3.00
14	41.5	40	3.75	39	41.5	40	3.75
15	41.4	40	3.50	40	41.3	40	3.25
16	41.5	40	3.75	41	41.6	40	4.00
17	41.0	40	2.50	42	41.5	40	3.75
18	41.5	40	3.75	43	41.2	40	3.00
19	41.7	40	4.25	44	41.0	40	2.50
20	41.6	40	4.00	45	41.3	40	3.25
21	41.6	40	4.00	46	40.9	40	2.25
22	41.5	40	3.75	47	41.4	40	3.50
23	41.3	40	3.25	48	41.0	40	2.50
24	41.4	40	3.50	49	41.7	40	4.25
25	41.6	40	4.00	50	41.3	40	3.25

4.3.2 การทดสอบครั้งที่ 2 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 60 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 60 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	63.9	60	6.50	26	62.3	60	3.83
2	62.7	60	4.50	27	62.4	60	4.00
3	64.5	60	7.50	28	62.8	60	4.67
4	62.4	60	4.00	29	62.8	60	4.67
5	62.6	60	4.33	30	61.8	60	3.00
6	62.3	60	3.83	31	62.0	60	3.33
7	62.1	60	3.50	32	61.9	60	3.17
8	62.5	60	4.17	33	62.0	60	3.33
9	62.5	60	4.17	34	62.2	60	3.67
10	62.7	60	4.50	35	61.9	60	3.17
11	61.9	60	3.17	36	62.3	60	3.83
12	61.5	60	2.50	37	61.9	60	3.17
13	62.0	60	3.33	38	62.0	60	3.33
14	61.5	60	2.50	39	61.8	60	3.00
15	62.7	60	4.50	40	62.2	60	3.67
16	62.6	60	4.33	41	61.5	60	2.5
17	62.8	60	4.67	42	62.0	60	3.33
18	62.5	60	4.17	43	61.8	60	3.00
19	62.1	60	3.50	44	62.3	60	3.83
20	61.9	60	3.17	45	61.4	60	2.33
21	61.8	60	3.00	46	62.0	60	3.33
22	62.0	60	3.33	47	61.7	60	2.83
23	61.7	60	2.83	48	62.1	60	3.50
24	62.0	60	3.33	49	62.4	60	4.00
25	62.2	60	3.67	50	61.7	60	2.83

4.3.3 การทดสอบครั้งที่ 3 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 80 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 80 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	82.6	80	3.25	26	81.2	80	1.50
2	81.5	80	1.88	27	80.2	80	0.25
3	82.9	80	3.63	28	81.2	80	1.50
4	81.3	80	1.63	29	81.1	80	1.38
5	81.2	80	1.50	30	81.0	80	1.25
6	80.7	80	0.88	31	81.0	80	1.25
7	80.6	80	0.75	32	81.2	80	1.50
8	80.5	80	0.63	33	80.5	80	0.63
9	81.4	80	1.75	34	81.7	80	2.13
10	80.6	80	0.75	35	81.3	80	1.63
11	81.7	80	2.13	36	81.2	80	1.50
12	80.6	80	0.75	37	80.7	80	0.88
13	81.5	80	1.88	38	81.5	80	1.88
14	80.5	80	0.63	39	80.4	80	0.50
15	81.3	80	1.63	40	81.0	80	1.25
16	80.4	80	0.50	41	80.5	80	0.63
17	81.3	80	1.63	42	80.8	80	1.00
18	80.4	80	0.50	43	81.2	80	1.50
19	81.1	80	1.38	44	81.5	80	1.88
20	80.2	80	0.25	45	80.3	80	0.38
21	81.2	80	1.50	46	81.4	80	1.75
22	80.4	80	0.50	47	81.3	80	1.63
23	81.4	80	1.75	48	80.4	80	0.50
24	80.2	80	0.25	49	81.2	80	1.50
25	81.2	80	1.50	50	81.0	80	1.25

4.3.4 การทดสอบครั้งที่ 4 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 100 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 100 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	101.2	100	1.20	26	101.6	100	1.60
2	101.2	100	1.20	27	101.3	100	1.30
3	101.3	100	1.30	28	101.4	100	1.40
4	101.2	100	1.20	29	101.0	100	1.00
5	101.4	100	1.40	30	101.5	100	1.50
6	101.1	100	1.10	31	101.4	100	1.40
7	101.4	100	1.40	32	101.6	100	1.60
8	101.2	100	1.20	33	101.6	100	1.60
9	101.1	100	1.10	34	101.2	100	1.20
10	101.3	100	1.30	35	101.9	100	1.90
11	101.2	100	1.20	36	101.7	100	1.70
12	101.1	100	1.10	37	101.7	100	1.70
13	101.1	100	1.20	38	101.7	100	1.70
14	101.4	100	1.40	39	101.6	100	1.60
15	101.2	100	1.20	40	101.3	100	1.30
16	101.3	100	1.30	41	101.2	100	1.20
17	101.2	100	1.20	42	101.4	100	1.40
18	101.3	100	1.30	43	101.5	100	1.50
19	101.4	100	1.40	44	101.6	100	1.60
20	101.5	100	1.50	45	101.2	100	1.20
21	101.6	100	1.60	46	101.1	100	1.10
22	101.6	100	1.60	47	100.6	100	0.60
23	101.2	100	1.20	48	100.3	100	0.30
24	101.0	100	1.00	49	101.2	100	1.20
25	101.8	100	1.80	50	101.3	100	1.30

4.3.5 การทดสอบครั้งที่ 5 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 120 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร แรงบิด 120 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	121.3	120	1.08	26	120.6	120	0.50
2	121.7	120	1.42	27	120.8	120	0.67
3	121.6	120	1.33	28	120.6	120	0.50
4	121.3	120	1.08	29	121.4	120	1.17
5	120.6	120	0.50	30	120.7	120	0.58
6	120.1	120	0.08	31	121.0	120	0.83
7	121.4	120	1.17	32	120.5	120	0.42
8	120.8	120	0.67	33	121.3	120	1.08
9	120.9	120	0.75	34	120.6	120	0.50
10	120.7	120	0.58	35	120.7	120	0.58
11	121.2	120	1.00	36	120.9	120	0.75
12	120.9	120	0.75	37	120.8	120	0.67
13	121.2	120	1.00	38	120.5	120	0.42
14	121.8	120	1.50	39	120.9	120	0.75
15	121.5	120	1.25	40	120.5	120	0.42
16	121.5	120	1.25	41	120.5	120	0.42
17	121.4	120	1.17	42	120.5	120	0.42
18	120.7	120	0.58	43	120.6	120	0.50
19	120.5	120	0.42	44	120.6	120	0.50
20	120.4	120	0.33	45	120.2	120	0.17
21	120.8	120	0.67	46	120.8	120	0.67
22	120.5	120	0.42	47	121.2	120	1.00
23	121.3	120	1.08	48	121.0	120	0.83
24	120.5	120	0.42	49	121.2	120	1.00
25	121.3	120	1.08	50	120.6	120	0.50



4.3.6 การทดสอบครั้งที่ 6 ทดสอบเหล็ก S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 140 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 140 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	141.5	140	1.07	26	141.3	140	0.93
2	140.8	140	0.57	27	140.5	140	0.36
3	141.2	140	0.86	28	141.2	140	0.86
4	141.5	140	1.07	29	141.0	140	0.71
5	140.6	140	0.43	30	141.4	140	1.00
6	141.2	140	0.86	31	141.3	140	0.93
7	140.4	140	0.39	32	141.6	140	1.14
8	141.5	140	1.07	33	141.2	140	0.86
9	140.4	140	0.39	34	140.6	140	0.43
10	140.3	140	0.21	35	140.3	140	0.21
11	140.5	140	0.36	36	141.2	140	0.86
12	140.3	140	0.21	37	140.5	140	0.36
13	140.4	140	0.39	38	140.8	140	0.57
14	141.2	140	0.86	39	140.2	140	0.14
15	140.3	140	0.21	40	140.9	140	0.64
16	141.2	140	0.86	41	140.3	140	0.21
17	140.6	140	0.43	42	141.2	140	0.86
18	141.3	140	0.93	43	140.2	140	0.14
19	141.0	140	0.71	44	140.3	140	0.21
20	141.2	140	0.86	45	140.6	140	0.43
21	140.5	140	0.36	46	140.5	140	0.36
22	140.5	140	0.36	47	141.2	140	0.86
23	140.5	140	0.36	48	140.8	140	0.57
24	140.2	140	0.14	49	141.0	140	0.71
25	140.4	140	0.29	50	141.2	140	0.86

4.3.7 การทดสอบครั้งที่ 7 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 160 นิวตัน-เมตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 160 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	162.0	160	1.25	26	160.5	160	0.31
2	160.1	160	0.06	27	160.2	160	0.13
3	161.4	160	0.88	28	160.4	160	0.25
4	160.6	160	0.38	29	160.7	160	0.44
5	160.3	160	0.19	30	160.7	160	0.44
6	160.1	160	0.06	31	160.1	160	0.06
7	160.2	160	0.13	32	160.6	160	0.38
8	160.5	160	0.31	33	160.2	160	0.13
9	160.7	160	0.44	34	160.4	160	0.25
10	160.3	160	0.19	35	160.4	160	0.25
11	161.1	160	0.69	36	160.2	160	0.13
12	160.4	160	0.25	37	160.1	160	0.06
13	160.4	160	0.25	38	160.3	160	0.19
14	160.7	160	0.44	39	160.5	160	0.31
15	161.0	160	0.63	40	160.5	160	0.31
16	160.3	160	0.19	41	160.2	160	0.13
17	160.2	160	0.13	42	160.5	160	0.31
18	160.4	160	0.25	43	160.7	160	0.44
19	160.4	160	0.25	44	160.4	160	0.25
20	160.6	160	0.38	45	160.5	160	0.31
21	160.3	160	0.19	46	160.8	160	0.5
22	160.8	160	0.50	47	160.2	160	0.13
23	160.9	160	0.56	48	160.5	160	0.31
24	160.2	160	0.13	49	160.3	160	0.19
25	160.5	160	0.31	50	160.2	160	0.13

4.3.8 การทดสอบครั้งที่ 8 ทดสอบเหล็กกล้า S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 180 นิวตันเมตร ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร แรงบิด 180 นิวตัน-เมตร

ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	ครั้งที่	แรงบิด	แรงบิดที่กำหนด	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1	180.6	180	0.33	26	180.4	180	0.22
2	180.4	180	0.22	27	180.2	180	0.11
3	180.4	180	0.22	28	180.4	180	0.22
4	180.3	180	0.17	29	180.3	180	0.17
5	180.1	180	0.06	30	180.4	180	0.22
6	180.5	180	0.28	31	180.2	180	0.11
7	180.3	180	0.17	32	180.4	180	0.22
8	180.6	180	0.33	33	180.6	180	0.33
9	180.5	180	0.28	34	180.4	180	0.22
10	180.6	180	0.33	35	180.2	180	0.11
11	180.0	180	0.00	36	180.1	180	0.06
12	180.2	180	0.11	37	180.4	180	0.22
13	180.2	180	0.11	38	180.2	180	0.11
14	180.5	180	0.28	39	180.2	180	0.11
15	180.0	180	0.00	40	180.0	180	0.00
16	180.1	180	0.06	41	180.1	180	0.06
17	180.2	180	0.11	42	180.5	180	0.28
18	180.5	180	0.28	43	180.0	180	0.00
19	180.1	180	0.06	44	180.5	180	0.28
20	180.3	180	0.17	45	180.6	180	0.33
21	180.2	180	0.11	46	180.7	180	0.39
22	180.2	180	0.11	47	180.4	180	0.22
23	180.2	180	0.11	48	180.1	180	0.06
24	180.1	180	0.06	49	180.2	180	0.11
25	180.5	180	0.28	50	180.2	180	0.11



4.3.10 การทดสอบเหล็กกล้า S45C โดยมาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความเค้นเฉือน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ผลการทดสอบความล้าของเหล็กกล้า S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ที่แรงบิดมีการเปลี่ยนแปลง

ขั้นทดสอบที่	แรงบิด (N.m)	จำนวนรอบที่ขาด	ความเค้นเฉือน (N/mm <sup>2</sup> )
1	30	313	298.41
2	40	176	397.89
3	50	51	497.36
4	60	14	596.83
5	70	4	696.30

#### 4.4 วิจัยรณัผลการทดสอบ

จากการทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุแบบใช้แรงบิด ซึ่งผลการทดสอบควรมีผลความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้า S45C ในการทดสอบ ตามตารางที่ 4.1 ทดสอบชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 8 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 40 นิวตัน-เมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด คือ 7.75 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดคือ 2.25 การทดสอบตามตารางที่ 4.2 ถึง 4.5 ทดสอบชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 10 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 60, 80, 100 และ 120 นิวตัน-เมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่แรงบิด 60 นิวตัน-เมตร คือ 6.50 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดอยู่ที่แรงบิด 120 นิวตัน-เมตรคือ 0.08 และการทดสอบตามตารางที่ 4.6 ถึง 4.9 ทดสอบชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิด 140, 160, 180 และ 200 นิวตัน-เมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่แรงบิด 160 นิวตัน-เมตร คือ 1.25 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดอยู่ที่แรงบิด 180 นิวตัน-เมตร คือ 0.00 ทำให้รู้ว่าเหล็กกล้า S45C ที่แรงบิดน้อยจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงและที่แรงบิดสูงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำ แต่ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานด้วย

## บทที่ 5

### สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย

จากการสร้างเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุแบบใช้แรงบิด ได้ทำการทดสอบ พร้อมทั้งหาสมรรถนะของเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบวัสดุโลหะชนิดเหล็ก S45C มาทำการขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดมาตรฐาน JIS Z 2274 ขึ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ใช้แรงบิดที่แตกต่างกันในการทดสอบ พบว่าในการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนค่าสูงสุดอยู่ช่วงแรงบิดที่ 40 นิวตันเมตร ขึ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร คือ 7.75 และค่าเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนค่าต่ำสุดอยู่ช่วงแรงบิดที่ 180 นิวตันเมตร ขึ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรคือ 0.00 ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ คือ มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินร้อยละ 10 จากการทำวิจัย เพื่อศึกษาความล้าของเหล็กกล้า S45C ที่อยู่ภายใต้แรงบิดที่มีขนาดเปลี่ยนแปลง จะพบว่าขนาดของแรงบิดที่มากจะส่งผลต่อความล้าของชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว และมีจำนวนรอบในการทำงานจะสั้น แต่ถ้าลดขนาดของแรงบิดที่กระทำกับชิ้นทดสอบลง แสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงบิดมีผลต่อความล้าของวัสดุ ดังนั้นในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องอยู่ภายใต้ความล้าเนื่องจากแรงบิด จะต้องไม่ให้มีแรงบิดที่กระทำกับชิ้นส่วนมากเกินไป เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากความล้า

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

การควบคุมลมจากแหล่งจ่ายและความเร็วของกระบอกสูบทำได้ค่อนข้างยาก

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 เครื่องทดสอบความล้าของวัสดุแบบใช้แรงบิด สามารถพัฒนาให้มีสมรรถนะมากยิ่งขึ้นอีก
- 5.3.2 สามารถเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับวัดมุมบิด ซึ่งจะทำให้เครื่องสามารถวัดมุมที่ขาดได้
- 5.3.3 การควบคุมความเร็วของการบิด หากใช้เป็นมอเตอร์จะควบคุมได้ง่ายกว่า
- 5.3.4 สามารถพัฒนาเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุแบบใช้แรงบิด ให้ใช้กลไกและระบบแบบอื่น เพื่อให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้



### บรรณานุกรม

- “นิวแมติกสPneumatic”, 2560, [http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon\\_vis/download/automation/Automation02.pdf](http://www.utcc2.utcc.ac.th/engineer/learning/chalermchon_vis/download/automation/Automation02.pdf) สืบค้นเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “วาล์วต่างๆของระบบนิวแมติกส์”, 2560, <http://webserv.kmitl.ac.th/s1010958/web/php/Solenoidvalves.php>
- “วัสดุเพลลา”, 2560, <http://www.bssteel.co.th/product-detail-SCM440.php> สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “หลักการทํางานของเฟือง”, 2560, <http://www.dc338.4shared.com/doc/d1FB6mOj/preview.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “เฟือง”, 2560, [http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post\\_07.html](http://www.engineerknowledge.blogspot.com/2011/09/blog-post_07.html) สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “ตลับลูกปืน Bearing”, 2560, <http://www.replicainspection.blogspot.com/2011/01/bearing-skf-bearing-iso.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “ตลับลูกปืนตึกตา”, 2560, [http://th.misumiec.com/contents/mech/campaign/email\\_20110127/bearing.html](http://th.misumiec.com/contents/mech/campaign/email_20110127/bearing.html) สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- “แรงบิด”, 2560, <http://www.industrial.cmru.ac.th> วันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2560
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน, 2522. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. การทดสอบวัสดุ: บรรยาย (Material Testing: Lecture). เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ (Material Testing). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2545.
- ศิริวุฒิ สาหร่าย, “การสร้างชุดทดสอบการหาค่าความล้าของวัสดุ,” เอกสารสืบเนื่องการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45, กรุงเทพฯ, หน้า265-275, 2550.
- อนุวัฒน์ สว่างศรี และอัญชลี ประดิษฐ์พฤกษ์. การพัฒนาเครื่องทดสอบความล้าตัวของวัสดุชนิดโลหะ แบบหมุนดัดปลายอิสระ. ปรียญานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2555.
- Alaneme, K. K., Design of a Cantilever-Type Rotating Bending Fatigue Testing Machine. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. Vol. 10, No. 11, pp 1027-1039, 2011.
- Ashby, M., Shercliff, H., and Cebon, D., “Materials engineering, science, processing and design,” 2<sup>nd</sup>.Ed., Butterworth-Heinemann: Canada,.pp.189-190, 2010.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

Branco, R., Costa, J. D., and Antunes, F. V., “Fatigue behaviour and life prediction of lateral notched round bars under bending–torsion loading” *Engineering Fracture Mechanics*. vol. 119, pp. 66–84, 2014.

Hosford, W. F. “Mechanical Behavior of Materials,” Cambridge University Press: New York, pp. 279-289, 2005.

Kluger, K., “Fatigue life estimation for 2017A-T4 and 6082-T6 aluminium alloys subjected to bending-torsion with mean stress” *International Journal of Fatigue*. vol. 80, pp. 22-29, 2015.

Sáгаа, M., Kopasa, P., and Uhrčík, M., “Modeling and experimental analysis of the aluminium alloy fatigue damage in the case of bending–torsion loading” *Procedia Engineering*, vol. 48, pp. 599–606, 2012.

Xue, H.Q., and Bathias, C., “Crack path in torsion loading in very high cycle fatigue regime” *Engineering Fracture Mechanics*. vol. 77, pp.1866-1873, 2010.

Zhang, J., Shi, X., and Fei, B., “High-cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A12-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading” *International Journal of Fatigue*. vol. 38, pp.144-154, 2012.

Zhang, J., Xiao, Q., Shi, X., and Fei, B., “Effect of mean shear stress on torsion fatigue failure behavior of 2A12-T4 aluminum alloy” *International Journal of Fatigue*. pp. xx-xx, 2013.

Zhang, J., Xiao, Q., Shi, X., and Fei, B., “Tension-torsion high-cycle fatigue analysis of 2A12-T4 aluminum alloy with different stress ratios” *International Journal of Fatigue*. vol. 33, pp.1066-1074, 2011.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

มาตรฐานการทดสอบ JIS Z2274



## Method of Rotating Bending Fatigue Testing of Metals\*

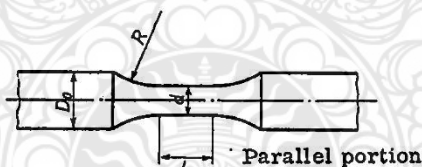
### 1. Scope

This Japanese Industrial Standard specifies the method of rotating bending fatigue testing of metals by the use of standard test pieces to be carried out at room temperature, in air, covering the fatigue life at the number of stress cycles not less than  $10^4$ . The rotating bending herein signifies a loading method in such a manner that the repeated stress is applied to the test piece, while the test piece having the axis in the bending moment plane rotates relatively to the plane of the bending moment.

### 3. Test Pieces

3.1 The standard test pieces are classified into No. 1 to No. 3 test pieces depending on their shape, and their standard dimensions shall be as shown in Figs. 1 to 3.

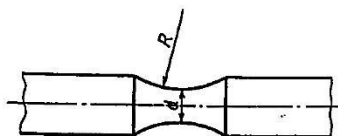
Fig. 1. No. 1 Test Piece



Symbol	$d$ mm	$R$	$L$
1-6	6		
1-8	8	$3d$ or more	$2d$ or more
1-10	10		
1-12	12		

$D_0$  shall, as a rule, be 8, 12, or 15 mm.

Fig. 2. No. 2 Test Piece



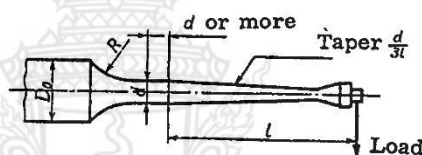
ตาราง ก.1 มาตรฐาน JIS Z 2274 (ต่อ)

—Z 2274—

Symbol	$d$ mm	R
2- 6	6	5 $d$ or more
2- 8	8	
2-10	10	
2-12	12	

$D_0$  shall, as a rule, be 8, 12, or 15 mm.

Fig. 3. No. 3 Test Piece

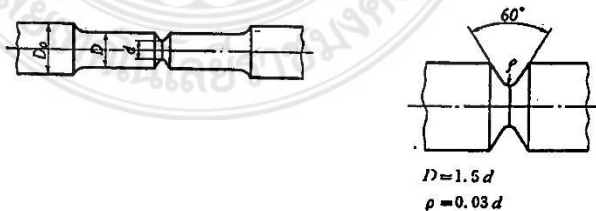


Symbol	$d$ mm	R	$l$
3- 6	6	3 $d$ or more	5 $d$ or more
3- 8	8		
3-10	10		
3-12	12		

Remark: The shape and dimensions shown in Fig. 4 are desirable for notched test pieces.

Fig. 4. Notched Test Pieces

(1) Annular V-Notched Test Piece

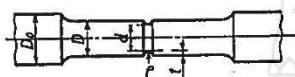




ตาราง ก.1 มาตรฐาน JIS Z 2274 (ต่อ)

—Z 2274—

(2) Annular Semi-circle Notched Test Piece



Annular semi-circle notch

$$D = 1.25 d$$

$$\rho = t = 0.125 d$$

(3) Round Holed Test Piece



Round hole

$$2\rho = 0.2 d$$

Section AA

3.2 In preparing test pieces by machining through cutting or grinding, precautions should be taken to ensure that the process does not cause on the test piece tearings and appreciable work strains, and also that the test pieces are not heated. The machined test pieces shall be polished by means of abrasive papers or cloths of successively finer grain size and finally of finer than No. 320 in order to eliminate streaks caused by cutting or grinding.

3.3 The errors for the finished dimension of  $d$  in diameter of the test piece referring to the nominal dimension shall be  $\pm 0.05$  mm. In No. 1 test piece, the deviation on the finished dimensions of the parallel portion (the difference between the maximum and minimum diameters in the parallel portion) shall be within 0.04 mm. Further, the test piece shall be so finished that there are no bends nor eccentricities not less than 0.02 mm.

3.4 The test pieces shall be so handled with sufficient care that they will not be rusted or damaged after being finished.

3.5 The diameter of the test piece shall be measured with an accuracy at least better than 0.5 %.

3.6 The diameter of a test piece shall be measured in two directions at right angles to each other in the same section and the arithmetic mean value shall be taken as the diameter of the section.

3.7 When a test piece has a parallel portion and the parallel portion is applied with uniform stress, the diameter shall, as a rule, be measured at several places of the parallel portion in accordance with the specification in 3.6 and the smallest value shall be taken as the diameter of the test piece.

#### 4. Testing Machine

4.1 The testing machine shall be capable of applying the bending moment shown in Fig. 5 to the testing portion of the test piece.

ภาคผนวก ข.

ตารางเปรียบเทียบหลักกล้า



ตาราง ข.1 ตารางเปรียบเทียบเหล็กกล้า

Carbon steels for machine structural use - Alloy steel and related materials

Japan Industrial Standards		Steel types related to foreign standards						
Standard number Name	Code	I S O 683/1,10,11 <sup>1)</sup>	A I S I SAE	J I S 570 Part 3 970 (JIS 570-3)	D I N 1008-1,2	J I S 570 Part 11 1008-11	F O C T 4543	
JIS G 4051 Carbon steel for machine structural use	S10C	C10	1010	04SA10 04SA10 04SM10	C10E C10P	1.0300	XC10	—
	S12C	—	1012	04SA12	—	—	XC12	—
	S15C	C15E4 C15M2	1015	05SM15	C15E C15P	1.0010	—	—
	S17C	—	1017	—	—	—	XC18	—
	S20C	—	1020	070M20 C22 C22E C22H	C22 C22E C22R	1.0028	—	—
	S22C	—	1023	—	—	1.0020	—	—
	S25C	C25 C25E4 C25M2	1025	C25 C25E C25R	C25 C25E C25R	1.1158	C25	—
	S28C	—	1029	—	—	1.1158	—	25 Γ
	S30C	C30 C30E4 C30M2	1030	080A30 080M30 C30 C30E C30R	C30 C30E C30R	1.1178	C30 C30E C30R	30 Γ
	S33C	—	—	—	—	1.1173	—	30 Γ
S35C	C35 C35E4 C35M2	1035	C35 C35E C35R	C35 C35E C35R	1.1181 1.1181 1.1183	C35 C35E C35R	35 Γ	
S38C	—	1038	—	—	1.1181	—	35 Γ	
S40C	C40 C40E4 C40M2	1039 1040	080M40 C40 C40E C40R	C40 C40E C40R	1.1186	C40 C40E C40R	40 Γ	
S43C	—	1043 1045	080A42	—	—	—	40 Γ	
S45C	C45 C45E4 C45M2	1045 1046	C45 C45E C45R	C45 C45E C45R	1.1503 1.1191 1.1193	C45 C45E C45R	45 Γ	
S48C	—	—	080M47	—	1.1191	—	45 Γ	
S50C	C50 C50E4 C50M2	1049	080M50 C50 C50E C50R	C50 C50E C50R	1.1213	C50 C50E C50R	50 Γ	
S53C	—	1050 1053	—	—	1.1210	—	50 Γ	
S55C	C55 C55E4 C55M2	1055	070M55 C55 C55E C55R	C55 C55E C55R	1.1200	C55 C55E C55R	—	
S58C	C60 C60E4 C60M2	1059 1060	C60 C60E C60R	C60 C60E C60R	1.1200	C60 C60E C60R	60 Γ	
S09CK	—	—	04SA10 04SM10	C10E	1.1121	XC10	—	
S15CK	—	—	—	C15E	1.1141	XC12	—	
S20CK	—	—	—	—	1.1151	XC18	—	

\* ISO (International Standard), AISI (USA), BS (UK), DIN (Germany), NF (France), JCT (Russia)

Japan Industrial Standards		Steel types related to foreign standards						
Standard number Name	Code	I S O 683/1,10,11 <sup>1)</sup>	A I S I SAE	J I S 570 Part 3 970 (JIS 570-3)	D I N 1008-1,2	J I S 570 Part 11 1008-11	F O C T 4543	
JIS G 4102 Nickel-chromium steel	SNC236	—	—	—	—	—	40X4	
	SNC415	—	—	—	—	—	1.5732	
	SNC631	—	—	—	—	—	1.5736	
	SNC815	15NiCr13	—	635M13	16NiCr13	—	1.5752	
SNC836	—	—	—	—	—	1.5755	—	
JIS G 4103 Nickel-chrome molybdenum steel	SNCM20	20NiCrMo2	8615 8617 8620 8622	80CA20 80CA20 80SA22 80SM22	30CrMo 30CrMo	1.6523	20NiCr2	—
	SNCM40	40CrNiMo2	8637 8640	—	—	—	1.6546	—
	SNCM15	—	—	—	—	—	—	—
	SNCM20	—	4320	—	—	—	—	20NiCrMo
	SNCM31	—	—	—	—	—	1.6280	—
	SNCM39	—	4340	—	—	—	1.6565	—
	SNCM47	—	—	—	—	—	1.6582	—
	SNCM53	—	—	—	—	—	—	—
	SNCM55	—	—	—	—	—	—	—
	SNCM30	—	—	—	—	—	—	—
SNCM35	—	—	—	—	—	—	—	
JIS G 4104 Chrome steel	SCr415	—	—	—	170Cr3 170Cr3	1.7015	—	15X 15XA
	SCr420	20Cr4 20CrS4	5120	—	—	—	—	20X
	SCr430	34Cr4 34CrS4	5130 5132	34Cr4 34CrS4	34Cr4 34CrS4	1.7033	34Cr4 34CrS4	30X
	SCr435	34Cr4 34CrS4	5132	37Cr4 37CrS4	37Cr4 37CrS4	1.7034	37Cr4 37CrS4	35X
	SCr440	37Cr4 37CrS4 41Cr4 41CrS4	5140	50M40 41Cr4 41CrS4	41Cr4 41CrS4	1.7035	—	40X
	SCr445	—	—	—	—	—	—	45X
	SCrM15	—	—	—	—	—	1.7262	—
	SCrM18	18CrMo4 18CrMoS4	—	—	18CrMo4 18CrMoS4	—	1.7242	—
	SCrM20	—	—	70M20	—	—	1.7218	—
	SCrM21	—	—	—	—	—	1.7264	—
SCrM40	—	4131	—	—	—	1.7218	—	
SCrM42	—	—	—	—	—	1.7220	—	
SCrM435	34CrMo4 34CrMoS4	4137	34CrMo4 34CrMoS4	34CrMo4 34CrMoS4	1.7220	34CrMo4 34CrMoS4	35XM	
SCrM440	42CrMo4 42CrMoS4	4140 4142	70M40 42CrMo4 42CrMoS4	42CrMo4 42CrMoS4	1.7225	42CrMo4 42CrMoS4	—	
SCrM445	—	4145 4147	—	—	—	1.7228	—	
SCrM22	—	—	—	—	—	1.7268	—	

Japan Industrial Standards		Steel types related to foreign standards						
Standard number Name	Code	I S O 683/1,10,11 <sup>1)</sup>	A I S I SAE	J I S 570 Part 3 970 (JIS 570-3)	D I N 1008-1,2	J I S 570 Part 11 1008-11	F O C T 4543	
JIS G 4106 Structural high-tensile steel for machine structural use with guaranteed high-temperature strength	SMn420	22Mn6	1522	150M19	—	1.1160	—	
	SMn433	—	1534	150M36	—	1.1166	30 Γ 2 35 Γ 2	
	SMn438	36Mn6	1541	150M36	—	1.1167	35 Γ 2 40 Γ 2	
	SMn443	42Mn6	1541	—	—	—	40 Γ 2 45 Γ 2	
	SMn420H SMn433H SMn438H SMn443H SMn420H SMn433H	—	—	—	—	—	—	—
JIS G 4202 Aluminum-chromium steel	SNCr465	41CrNiMo74	—	—	1.8503	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	
JIS G 4052 Structural steel with guaranteed high-temperature strength	SMn20H	22Mn6	1522H	—	—	1.1160	—	
	SMn33H	—	—	—	—	1.1166	—	
	SMn38H	36Mn6	1541H	—	—	1.1167	—	
	SMn43H	42Mn6	1541H	—	—	—	—	
	SMn20H SMn33H SMn38H SMn43H	—	—	—	—	—	—	—
	SCr415H	—	—	—	—	1.7015	—	15X
	SCr420H	20Cr4 20CrS4	5120H	—	—	—	—	20X
	SCr430H	34Cr4 34CrS4	5130H 5132H	34Cr4 34CrS4	34Cr4 34CrS4	1.7033	34Cr4 34CrS4	30X
	SCr435H	34Cr4 34CrS4 37Cr4 37CrS4	5135H	37Cr4 37CrS4	37Cr4 37CrS4	1.7034	37Cr4 37CrS4	35X
	SCr440H	37Cr4 37CrS4 41Cr4 41CrS4	5140H	41Cr4 41CrS4	41Cr4 41CrS4	1.7035	41Cr4 41CrS4	40X
SCrM15H	—	—	—	—	—	1.7262	—	
SCrM18H	18CrMo4 18CrMoS4	—	—	—	—	1.7242	—	
SCrM20H	—	—	70M20	—	—	1.7218	—	
SCrM21H	34CrMo4 34CrMoS4	4135H 4137H	34CrMo4 34CrMoS4	34CrMo4 34CrMoS4	1.7220	34CrMo4 34CrMoS4	—	
SCrM40H	42CrMo4 42CrMoS4	4140H 4142H	42CrMo4 42CrMoS4	42CrMo4 42CrMoS4	1.7225	42CrMo4 42CrMoS4	—	
SCrM44H	—	4145H 4147H	—	—	—	1.7228	—	
SCrM22H	—	—	—	—	—	1.7268	—	
SCrM31H	—	—	—	—	—	1.5732	—	
SCrM39H	—	—	—	—	—	1.5752	—	
SCrM30H	20NiCrMo2 20NiCrMoS2	8617H 8620H 8622H	—	—	—	1.6523	20NiCr2	
SCrM35H	—	4320H	—	—	—	—	—	

Japan Industrial Standards		Steel types related to foreign standards						
Standard number Name	Code	I S O 683/1,10,11 <sup>1)</sup>	A I S I SAE	J I S 570 Part 3 970 (JIS 570-3)	D I N 1008-1,2	J I S 570 Part 11 1008-11	F O C T 4543	
JIS G 4107 High-temperature alloy steel for bolts	SNC85	—	501	8150-85	—	—	—	
	SNC87	42CrMo4 42CrMoS4	4140 4142 4145	70M40 70M40 42CrMo4	—	1.7225	42CrMo4 <sup>2)</sup>	—
	SNC816	—	—	—	—	1.7211	40CrMo4-8 <sup>3)</sup>	—
	SNC817	—	—	—	—	1.7211	40CrMo4-8 <sup>4)</sup>	—
JIS G 4108 Steel bar for special-purpose alloy steel bolt	SNC21-1	42CrMo4	4142H	—	—	1.7223	—	
	SNC23-1	—	E4340H	—	—	1.6522	—	
	SNC24-1	—	4340	—	—	1.6565	—	
*1) BS EN 10250 *2) DIN 1564 Part 4 *3) DIN 15743 *4) NF EN 10239 *5) The transition: JIS G 4106-1, 10, and 11 are issued as JIS G 7501, 7502, and 7503.								
Aluminum and aluminum alloy extender								
Japan Industrial Standards		Steel types related to foreign standards						
Standard number Name	Code	I S O 6361-30 I S O 206-9	AA AA-33	ASTM B209M-95	FS QQ-A-250	BS EN652-35** BS EN673-35*	DIN EN673-35*	
JIS H 4000-30 Aluminum sheet and bars	A2017P	AlSiMg2.5	—	—	—	EN AW-2017A	EN AW-2017A	
	A5052P	AlMg2.5	5052	5052	5052 (0.04-2.00% Si)	EN AW-5052	EN AW-5052	
	A6061P	—	6061	6061	6061 (0.04-0.07% Si)	EN AW-6061	EN AW-6061	
A7075P	AlZn5.5MgCu	7075	7075	7075 (0.04-0.07% Si)	EN AW-7075	EN AW-7075		
**ISO (International Standard), AA (USA), ASTM (USA), FS (USA), BS (UK), DIN (Germany)								
Name of tool steel								
Roll steel for general structure	SK500	—	—	—	—	—	—	
Roll steel for general structure	SK500	—	—	—	—	—	—	
Carbon steel for machine structure	S45C	—	—	—	—	—	—	
Chrome (Ni) alloy steel	SNCM435	—	—	—	—	—	—	
Nickel-chrome molybdenum steel	SNCM220	—	—	—	—	—	—	
Carbon tool steel	SK105	—	—	—	—	—	—	
Alloy tool steel	SKS3	—	—	—	—	—	—	
High-speed tool steel	SKH51	—	—	—	—	—	—	
High-speed chrome bearing steel	SUJ2	—	—	—	—	—	—	
Stainless steel	SUS304	—	—	—	—	—	—	

[TECHNICAL DATA] COMPARISON OF MATERIALS BETWEEN JIS AND FOREIGN STANDARDS -1-

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายประเสริฐ วิโรจน์ชิววัน  
 วัน-เดือน-ปีเกิด 19 กันยายน พ.ศ. 2508  
 ที่อยู่ 92/142 หมู่ 5 ต.บางศรีเมือง อ.เมืองนนทบุรี  
 จ.นนทบุรี 11000  
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
 เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ สาย 1 เขตบางซื่อ  
 กรุงเทพมหานคร 10800  
 โทรศัพท์.02-8363000

## ประวัติการศึกษา

ระดับ ปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	ปร.ด. (วิศวกรรมอุตสาหการ)	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอม เกล้าพระนครเหนือ	2554
ปริญญาโท	วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนคร เหนือ	2539
ปริญญาตรี	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีราช มงคล	2537
ปริญญาตรี	ค.อ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล)	สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าธนบุรี	2531

โทรศัพท์

081-485-9213

E-mail Address

prasertwirot@hotmail.com