

ชุดทดสอบความเสียหายความล้าสัมผัสการหมุนของวัสดุล้อ/รางรถไฟ

DEVELOPMENT OF ROLLING CONTACT FATIGUE TESTERS FOR RAIL/WHEEL  
MATERIALS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF ROLLING CONTACT FATIGUE TESTERS FOR RAIL/WHEEL  
MATERIALS



KIMHAN TANTRASAKUNWONG  
CHANCHAI KATEKING  
CHANUN SUKPARUNGSEE

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดทดสอบความเสียหายความล้มเหลวการหมุนของวัสดุล้อ/รางรถไฟ

นายคิมหันต์	ตันตระสกุลวงศ์	59010173
นายชาญชัย	เกษกิง	59010313
นายชานันท์	สุขภารังษี	59010320
ผศ.ดร.ปัญญา	ขันธสุวรรณ	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและสร้างเครื่องทดสอบเพื่อหาอายุการใช้งานของความเสียหายที่เกิดจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง โดยในปัจจุบันระบบขนส่งทางรางถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อขนส่งสินค้าหรือผู้โดยสาร เป็นส่วนหนึ่งของห่วงโซ่โลจิสติกส์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสะดวกให้กับการค้าขายระหว่างประเทศและการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจในหลาย ๆ ประเทศ การป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับล้อและรางรถไฟจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายที่เกิดจากความล้าจากการสัมผัสสกลิ่งที่เป็นเหตุผลหลักของการตกรางมากที่สุด ความล้าจากการสัมผัสสกลิ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างกว้างขวางในระบบทางรถไฟทุกชนิด การทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งระบบโรงงานจริงถือเป็นวิธีทดสอบที่ดีที่สุดในการทดสอบหาอายุการใช้งานของวัสดุ แต่มีข้อจำกัดคือ กระบวนการผลิตในโรงงานจริงต้องผลิตครั้งละจำนวนมากและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ไม่เหมาะสำหรับการผลิตเพื่อทดลองในจำนวนน้อย ๆ วิธีที่คุ้มค่าและเหมาะสมที่สุดคือการใช้เครื่องทดสอบแบบตั้งโต๊ะ การใช้เครื่องทดสอบแบบตั้งโต๊ะจะเป็นการช่วยลดตัวแปรที่ซับซ้อนที่เกิดขึ้นเมื่อทดสอบด้วยกระบวนการในระบบโรงงานจริง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและเวลาในการทดสอบหาอายุการใช้งานอีกด้วย ดังนั้นทางกลุ่มวิจัยจึงคิดสร้างเครื่องทดสอบความล้าจากการสัมผัสสกลิ่งขึ้นมาสำหรับทดสอบหาอายุการใช้งานของความเสียหายที่เกิดจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งของล้อและรางรถไฟ โดยตัวเครื่องทดสอบความเสียหายที่เกิดจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งจะเป็นแบบใช้ลูกบอลสัมผัสกับแท่งทรงกระบอก

**คำหลัก:** การล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง ; ความเสียหาย ; ล้อและรางรถไฟ ; เครื่องทดสอบแบบตั้งโต๊ะ

## DEVELOPMENT OF ROLLING CONTACT FATIGUE TESTERS FOR RAIL/WHEEL MATERIALS

Kimhan	Tantrasakunwong	59010173
Chanchai	Kateking	59010313
Chanun	Sukparungsee	59010320
Asst.Prof. Dr.Panya Kansuwan		Advisor
Year 2562		

## ABSTRACT

The objectives of this project are to build a Rolling Contact Fatigue testing machine and to examine rolling contact fatigue life. At present, the rail transport system is being widely used for freight and passengers transportation. Rail transport system is a part of the logistics chain which will increase the convenience of international trade and economic growth in many countries. Damage prevention of wheel and rail are important factors affecting the safety of the system, especially, Rolling Contact Fatigue is a pervasive problem on all types of railway systems that cause the most derailments. Full-scale tests are considered the most satisfactory method for estimating the rolling contact fatigue life. However, the full-scale tests are expensive and time-consuming because of the need to manufacture the sample in large quantities. Additionally, they are not suitable for a small-scale experiment. A more effective and expedient way is to use a bench tester which can minimize many complex variables encountered in the full-scale test. This project is, therefore, determined to design the ball-rod rolling contact fatigue tester machine.

**Keywords:** Rolling Contact Fatigue ; Failure ; Wheel and rail ; Bench Tester

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปัญญา  
 ชันธุสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมา

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์รวมถึงสถานที่  
 ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่  
 เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ  
 เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอ  
 กราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายคิมหันต์	ตันตระสกุลวงศ์
นายชาญชัย	เกษกิง
นายชานันท์	สุขภารังษี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของรถไฟ.....	4
2.1.1 ร่างรถไฟ (Rail).....	4
2.1.2 ล้อรถไฟ (Wheel).....	5
2.1.3 โบกี้ (Bogie).....	6
2.2 ความเสียหายของล้อและร่างรถไฟเนื่องจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง.....	7
2.2.1 ผิวร่างหลุดล่อน (Shelling).....	7
2.2.2 หัวมุมของร่างแตก (Gauge Corner Cracks).....	8
2.2.3 ผิวร่างแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ (Flaking).....	8
2.2.4 Squats.....	9
2.3 ภาวะแบบวงรอบ (Cyclic stress).....	10
2.3.1 ความเค้นเฉลี่ย (Mean stress).....	11
2.3.2 ช่วงกว้างความเค้น (Range of stress).....	11
2.3.3 แอมพลิจูดของความเค้น (Stress amplitude).....	12
2.3.4 สัดส่วนความเค้น (Stress ratio).....	12
2.4 พฤติกรรมของการล้า.....	12
2.4.1 อายุการล้า (Fatigue Life).....	13
2.4.1.1 การล้าแบบจำนวนรอบสูง (High Cycle Fatigue).....	13
2.4.1.2 การล้าแบบจำนวนรอบต่ำ (Low Cycle Fatigue).....	14
2.5 การทดสอบการล้า (Fatigue Test).....	15
2.6 ทฤษฎีการออกแบบชิ้นทดสอบ (Specimen Design).....	16
2.6.1 ปัจจัยในการออกแบบชิ้นทดสอบ.....	16
2.6.1.1 จุดที่ความเสียหายเกิดขึ้น.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1.2 ระยะเผื่อ.....	16
2.6.2 การเลือกขนาดและชนิดของชิ้นทดสอบ.....	16
2.6.2.1 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งร่วมระหว่างส่วนทดสอบกับปลายจับ (Specimens with tangentially blended fillets between the test section and the ends).....	16
2.6.2.2 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งต่อเนื่องระหว่างปลายจับ (Specimens with a continuous radius between ends).....	17
2.6.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	18
2.7 ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Theories).....	18
2.7.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับวัสดุเหนียว.....	21
2.7.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป.....	22
2.8 ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz contact theory).....	26
บทที่ 3 แผนการดำเนินการ.....	29
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน.....	29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	30
3.2.1 ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับแบบร่างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง (Rolling Contact Fatigue Tester Schematic).....	30
3.2.1.1 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าแบบ NTN Cylinder-to-ball.....	30
3.2.1.2 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าแบบ Ball-rod.....	32
3.3 การออกแบบและประกอบเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง.....	35
3.3.1 กำหนดแบบของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง.....	35
3.3.1.1 กำหนดชุดโครงสร้างหลัก.....	35
3.3.1.2 การกำหนดและออกแบบรายละเอียด.....	35
3.3.1.3 ขั้นตอนการประเมินราคา.....	35
3.3.2 การออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง.....	37
3.3.2.1 ผนังหลัก (Wall).....	37
3.3.2.2 เพลาของลูกกลิ้งนำทาง (Guided roll shaft).....	37
3.3.2.3 ลูกกลิ้งนำทาง (Guided roll).....	37
3.3.2.4 เพลาของลูกกลิ้งตัวส่ง (Driving roll shaft).....	37
3.3.2.5 ลูกกลิ้งตัวส่ง (Driving roll).....	37
3.3.2.6 ชิ้นทดสอบ (Specimen).....	38
3.3.2.7 ลูกบอลเหล็ก (Steel ball).....	38
3.3.2.8 จุดหมุนแขนส่งถ่ายแรง (Connector pivot).....	38
3.3.2.9 ผนังแบบเลื่อนออกได้ (Removable wall).....	38
3.3.2.10 เพลาขับที่ติดกับมอเตอร์ (Guided roll shaft connect with motor).....	38
3.3.2.11 แผ่นปิดตัวแบริง (Cap).....	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2.12 ลูกกลิ้งรองรับเพลลา (Support Bearing).....	38
3.3.2.13 ลูกกลิ้งรองรับแขนส่งถ่ายแรง (Support Beam).....	39
3.3.2.14 ฐานรองเครื่องทดสอบ (Base).....	39
3.3.2.15 ตัวขับเคลื่อนเพลลา (Timing Pulley).....	39
3.3.2.16 คัปปลิ่ง (Coupling).....	39
3.3.2.17 ตัวดึงสายพาน (Belt Take-Up).....	39
3.3.2.18 น็อตล็อคตัวดึงสายพาน (Nut).....	39
3.3.2.19 แผ่นรองรับการกด (Pressed Sheet).....	39
3.3.2.20 แท่นสปริง (Stud).....	39
3.3.2.21 แท่นยึดแขนตัวหมุน (Beam).....	39
3.3.2.22 ตัวหยุดแขนตัวหมุน (Stopper Beam).....	40
3.3.2.23 แท่นตั้งตัวเรียงสายพาน (Setting Idler).....	40
3.3.2.24 แผ่นรองสปริง (Sub Plate).....	40
3.3.2.25 ตัวรองสปริง (Pressed Plate).....	40
3.3.2.26 แขนส่งถ่ายแรงฝั่งขวา (Right Connector).....	40
3.3.2.27 แขนส่งถ่ายแรงฝั่งซ้าย (Left Connector).....	40
3.3.2.28 แผ่นวางตัวบน (Top Plate).....	40
3.3.2.29 ผนังแบบเลื่อนออกได้ (Removable wall).....	40
3.3.2.30 ผนังหลัก (Wall).....	40
3.3.2.31 สายพาน (Timing Belt).....	41
3.3.2.32 สปริงกด (Compress Spring).....	41
3.3.3 อุปกรณ์และหลักการทำงานของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแต่ละชนิดในเครื่องทดสอบ	
การล้าจากการสัมผัสกลิ้ง.....	41
3.3.3.1 เบรกเกอร์ (Breaker).....	41
3.3.3.2 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Power Supply).....	41
3.3.3.3 สวิตช์ต่อวงจร (Magnetic Contactor).....	42
3.3.3.4 ตัวประมวลผลข้อมูล (Arduino).....	43
3.3.3.5 สวิตช์ของวงจร (Relay Module).....	44
3.3.3.6 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ (Infrared Photoelectric Switch Sensor).....	45
3.3.3.7 เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor).....	46
3.3.3.8 หน้าจอแสดงผล (LCD Liquid Crystal Display).....	47
3.3.3.9 ตัวประกอบ I <sup>2</sup> C (Inter-Integrated Circuit).....	47
3.3.3.10 สวิตช์ปุ่มกด (Button Switch).....	48
3.3.3.11 บอร์ด (Breadboard).....	48
3.3.3.12 สายไฟ (Jump Wire).....	49
3.3.3.13 มอเตอร์ (Motor).....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.14 ตู้ไฟฟ้า (Main Distribution Board).....	50
3.3.3.15 สวิตช์ 2 ทาง (Selector Switch 2 Way).....	50
3.3.3.16 อุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟ (Terminal Board).....	50
3.3.3.17 ตัวตัดไฟ (Overload Relay).....	51
3.3.4 การทำงานของระบบไฟฟ้า.....	52
3.3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบไฟฟ้า.....	53
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	54
4.1 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบความล้าของโลหะ.....	54
4.2 ผลการทดสอบ.....	54
4.2.1 การคำนวณค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ระหว่างขั้นทดสอบกับลูกเหล็ก.....	54
4.2.2 การคำนวณค่าอายุการใช้งานของวัสดุที่มีโอกาสชำรุด 10 % ( $L_{10}$ Life) โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ (Weibull distribution).....	56
4.2.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel.....	57
4.2.2.2 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.00 GPa.....	59
4.2.2.3 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.50 GPa.....	61
4.2.2.4 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 2.00 GPa.....	63
4.2.2.5 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 2.50 GPa.....	64
4.2.2.6 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.00 GPa.....	66
4.2.2.7 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.50 GPa.....	67
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน.....	70
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการปรับปรุง.....	70
เอกสารอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก. แบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบความล้าของวัสดุ.....	74
ภาคผนวก ข. การประกอบเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ.....	98
ภาคผนวก ค. วงจรไฟฟ้าของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ $m$ และ $n$ ในรูปของตัวแปร $\theta$ .....	28
3.1 แสดงขนาดของมุมของฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดรีเวว, แรงในแนวรัศมีที่ใส่ให้กับลูกบอลเหล็ก 3 ลูกและแรงที่ลูกบอลเหล็กส่งผ่านให้ชั้นทดสอบ.....	32
4.1 แสดงคุณสมบัติของชั้นทดสอบและลูกบอลเหล็ก.....	
4.2 แสดงระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน $x$ , แกน $y$ และความลึกตรงรอยกดตามความเค้นสัมผัส ของเฮิร์ตซ์แต่ละค่า.....	
4.3 แสดงแรงกดระหว่างลูกกลิ้งตัวส่งกับชั้นทดสอบและแรงกดของสปริงที่ต้องใส่ตามความเค้น สัมผัสของเฮิร์ตซ์แต่ละค่า.....	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของรางรถไฟ (ซ้าย) และมาตรฐานรางแบบ UIC 60 (ขวา).....	5
2.2 ความกว้างของทางรถไฟ.....	5
2.3 ชุดล้อรถไฟพร้อมเพลลา.....	6
2.4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของโบกี้รถไฟ.....	7
2.5 ขั้นตอนการเกิดผิวรางหลุดล่อน (ชั้นเริ่มต้น, ชั้นกลาง, ชั้นรุนแรง).....	8
2.6 ชั้นเริ่มต้นของการเกิดหัวมุมรางแตก.....	8
2.7 ขั้นตอนการเกิดหัวมุมรางแตก (ชั้นเริ่มต้น, ชั้นกลาง, ชั้นรุนแรง).....	9
2.8 ตัวอย่างผิวรางแตกเป็นชั้นเล็ก ๆ.....	9
2.9 Squats ที่เกิดจากหัวมุมของรางแตก.....	10
2.10 ภาวะที่เกิดกับชิ้นส่วนทางวิศวกรรม.....	11
2.11 ภาวะวงรอบแบบแอมพลิจูดคงที่.....	12
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยความเค้นกับอายุการล้าแบบจำนวนรอบสูงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L (ลูกศรแสดงขีดจำกัดการล้า).....	14
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยความเครียดกับอายุการล้าแบบจำนวนรอบต่ำของโลหะเชื่อมแบบ มีตะกั่ว (63Sn-37Pb) และไม่มีตะกั่ว (96.5Sn-37Pb).....	14
2.14 ขั้นตอนการล้าหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม.....	15
2.15 ขั้นตอนการล้าแบบมีส่วนโค้งระหว่างส่วนทดสอบกับปลายจับ.....	17
2.16 ขั้นตอนการล้าแบบมีส่วนโค้งต่อเนื่องระหว่างปลายจับ.....	17
2.17 กราฟแสดงค่าความเครียดและความเค้นของวัสดุเหนียว (ซ้าย) และวัสดุเปราะ (ขวา).....	20
2.18 สมการที่ 2.10 - 2.12 ในระนาบ $\sigma_A, \sigma_B$ .....	22
2.19 พลังงานการเปลี่ยนรูปพลาสติกภายใต้ความเค้น 3 มิติ.....	23
2.20 แสดงสมการ $\sigma'$ บนระนาบ $\sigma_A, \sigma_B$ .....	24
2.21 แสดงสมการ $\sigma'$ บนระนาบ $\sigma_A, \sigma_B$ .....	25
2.22 แบบจำลองการสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ตซ์.....	26
2.23 พื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างลูกเหล็กกับชิ้นทดสอบ.....	27
3.1 ขั้นตอนการทำโครงงาน.....	29
3.2 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส.....	31
3.3 แบบร่างภายในของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส.....	31
3.4 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส (มุมมองด้านบน).....	32
3.5 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส (มุมมองด้านข้าง).....	32
3.6 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสแบบ Ball-rod.....	34
3.7 ตัวอย่างตัวเครื่องที่ประกอบเสร็จ.....	34
3.8 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสจากโปรแกรม Solidwork.....	35
3.9 แบบร่างมุมที่ 1 เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสจากโปรแกรม Solidwork.....	36
3.10 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 Guild roll จากแบร์ริงรูน 6310.....	37
3.12 Driving roll จากแบร์ริงรูน N204ECP.....	38
4.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์การกระจายไวบูลล์ใน Microsoft Excel.....	57
4.2 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุด.....	58
4.3 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot).....	58
4.4 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (Weibull probability plot).....	58
4.5 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.00 GPa.....	60
4.6 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.00 GPa.....	60
4.7 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่า 1.00 GPa.....	61
4.8 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.50 GPa.....	61
4.9 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.50 GPa.....	62
4.10 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่า 1.50 GPa.....	62
4.11 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 2.00 GPa.....	63
4.12 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 2.00 GPa.....	63
4.13 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่า 2.00 GPa.....	64
4.14 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 2.50 GPa.....	64
4.15 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 2.50 GPa.....	65
4.16 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่า 2.50 GPa.....	65
4.17 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.00 GPa.....	66
4.18 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.00 GPa.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่า 3.00 GPa.....	67
4.20 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.50 GPa.....	67
4.21 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.50 GPa.....	68
4.22 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า $L_{10}$ ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่า 3.50 GPa.....	68
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $L_{10}$ และค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่เกิดจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งในรางรถไฟปรากฏให้เห็นส่วนใหญ่ระหว่างช่วงปีค.ศ. 1990 อย่างไรก็ตามทางบริษัทผู้ผลิตรางรถไฟเริ่มให้ความสนใจเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งหลังจากอุบัติเหตุรถไฟตกรางที่ Hatfield สหราชอาณาจักรในปีค.ศ. 2000 ซึ่งในเหตุการณ์นั้นมีผู้เสียชีวิต 4 คน บาดเจ็บ 39 คน รางรถไฟได้รับความเสียหายกว่า 30 เมตร รวมมูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจกว่า 1 พันล้านยูโร จากข้อมูลทางสถิติของกองบริหารทางรถไฟแห่งชาติสหรัฐอเมริกาย้อนหลัง 8 ปี จากปีค.ศ. 1995 ถึง 2002 การล้าจากการสัมผัสสกลิ่งเป็นปัญหาหลักที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุรถไฟตกรางกว่า 122 ครั้ง และยังมี การตั้งข้อสงสัยว่าการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งอาจมีส่วนทำให้เกิดอุบัติเหตุรถไฟตกรางมากกว่า 160 ครั้ง

การล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง (Rolling Contact Fatigue) คือความเสียหายรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสของล้อและรางรถไฟ โดยจะเริ่มเกิดบริเวณผิวสัมผัสของพื้นล้อ ก่อให้เกิดความเสียหายในรูปแบบของผิวงาหุลุดล่อน, หัวมุมของรางแตก, ผิวงาแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และ Squats ทุกความเสียหายที่กล่าวมาข้างต้นเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ล้อได้รับความเค้นสัมผัสซ้ำ ๆ (Cyclic stresses) บนพื้นผิวงาเป็นจำนวนหลายล้านรอบ

สองขั้นตอนหลักที่มีผลต่อการควบคุมการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งคือขั้นเริ่มเกิดรอยแตกและขั้นแพร่กระจายรอยแตกในรางรถไฟ ซึ่งขั้นตอนทั้งสองจะต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัยเช่น ส่วนประกอบของล้อและราง, ความโค้งของราง, ความผิดพลาดของรูปทรงของรางจากการออกแบบ, สิ่งแวดล้อมภายนอก ฯลฯ ปัจจัยเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งและเมื่อควบคุมปัจจัยให้มีความเหมาะสมจะสามารถลดการเกิดความเสียหายจากการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งได้อีกด้วย

#### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและรายละเอียดที่เกี่ยวกับเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งแบบ Cylinder-to-ball

1.2.2 เพื่อศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง พิจารณาถึงความปลอดภัยของโครงสร้าง ความสะดวกในการใช้งานที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรมการออกแบบเครื่องจักรกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวโน้มการทำงานและผลที่ได้จากของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง อ้างอิงจากงานวิจัยที่มีก่อนหน้านี้

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งจะหยุดการทำงานเมื่อเกิดความเสียหายบนชิ้นทดสอบ

1.3.2 เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งสามารถใช้ทดสอบชิ้นทดสอบได้จริง

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ความสำคัญของการวิเคราะห์ความล้ายังคงต้องมีมากขึ้นเรื่อย ๆ トラบเท่าที่บริษัทยังต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุให้ได้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถประหยัดเรื่องการใช้วัสดุให้น้อยลง ประหยัดค่าใช้จ่าย และถึงแม้ว่าการลดความหนาของวัสดุลงเพียงนิดเดียว อาจทำให้บริษัทมีเงินเพิ่มขึ้นอย่างมากมาจากการผลิตเป็นจำนวนมาก ๆ แต่อีกสิ่งที่ไม่ควรลืมก็คือ การป้องกันความล้าของวัสดุที่จะเกิดขึ้น ก็มีความสำคัญมากขึ้นตามปริมาณการผลิตด้วยเช่นเดียวกัน ไม่เช่นนั้นหากเกิดความเสียหายในระหว่างการใช้งานและอยู่ในการรับประกันสินค้า บริษัทอาจจะต้องสูญเสียเงินในการซ่อมบำรุงเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน และอาจส่งผลให้มีความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินเกิดขึ้นอีกด้วย

โดยปกติส่วนใหญ่การออกแบบจะคำนึงถึงความปลอดภัยของชิ้นงาน โครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ การออกแบบแบบนี้วิศวกรต้องวิเคราะห์ว่าสามารถรับแรงสูงสุดได้หรือไม่ ค่าความปลอดภัยที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการรับประกันสินค้า ลักษณะของการวิเคราะห์คือการรับแรงแค่เพียงครั้งเดียวและคงที่ (Static Load) แต่จริง ๆ แล้วโครงสร้างมักถูกนำไปใช้งานต่างออกไป เช่น การรับแรงแบบไม่คงที่ การรับแรงซ้ำ ๆ บ่อย ๆ ทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว ความหมายของการล้าคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการรับภาระแรงซ้ำ ๆ หรือแรงที่ไม่คงที่ โดยที่ภาระแรงนั้นยังไม่ได้ทำให้ชิ้นงานเสียหาย เมื่อรับเพียงครั้งเดียวอาการของความล้าก็คือลักษณะการแตกพังที่บริเวณใด ๆ ของชิ้นงาน การแตกพังดังกล่าวมักเป็นผลมาจากการรับความเครียดที่สูงมากจากการรับแรงหรืออาจจะเป็นจุดที่รับความเครียดมาก่อนหน้าที่จะรับแรงก็ได้

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งแบบ Cylinder-to-ball ตามหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 คำนวณแรงที่ต้องใช้และความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์ที่เกิดขึ้นสำหรับการจำลองการสัมผัสระหว่างลูกเหล็กและชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.3 คำนวณและสร้างกราฟแนวโน้มค่าอายุการใช้งานของวัตถุที่มีโอกาสชำรุด 10 % ( $L_{10}$  Life) โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากหนังสือ วารสาร และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยจัดเป็นหมวดหมู่ดังต่อไปนี้

1.6.1.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิศวกรรมรถไฟ

1.6.1.2 ทฤษฎีการสัมผัสระหว่างล้อและรางรถไฟ

1.6.1.3 ทฤษฎีความเสียหายและการล้าจากการสัมผัสที่เกี่ยวข้อ

1.6.2 ศึกษาแบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสแบบ Cylinder-to-ball ทำความเข้าใจหลักการทำงานและสร้างเครื่องทดสอบการล้าที่สามารถใช้ทดสอบชิ้นงานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับรถไฟ

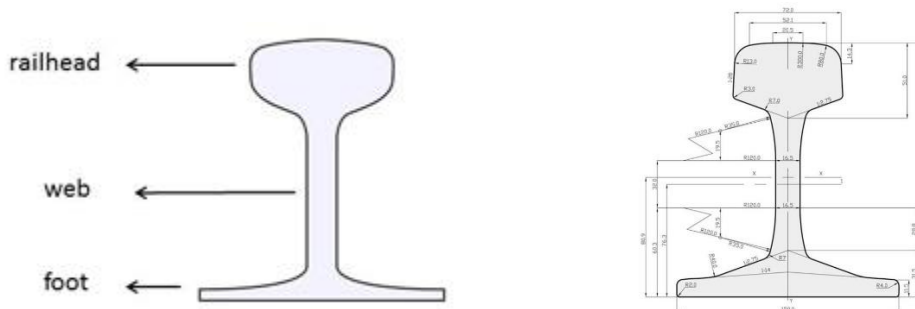
##### 2.1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของรถไฟ

ในการเคลื่อนที่ของรถไฟ ส่วนประกอบของรถไฟต่าง ๆ ถือเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนและความปลอดภัยของผู้โดยสาร โดยส่วนประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญของรถไฟคือ รางรถไฟ ล้อ และโบกี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 2.1.1.1 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟมีประวัติวิวัฒนาการมานานมากตามเทคโนโลยีในการผลิตที่ทำได้ในแต่ละยุคสมัย จนกระทั่งถึงปัจจุบัน รางรถไฟจะทำด้วยเหล็กเหนียวรีดร้อน (Billet Steel Forging) มีรูปร่างซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ หัวราง (Rail Head) เอรราง (Web) และฐานราง (Foot) รางที่นิยมใช้คือแบบฐานรางกว้าง ซึ่งสามารถยึดเกาะอยู่กับหมอนรองรางได้อย่างมั่นคงด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastener) ในสมัยโบราณจะวางรางรถไฟลงบนหมอนไม้โดยตรงและใช้ตะปูราง (Dog Spike) ตอกยึดฐานรางไว้ อย่างไรก็ตาม การเดินขบวนรถไฟที่มีน้ำหนักมากและวิ่งด้วยความเร็วสูงในปัจจุบัน ทำให้การยึดรางกับไม้หมอนมีการพัฒนารูปแบบ มีอุปกรณ์ส่วนประกอบอื่นเพื่อช่วยให้การยึดรางกับไม้หมอนสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขนาดของรางรถไฟกำหนดเป็นน้ำหนักต่อหน่วยความยาวระบบเมตริกเช่น ที่ใช้ในมาตรฐาน UIC กำหนดเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ระบบมาตรฐานอังกฤษ (BS) กำหนดเป็นปอนด์ต่อหลา มาตรฐานของกิจการรถไฟทวีปยุโรป กำหนดขนาดของรางที่ใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูงไว้ที่ 60 กก./หลา รางรถไฟใหญ่ที่สุดของการรถไฟฯ ในปัจจุบันคือ ปอนด์/หลา ซึ่งอยู่ในทางรถไฟที่ยังสร้างใหม่และทางที่ได้ปรับปรุงขนาดหนักแล้ว แต่รางส่วนใหญ่ก็ยังเป็นขนาด 80 ปอนด์/หลา นอกจากนั้นยังมีทางประธาน (Mainline) ที่ใช้รางขนาด 70 ปอนด์/หลา ส่วนทางสายแยกรวมทั้งทางหลักที่ยังใช้รางขนาด 50 ปอนด์/หลา ก็ยังมีอยู่ รางรถไฟขนาดเล็กเป็นอุปสรรคต่อการวิ่งขบวนรถอยู่บ้าง การหลีกขบวนรถล่าช้าเพราะขบวนรถต้องวิ่งผ่านทางหลีกซ้ำมาก (15-30 กม./ชม.)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของรางรถไฟ (ซ้าย) และมาตรฐานรางแบบ UIC 60 (ขวา)

หน้าที่หลักของรางรถไฟคือ รับน้ำหนักของขบวนรถไฟ และบังคับทิศทางของขบวนรถไฟ สำหรับการรับน้ำหนักของขบวนรถไฟ จะใช้ค่าน้ำหนักกดเพลลา (Axle Load) และการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution) ในการบอกถึงความสามารถของรางรถไฟ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกกำหนดเป็นค่าตัวเลข และนำไปใช้เป็นข้อจำกัดในการออกแบบน้ำหนักเพลลาสูงสุดของขบวนรถไฟและการกระจายน้ำหนักของทั้งขบวนรถไฟไม่ให้เกินกำหนด ความกว้างของรางรถไฟ (Track Gauge) คือ ระยะห่างระหว่างหัวรางทั้งสองด้าน มีหลายแบบขึ้นอยู่กับขนาดและประเทศที่ใช้ดังนี้

ขนาดความกว้างมากกว่า	1600 มม.	เรียกว่า บอร์ดเกจ (Board Gauge)
ขนาดความกว้าง	1435 มม.	เรียกว่า สแตนดาร์ดเกจ (Standard Gauge)
ขนาดความกว้าง	1067 มม.	เรียกว่า แค็ปเกจ (Cape Gauge)
ขนาดความกว้าง	1050 มม.	เรียกว่า อราเบียนเกจ (Arabian Gauge)
ขนาดความกว้าง	1000 มม.	เรียกว่า มิเตอร์เกจ (Metre Gauge)

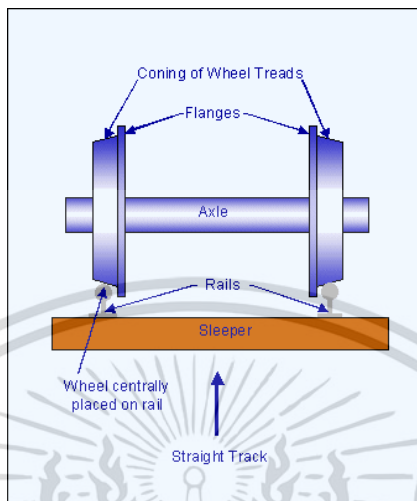


รูปที่ 2.2 ความกว้างของทางรถไฟ

### 2.1.1.2 ล้อรถไฟ (Wheel)

ล้อรถไฟได้พัฒนารูปแบบมาจนถึงปัจจุบันซึ่งเป็นล้อแบบมีบังใบ (Flange) อยู่ด้านในของหัวราง บังใบล้อจะเป็นตัวประคองให้ขบวนรถไฟวิ่งไปตามราง ระยะห่างระหว่างหัวรางด้านในเรียกว่า “เรลเกจ” (Rail Gauge) ส่วนจุดที่ล้อสัมผัสหัวรางเรียกว่า “เทรต” (Thread) เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อรถไฟจะวัดตรงจุดสัมผัสนี้โดยเรียกว่าเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ จุดสัมผัส (Diameter on Thread) ระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสด้านบนที่ล้อกดลงบนรางกับจุดสัมผัสด้านข้างของบังใบ เมื่อล้อรถไฟเคลื่อนที่ไปไกลสุดทางด้านข้าง เรียกว่าระยะสายตัวของล้อ (Wheel Flange Play) ระยะสายตัวจะสัมพันธ์กับไม่ว่าการฉีกใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลาดเอียงที่พื้นล้อและรูปร่างของหัวรางซึ่งเป็นตัวกำหนดความถี่การส่ายตัวแบบงูเลื้อย (Sine Wave) ของล้อพร้อมเพลลา มาตรฐานการออกแบบของการรถไฟฯ กำหนดระยะสายตัวออกด้านข้างของล้อไว้ข้างละ 6.75 มม.



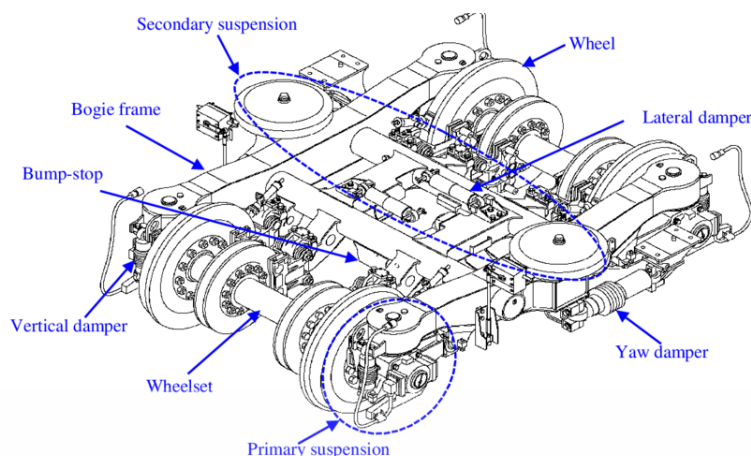
รูปที่ 2.3 ชุดล้อรถไฟพร้อมเพลลา

### 2.1.1.3 โบกี้ (Bogie)

โบกี้คือส่วนที่ประกอบกันเข้ากับล้อพร้อมเพลลาคู่หนึ่ง ทำหน้าที่รองรับตัวรถทั้งที่เป็นชนิดใช้ขับเคลื่อนและที่ใช้สำหรับบรรทุกผู้โดยสารหรือบรรทุกสินค้า เหตุผลที่รถไฟต้องมีโบกี้เนื่องจากพื้นล้อรถไฟที่ใช้งานโดยทั่วไปในปัจจุบันถูกออกแบบมาให้แบนราบเหมือนล้อรถทั่วไป โดยจะออกแบบให้เอียงทำมุมกับระนาบนอนเล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเร็วและทำให้เกิดการควบคุมการส่ายตัวที่จะช่วยลดแรงกระแทกระหว่างบังใบล้อกับหัวรางให้น้อยลง

ในการออกแบบโบกีนั้น วิศวกรจะพยายามลดการสั่นสะเทือนจากล้อให้ขึ้นมาถึงตัวรถน้อยลงโดยจัดให้มีอุปกรณ์รับน้ำหนักชุดแรก (Primary Suspension) อยู่ระหว่างเพลาล้อกับโบกี้ และอุปกรณ์รับน้ำหนักชุดที่สอง (Secondary Suspension) อยู่ระหว่างโบกี้กับตัวรถไฟ นอกจากออกแบบการรับน้ำหนักเป็นสองชั้นแล้ว ยังต้องติดตั้งโช้คอัพ (Shock Absorber) เพื่อระงับการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติให้จางหายไปโดยเร็ว ส่วนการออกแบบโบกี้สำหรับรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำก็อาจจะเป็นใช้ค้อพแบบง่าย ๆ เช่น รถสินค้า 4 ล้อ หรือรถโบกี้โดยสารในสมัยแรก ๆ ซึ่งใช้สปริงแบบเหล็กแผ่น (Leaf Spring) ไม่ติดตั้งโช้คอัพ อาศัยแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงเมื่อเกิดการสั่นในแนวตั้ง ช่วยระงับการสั่นสะเทือนไปพร้อมกับการทำหน้าที่เป็นระบบรับน้ำหนักชิ้นแรก รถเหล่านี้สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว 50-70 กม./ชม. เท่านั้น เพราะแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กมีค่าไม่แน่นอน ควบคุมการสั่นได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของโบกี้รถไฟ

## 2.2 ความเสียหายของล้อและรางรถไฟเนื่องจากการล่าจากการสัมผัสสักรั้ง

การล่าจากการสัมผัสสักรั้งจะเกิดขึ้นเมื่อล้อได้รับความเค้นสัมผัสซ้ำ ๆ โดยจะเกิดบริเวณผิวสัมผัสของพื้นล้อ ข้อมูลที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นรูปแบบของความเสียหายจากการล่าจากการสัมผัสสักรั้งระหว่างล้อและรางรถไฟ

### 2.2.1 ผิวรางหลุดล่อน (Shelling)

ผิวรางหลุดล่อนเป็นความเสียหายเนื่องจากการล่าภายใต้ผิวรางรถไฟ โดยทั่วไปมักเกิดลึกลงไปบริเวณหัวมุมของราง (Gauge Corner) ประมาณ 2-8 มม. ในระยะเริ่มแรก ผิวรางหลุดล่อนจะสามารถสังเกตเห็นได้จากจุดดำหลายจุดบนหัวมุมของรางซึ่งมักไม่ปรากฏให้เห็นโดยทั่วไป ผิวรางหลุดล่อนจะเกิดตามแนวยาวหรือขนานตามรูปร่างของรางรถไฟบนหัวมุมของราง รอยแตกนั้นจะมีการแพร่กระจายในทิศพุ่งลงทำมุม 10-30 องศากับผิวราง หลังจากนั้นจะแตกออกเป็นแผ่นหรือก่อให้เกิดความเสียหายที่แพร่กระจายต่อไปตามขวาง ถ้าไม่สามารถตรวจพบได้ทัน อาจส่งผลให้รางรถไฟแตกได้ ในรูปที่ 2.5 จะแสดงขั้นตอนของการเกิดผิวรางหลุดล่อนโดยแบ่งเป็นระยะ



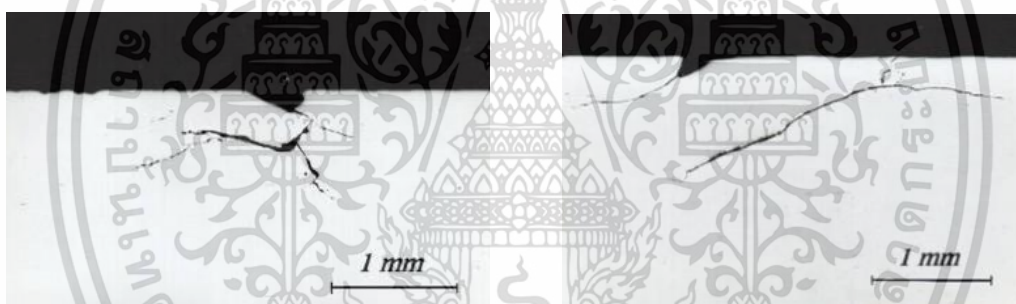
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



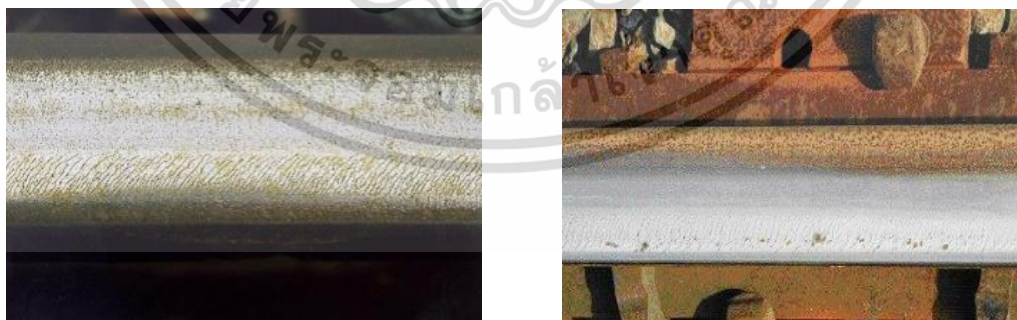
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดผิวงาหตุล่อน (ชั้นเริ่มต้น, ชั้นกลาง, ชั้นรุนแรง)

### 2.2.2 หัวมุมของรางแตก (Gauge Corner Cracks)

ความเสียหายชนิดนี้เกิดบนหัวมุมของรางในลักษณะของผิวหน้าที่แตกพุ่งลงด้านล่างลึกลงไป 2-5 มม. ทำมุม 10-30 องศากับผิวงาและแพร่กระจายอย่างรวดเร็วทั่วทั้งหัวราง หัวมุมของรางแตกมักสังเกตเห็นได้ง่ายในลักษณะคล้ายเกล็ดปลา รูปที่ 2.6 จะแสดงขั้นเริ่มต้นของการเกิดหัวมุมรางแตกส่วนรูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการเกิดหัวมุมรางแตกโดยแบ่งเป็นระยะ



รูปที่ 2.6 ขั้นเริ่มต้นของการเกิดหัวมุมรางแตก



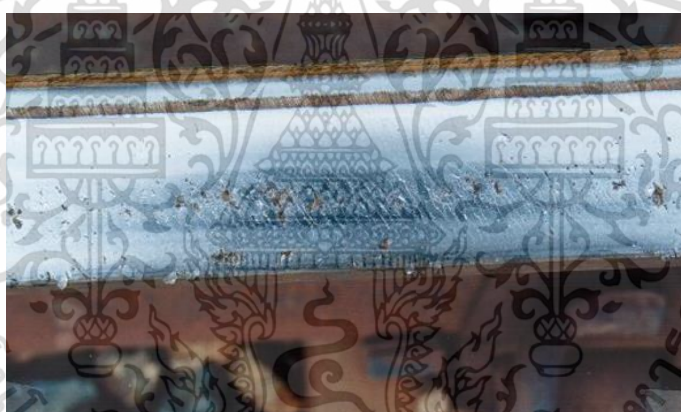
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการเกิดหัวมูมรางแตก (ชั้นเริ่มต้น, ชั้นกลาง, ชั้นรุนแรง)

### 2.2.3 ผิวรางแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ (Flaking)

ความเสียหายชนิดนี้เกิดบนผิวรางทั้งรางต่ำและรางสูง มักปรากฏเป็นรอยแตกชิ้นเล็ก ๆ ลักษณะคล้ายลายโมเสคหรือลายเกล็ดงูบนส่วนของหัวราง ในระยะสุดท้ายรอยแตกจะมีลักษณะคล้ายความเสียหายแบบผิวรางหลุดล่อนซึ่งมีขนาดกว้าง 10-15 มม. ลึก 3 มม. และสามารถแพร่กระจายได้ตลอดตามแนวยาวของรางรถไฟ ตัวอย่างของผิวรางแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ดูได้จากรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผิวรางแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

### 2.2.4 Squats

ตามหลักการแล้วความเสียหายแบบ Squats ถูกจัดให้อยู่ในความเสียหายเนื่องจากการล้าจากการสัมผัสสีกิ่ง อย่างไรก็ตาม Squats นั้นเกิดจากหัวมูมของรางแตกได้ด้วย โดยทั่วไป Squats เป็นความเสียหายที่เกิดบริเวณผิวหรือใกล้ผิวหน้าของหัวราง Squats แท้จริงแล้วเกิดจาก White etching ซึ่งเป็นชั้นที่แข็งและเปราะที่พบได้ทั่วไปบนรางรถไฟ

Squats ที่เกิดจากหัวมูมของรางแตกแสดงในรูปที่ 2.9 รอยแตกเหล่านั้นจะค่อย ๆ โตและแพร่กระจายไปสู่ผิวบนของหัวรางและในระยะสุดท้ายของการตจะมีลักษณะเหมือนกับความเสียหายที่เกิดบริเวณผิวของหัวราง Squats ทั้ง 2 แบบสามารถเกิดแยกกันหรือเกิดใกล้กันกลายเป็นความเสียหายที่มาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้น Squats นั้นง่ายที่จะแยกแยะได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจากมักปรากฏเป็นจุดดำบนผิวราง พื้นที่ที่เกิดความเสียหายจาก Squats จะเห็นเป็นสีดำชัดเจนเป็นผลมาจากการที่รอยแตกมีขนาด 3-5 มม. ลึกลงไปในหัวรางตามแนวขวางและก่อให้เกิดรอยบวมขึ้นบนผิวราง

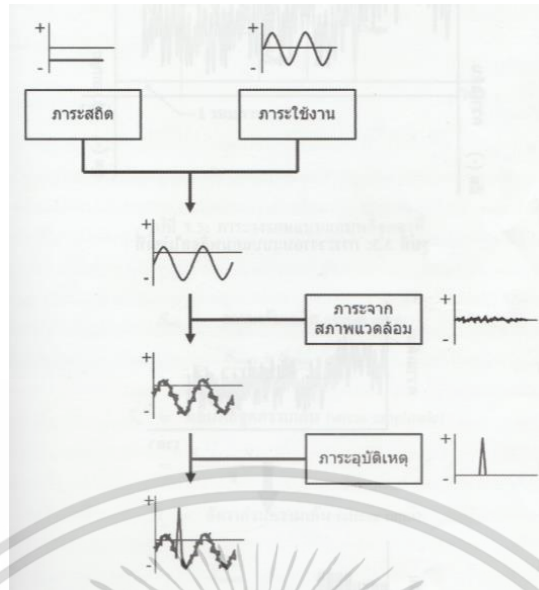


รูปที่ 2.9 Squats ที่เกิดจากหัวมุมของรางแตก

### 2.3 ภาวะแบบวงรอบ (Cyclic Stress)

ภาวะเชิงกลต่าง ๆ ที่กระทำต่อชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ โดยภาวะเหล่านี้รวมกันทำให้เกิดภาวะแบบวงรอบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางตามเวลา ภาวะที่เกิดขึ้นชิ้นส่วนทางวิศวกรรมเหล่านี้แบ่งได้เป็น 4 ประเภทได้แก่ ภาวะสถิต (Static Load) คือ ภาวะที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเสมอ เช่น น้ำหนักของรถยนต์ ภาวะใช้งาน (Working Load) คือ ภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ใช้งาน เช่น ภาวะที่เกิดขึ้นในเพลลาขับของรถยนต์ ภาวะจากสภาพแวดล้อม (Environmental Load) คือ ภาวะที่เกิดจากสภาพแวดล้อม เช่น สภาพถนนที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่อระบบช่วงล่างรถยนต์ และภาวะที่เกิดโดยบังเอิญ (Accidental Load) คือ ภาวะที่เกิดจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ทันใด เช่น รถชน โดยความสัมพันธ์ระหว่างภาวะที่เกิดขึ้นชิ้นส่วนทางวิศวกรรมแต่ละประเภท และการรวมกันจนกระทั่งเป็นภาวะแบบวงรอบที่ก่อให้เกิดการล้า แสดงดังรูปที่ 2.1

ภาวะแบบวงรอบที่ก่อให้เกิดการล้าในชิ้นส่วนทางวิศวกรรม อาจเป็นภาวะแบบแอมพลิจูดไม่คงที่ ซึ่งแต่ละรอบของภาวะที่กระทำมีขนาดไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าหิรัญระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นแตกต่างกันในแต่ละรอบของภาวะและซับซ้อนในการทำนายอายุการล้า ในกรณีเช่นนี้หลักทางสถิติจึงเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง โดยการจัดกลุ่มภาวะวงรอบที่มีแอมพลิจูดใกล้เคียงกันไว้ด้วยกัน ทำให้ภาวะแบบแอมพลิจูดไม่คงที่สามารถแสดงอยู่ในระบบของภาวะแบบแอมพลิจูดคงที่ได้ การทำนายการล้าจึงทำได้สะดวก



รูปที่ 2.10 ภาระที่เกิดกับชิ้นส่วนทางวิศวกรรม

ภาระแบบแอมพลิจูดคงที่สามารถแสดงได้ด้วยค่าทางคณิตศาสตร์ดังนี้

2.3.1 ความเค้นเฉลี่ย (Mean stress)  $S_m$  เป็นค่าเฉลี่ยของความเค้นสูงสุดและต่ำสุด

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $S_m$  คือ ความเค้นเฉลี่ย

$S_{\max}$  คือ ความเค้นสูงสุด

$S_{\min}$  คือ ความเค้นต่ำสุด

2.3.2 ช่วงกว้างความเค้น (Range of stress)  $S_r$  เป็นค่าความแตกต่างระหว่าง  $S_{\max}$  และ  $S_{\min}$

$$S_r = S_{\max} - S_{\min} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $S_r$  คือ ช่วงกว้างความเค้น

2.3.3 แอมพลิจูดของความเค้น (Stress amplitude)  $S_a$  มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเค้นที่กระทำซ้ำใน 1 รอบ

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (2.3)$$

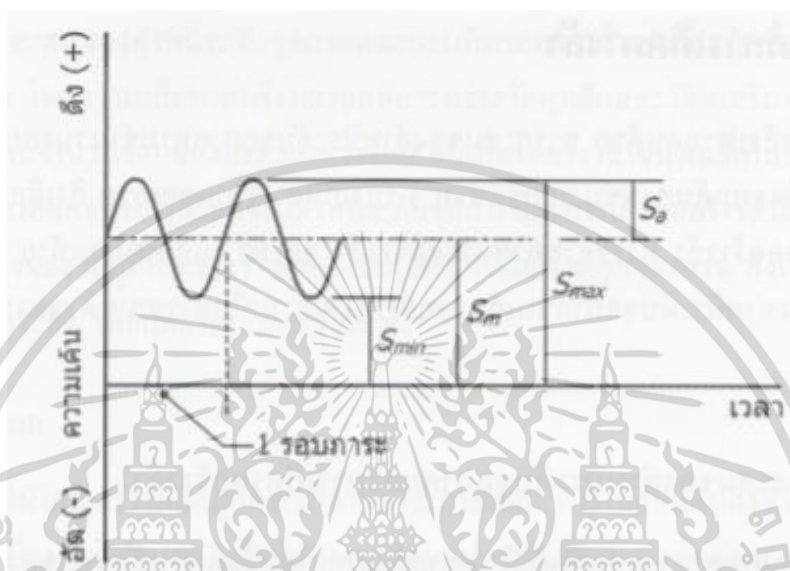
เมื่อ  $S_a$  คือ ขนาดความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 สัดส่วนความเค้น (Stress ratio)  $R$  เป็นสัดส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดกับสูงสุด

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $R$  คือ สัดส่วนความเค้น



รูปที่ 2.11 ภาระวงรอบแบบแอมพลิจูดคงที่

## 2.4 พฤติกรรมของการล้า

เมื่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรมถูกใช้งานภายใต้ภาระแบบวงรอบ ซึ่งส่งผลให้เกิดความเค้นแบบวงรอบที่จุดวิกฤติและนำไปสู่ความเสียหายจากการล้าในที่สุด ความเค้นแบบวงรอบนี้อาจมีค่าน้อยกว่าความเค้นครากหรือความเค้นดึงสูงสุดของวัสดุ พฤติกรรมการล้าหรือความสัมพันธ์ระหว่างภาระแบบวงรอบหรือจำนวนภาระแบบวงรอบ การสะสมของตำหนิ การเกิดและการขยายตัวของรอยร้าวล้า และความเสียหายสุดท้าย เป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่สามารถใช้ในการออกแบบใช้งาน และประเมินความปลอดภัยของชิ้นส่วนได้

พฤติกรรมการล้าของวัสดุนิยมพิจารณาในงานวิศวกรรมได้แก่ จำนวนรอบของภาระที่กระทำจนเกิดความเสียหายสุดท้ายหรืออายุการล้า (Fatigue Life) อายุของการล้าบ่งบอกถึงระยะเวลาหรือจำนวนของภาระที่สามารถใช้งานชิ้นส่วนทางวิศวกรรมภายใต้เงื่อนไขการล้าใดเงื่อนไขหนึ่งอย่างปลอดภัยความเสี่ยงที่จะเกิดการล้าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของภาระที่ใช้งานเข้าใกล้อายุการล้า

ในขณะที่อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการล้าอีกรูปแบบหนึ่งที่พิจารณา การเพิ่มความยาวรอยร้าวล้าต่อหนึ่งรอบภาระ โดยอาศัยค่ากลศาสตร์การแตกหัก แสดงความรุนแรงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลายรอยร้าวขึ้นส่วนทางวิศวกรรมเกิดความเสียหายสุดท้ายทันทีเมื่อรอยร้าวล้ามีขนาดเป็นขนาดวิกฤติของรอยร้าวล้า ซึ่งทำให้เกิดค่ากลศาสตร์การแตกหักวิกฤติปลายรอยร้าวล้า แต่ถ้ารอยร้าวล้ามีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤติ รอยร้าวจะขยายตัวช้า ๆ โดยจำนวนรอบภาระที่ขึ้นส่วนสามารถรับได้ก่อนขนาดของรอยร้าวล้าเป็นขนาดวิกฤติสามารถประมาณได้จากอัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้า การใช้อัตราการขยายตัวของรอยร้าวล้าในการอธิบายพฤติกรรมของการล้าต้องคำนึงถึงขนาดของรอยร้าวจริง แตกต่างจากอายุการล้าที่คำนึงพฤติกรรมโดยรวมรายละเอียดของอายุการล้าและอัตราการขยายตัวของรอยร้าวแสดงได้ดังนี้

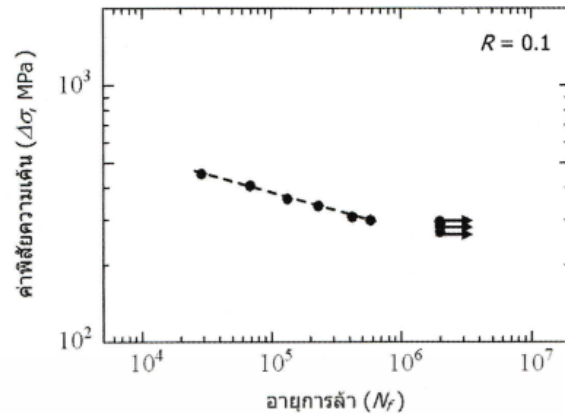
## 2.4.1 อายุการล้า (Fatigue Life)

### 2.4.1.1 การล้าแบบจำนวนรอบสูง (High Cycle Fatigue)

การเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการล้าเมื่อลดขนาดของภาระวงรอบที่มากกระทำ สามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างภาระแบบวงรอบกับอายุการล้า (S-N curve) เนื่องจากการลดลงของขนาดของภาระวงรอบเพียงเล็กน้อยส่งผลทำให้อายุการล้าเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างภาระแบบวงรอบกับอายุการล้าจึงนิยมแสดงกราฟแบบล็อก-ล็อก ถ้าภาระแบบวงรอบที่มากกระทำมีขนาดความเค้นต่ำกว่าความเค้นคราก การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบวงรอบที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ อิลาสติก ส่งผลให้อายุการล้ามีค่าสูงกว่า  $10^4$  ซึ่งเรียกรูปการล้ากรณีเช่นนี้ว่าการล้าแบบจำนวนรอบสูง และแสดงภาระแบบวงรอบด้วยความเค้นแบบวงรอบ (Cycle stress)

เมื่อลดขนาดของความเค้นแบบวงรอบที่มากกระทำลงมาเรื่อย ๆ พบว่าอายุการล้ามีขนาดสูงมาก โดยขนาดของความเค้นวงรอบที่มากกระทำส่งผลทำให้เกิดอายุการล้าที่มากจนไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดการล้า ระดับความเค้นวงรอบนี้เรียกว่า ชีตจำกัดการล้า (Fatigue limit หรือ Endurance limit) ในวัสดุทางวิศวกรรมที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแบบวงรอบกับอายุการล้าจะขนานกับแกนนอนเมื่ออายุการล้าสูงกว่า  $10^6 - 10^7$  รอบ ซึ่งภาระแบบวงรอบที่ทำให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ถูกกำหนดให้เป็นชีตจำกัดการล้า ในขณะที่วัสดุทางวิศวกรรมประเภทอื่น ๆ อายุการล้าจะลดลงตามขนาดของความเค้นวงรอบที่มากกระทำ โดยอายุการล้าที่ใช้ในกำหนดชีตจำกัดการล้ามีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^6 - 10^7$  รอบ หรือขึ้นอยู่กับลักษณะของงานทางวิศวกรรม เช่น ชีตจำกัดการล้าของถังความดันซึ่งรับภาระแบบวงรอบจำนวนไม่มากนักตลอดอายุการใช้งาน อาจพิจารณาที่อายุการล้าประมาณ  $10^6$  รอบ ในขณะที่ชีตจำกัดการล้าของเพลาส่งกำลังซึ่งรับภาระแบบวงรอบจำนวนมากตลอดการใช้งาน อาจพิจารณาที่อายุการล้าประมาณ  $10^6$  รอบ ในขณะที่ชีตจำกัดการล้าของเพลาส่งกำลังส่งรับภาระแบบวงรอบจำนวนมากตลอดการใช้งาน อาจพิจารณาที่อายุการล้าประมาณ  $10^7$  รอบ โดยการใช้งานขึ้นส่วนทางวิศวกรรมภายใต้ความเค้นแบบวงรอบที่ต่ำกว่าชีตจำกัดการล้ามีความปลอดภัยจากการล้าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

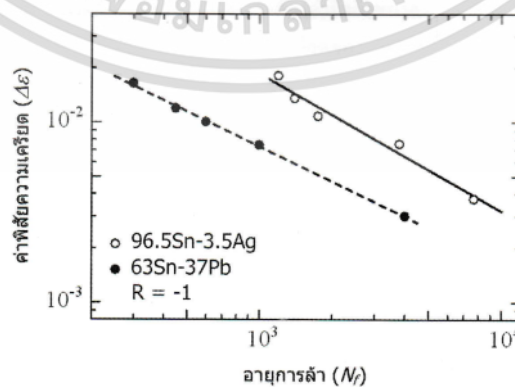


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยความเค้นกับอายุการล้าแบบจำนวนรอบสูงของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L (ลูกศรแสดงขีดจำกัดการล้า)

ถ้าต้องการใช้ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมมีความปลอดภัยจากการล้าวิศวกรจำเป็นต้อง ออกแบบชิ้นส่วนให้ได้รับความเค้นต่ำกว่าขีดจำกัดการล้า นั่นทำให้ชิ้นส่วนมีขนาดใหญ่และค่าใช้จ่ายสูง ถ้าต้องการออกแบบให้ปลอดภัยจากการล้า จะต้องออกแบบให้รับภาระสูงกว่าขีดจำกัดการล้าได้ โดย ความเค้นแบบวงรอบที่ทำให้เกิดความเสียหายสุดท้ายจากการล้าที่จำนวนรอบใด ๆ เรียกว่า ความแข็งแรงการ ล้า (Fatigue strength)

#### 2.4.1.2 การล้าแบบจำนวนรอบต่ำ (Low Cycle Fatigue)

ถ้าภาระแบบวงรอบที่มากกระทำมีขนาดสูงกว่าความเค้นคราก การเปลี่ยนแปลงขนาด แบบวงรอบที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก ส่งผลให้อายุการล้าต่ำกว่า  $10^4$  รอบ ซึ่ง เรียกกรณีล้าในกรณีเช่นนี้ว่า การล้าแบบจำนวนรอบต่ำ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก การ เพิ่มขึ้นของความเค้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ความเครียดเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นภาระแบบวงรอบที่ทำให้เกิดการ ล้าแบบจำนวนรอบต่ำแสดงด้วยความเครียดแบบวงรอบ (Cyclic strain)



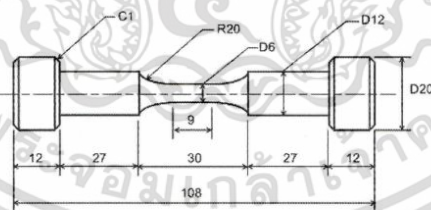
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยความเครียดกับอายุการล้าแบบจำนวนรอบต่ำของโลหะเชื่อม

แบบมีตะกั่ว (63Sn-37Pb) และไม่มีตะกั่ว (96.5Sn-37Pb) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพิธีการขอใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

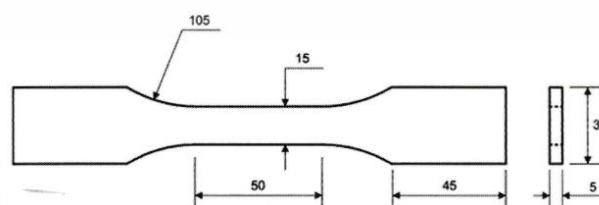
## 2.5 การทดสอบการล้า (Fatigue Test)

การทดสอบการล้าเป็นการตรวจวัดอายุการล้าหรืออัตราการขยายตัวของรอยร้าวของชิ้นทดสอบเมื่อมีภาระแบบวงรอบมากระทำในระดับต่าง ๆ โดยนำเสนออยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างภาระแบบวงรอบกับอายุการล้า หรือความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นกับอัตราการขยายของรอยร้าวล้า เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดลองถูกต้อง สามารถใช้เปรียบเทียบผลการทดลองอื่น และนำไปใช้ในทางวิศวกรรมได้จริง การทดสอบการล้าจึงควรทำตามมาตรฐานการทดสอบ ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบการล้า ที่กำหนดโดยหน่วยงานในประเทศไทย ดังนั้นการทดสอบการล้าจึงนิยมอ้างอิงจากมาตรฐานของ International Organization for Standardization (ISO) เป็นต้น

มาตรฐาน ASTM E466 Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials ได้แนะนำการทดสอบการล้าด้วยวิธีควบคุมแรงตามแนวแกนของวัสดุประเภทโลหะ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมในการใช้ศึกษาการล้าแบบจำนวนรอบสูง โดยใช้ชิ้นทดสอบการล้าที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม (Circular cross section) หรือ หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม (Rectangular cross section) เครื่องมือทดสอบการล้าต้องสามารถสร้างภาระแบบวงรอบที่มีความถี่ตั้งแต่  $10^{-2}$  ถึง  $10^2$  เฮิร์ตซ์ และมีอุปกรณ์วัดแรง (Load cell) ที่สามารถวัดแรงได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบให้คงที่ตลอดการทดสอบ เครื่องทดสอบการล้านิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ เครื่องทดสอบการล้าแบบเซอร์โวไฮดรอลิก (Servo-hydraulic Fatigue Machine) โดยอุปกรณ์วัดแรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบ ส่งสัญญาณของแรงไปยังชุดควบคุมซึ่งจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณแรงที่ได้รับกับรูปแบบของแรงที่ต้องการและควบคุมลิ้นไฮดรอลิกให้จ่ายแรงคืนเพื่อสร้างแรงให้ได้ตามที่ต้องการ โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบการล้า



ชิ้นทดสอบการล้าแบบหน้าตัดวงกลม



ชิ้นทดสอบการล้าแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.14 ชิ้นทดสอบการล้าหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทฤษฎีการออกแบบชิ้นทดสอบ (Specimen Design)

### 2.6.1 ปัจจัยในการออกแบบชิ้นทดสอบ

การเลือกชนิดของชิ้นทดสอบที่ใช้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น จุดประสงค์ของการทดสอบ, ชนิดของอุปกรณ์, ความสามารถที่อุปกรณ์สามารถทำได้และวัสดุที่นำมาใช้ทำที่สามารถหาซื้อได้ อย่างไรก็ตามหัวข้อที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ เป็นข้อกำหนดการออกแบบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E466 Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials

#### 2.6.1.1 จุดที่ความเสียหายเกิดขึ้น

การออกแบบชิ้นทดสอบควรให้ความเสียหายเกิดขึ้นบริเวณจุดที่ทำการทดสอบ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ใช้ทดสอบกับพื้นที่ที่ใช้จับชิ้นงานควรออกแบบให้มีความสมเหตุสมผลเพื่อให้มั่นใจว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้จับชิ้นงาน ชิ้นงานแบบมีเกลียวตรงปลายนั้นยากที่จะวางแผนและความเสียหายมักเริ่มเกิดที่บริเวณความเข้มของความเค้นเมื่อทำการทดสอบหาอายุการใช้งานของชิ้นทดสอบ ขนาดของส่วนที่จับชิ้นทดสอบมีผลต่อระยะเกลจและขนาดของรัศมีส่วนโค้งร่วม (ส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนทดสอบและส่วนจับชิ้นทดสอบ) อาจก่อให้เกิดความเสียหายก่อนกำหนดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการลู่ครูดบริเวณส่วนที่จับชิ้นทดสอบหรือถ้าขนาดของรัศมีส่วนโค้งร่วมมีขนาดเล็กเกินไป

#### 2.6.1.2 ระยะเผื่อ

ระยะเผื่อที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาค่าความเครียดที่ใส่ลงไปบนชิ้นทดสอบ ให้ใช้ระยะเผื่อใกล้เคียง 0.001 นิ้ว (0.03 มม.) สำหรับขนาดความกว้างของชิ้นทดสอบมากกว่า 0.20 นิ้ว (5.08 มม.) และระยะเผื่อใกล้เคียง 0.0005 นิ้ว (0.0013 มม.) สำหรับขนาดความกว้างของชิ้นทดสอบน้อยกว่า 0.2 นิ้ว (5.08 มม.)

### 2.6.2 การเลือกขนาดและชนิดของชิ้นทดสอบ

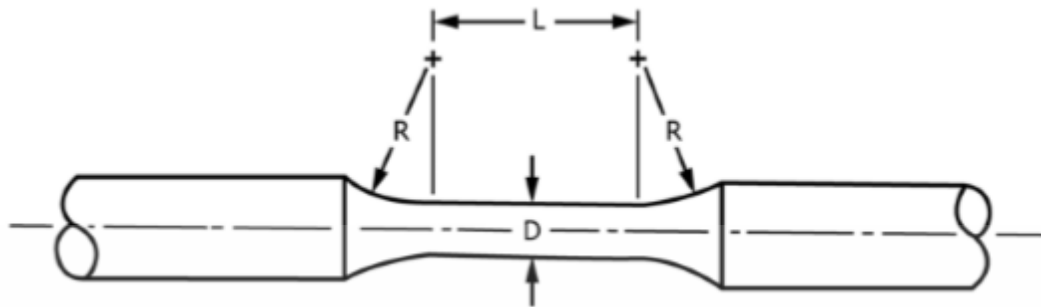
ชิ้นทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดลองมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานดังนี้

2.6.2.1 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งร่วมระหว่างส่วนทดสอบกับปลายจับ (Specimens with tangentially blended fillets between the test section and the ends) หลักการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 นิ้ว (5.08 มม.) ถึง 1.00 นิ้ว (25.4 มม.) เพื่อรับประกันความเสียหายที่เกิดบริเวณส่วนทดสอบ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ใช้ยึดจับชิ้นงานควรมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดบริเวณส่วนทดสอบอย่างน้อย 1.5 เท่า แต่สำหรับวัสดุและชิ้นทดสอบทั่วไปควรมีขนาดใหญ่กว่าอย่างน้อย 4 เท่า รัศมีส่วนโค้งร่วมควรมีขนาดใหญ่อย่างน้อย 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบเพื่อลดค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress concentration factor) ของชิ้นทดสอบตามทฤษฎี ความยาวของส่วนทดสอบควรมีขนาดประมาณ 2-3 เท่าของเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบ สำหรับการทดสอบภายใต้แรงกด ความยาวของส่วนทดสอบควรมีขนาดประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบ



รูปที่ 2.15 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งร่วมระหว่างส่วนทดสอบกับปลายจับ

2.6.2.2 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งต่อเนื่องระหว่างปลายจับ (Specimens with a continuous radius between ends) หลักการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 นิ้ว (5.08 มม.) ถึง 1.00 นิ้ว (25.4 มม.) เพื่อรับประกันความเสียหายที่เกิดบริเวณส่วนทดสอบ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ใช้ยึดจับชิ้นงานควรมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดบริเวณส่วนทดสอบอย่างน้อย 1.5 เท่า แต่สำหรับวัสดุและชิ้นทดสอบทั่วไปควรมีขนาดใหญ่กว่าอย่างน้อย 4 เท่า รัศมีส่วนโค้งควรมีขนาดใหญ่อย่างน้อย 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนทดสอบเพื่อลดค่าตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration factor) ของชิ้นทดสอบตามทฤษฎี ความยาวของส่วนโค้งควรมีขนาดเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด



รูปที่ 2.16 ชิ้นทดสอบแบบมีส่วนโค้งต่อเนื่องระหว่างปลายจับ

### 2.6.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ

1. เงื่อนไขการทดสอบและวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง วิธีการเตรียมชิ้นทดสอบที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ วิธีเตรียมชิ้นทดสอบนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควรเป็นวิธีที่ทั้งผู้ผลิตและผู้นำชิ้นทดสอบไปใช้เห็นพ้องต้องกันก่อนเริ่มทำการทดลอง เนื่องจากการเตรียมชิ้นทดสอบมีผลต่อข้อมูลผลการทดสอบความเสียหาย ส่งผลต่อการนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้งานจริง

2. เมื่อเทคนิคและขั้นตอนได้ถูกเลือกและนำไปใช้สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแล้ว ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับชิ้นทดสอบเช่น กลึง, ชัด, ขุด ฯลฯ หากมีความจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงบนชิ้นทดสอบควรทำขนานตามแนวแกนกับชิ้นทดสอบและมีรายละเอียดขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอธิบายไว้อย่างชัดเจน

3. การเปลี่ยนแปลงบนชิ้นทดสอบที่ควรหลีกเลี่ยงคือ การเชื่อมที่ทำให้เกิดรอยแหงนขอบแนว (Fillet Undercutting) และความเค้นตกค้าง (Residual Stresses) รอยแหงนขอบแนวสามารถตรวจพบได้จากการมองด้วยตาเปล่า ส่วนความเค้นตกค้างสามารถลดได้จากการควบคุมการ Machining ให้มีประสิทธิภาพ ความเค้นตกค้างยังสามารถตรวจสอบได้จากการฉายรังสี X-ray ลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ

4. การจัดเก็บชิ้นทดสอบ - ชิ้นทดสอบที่มีการกัดกร่อนหากเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องควรมีการจัดเก็บไว้อย่างมิดชิดไว้ในสารที่ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา เมื่อนำมาใช้ให้ล้างออกด้วยสารทำละลายที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของชิ้นทดสอบ

5. การตรวจสอบ - ชิ้นทดสอบทุกชิ้นควรได้รับการตรวจสอบด้วยตาเปล่าหรือใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำไปจนถึงกำลังขยาย 20 เท่า ความผิดปกติเช่น รอยแตก, รอยบาก, รอยแหงนขอบแนว ฯลฯ ไม่ควรพบบนชิ้นทดสอบ ชิ้นสอบควรมีการทำความสะอาดด้วยสารทำละลายที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดสอบเพื่อกำจัดคราบน้ำมัน, สิ่งแปลกปลอม, รอยนิ้วมือ ฯลฯ ทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

## 2.7 ทฤษฎีความเสียหาย (Failure Theories)

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการหลุดตัว การบิดเบือนรูปร่างอย่างถาวร การเกิดรอยร้าว และการแตกหัก คือความเสียหายซึ่งทำให้เครื่องจักรกลไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ เครื่องมือสำหรับทดสอบเครื่องจักรกลเพิ่งจะเริ่มในปี 1970 และมีการนำชิ้นงานทดสอบมาติดตั้ง และบิดพร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลผลการทดลอง เพื่อศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับความเครียดในชิ้นงาน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุและสร้างเป็นทฤษฎีความยืดหยุ่นของวัสดุ

ถ้าความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรเป็นความเสียหายอย่างง่าย การทดสอบอย่างง่ายก็จะสามารถบอกข้อเท็จจริงของความเสียหายได้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีทฤษฎีความเสียหายสากลที่ใช้ได้กับวัสดุโดยทั่วไป สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในสภาวะความเค้นต่าง ๆ แต่มีการตั้งสมมติฐานโดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

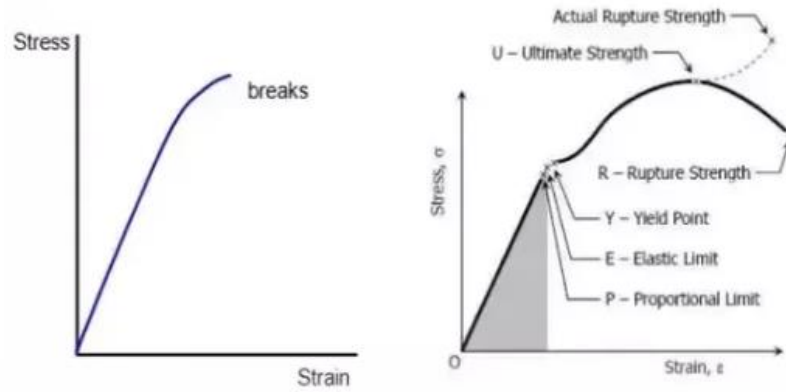
พิจารณาโครงสร้างของวัสดุ และมีการจำแนกวัสดุตามพฤติกรรมความยืดหยุ่นออกเป็นวัสดุเหนียว วัสดุเปราะ และวัสดุเหนียวเสียหายในรูปแบบความเปราะ

วัสดุมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อวัสดุนั้นมีการกลับคืนรูปทรง หรือมีความยาวเท่ากับความยาวเริ่มต้น เมื่อแรงที่กระทำต่อวัสดุตัวอย่างถูกเคลื่อนย้ายออกไปแล้ว พฤติกรรมความยืดหยุ่นนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่ความเค้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด หรือพูดได้ว่าวัสดุจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) ถ้าความเค้นมีมากเกินขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional limit) วัสดุจะยังคงมีการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น แต่จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเครียดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มความเค้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อนำแรงภายนอกออกแล้ววัสดุตัวอย่างจะกลับมามีขนาดตามเดิม

การเพิ่มความเค้นขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย จะทำให้ขีดจำกัดของความยืดหยุ่นมีค่าต่ำลงและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พฤติกรรมนี้เรียกว่า “การคราก (Yielding)” ความเค้นที่ก่อให้เกิดการครากนี้เรียกว่า “ความเค้นคราก หรือจุดคราก (Yield stress or Yield point) ความเค้น ณ จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบทั่วไป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic deformation) สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึง (Ultimate stress)

วัสดุใด ๆ ที่ถูกแรงกระทำแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามาก ๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่า “วัสดุเหนียว” เช่น เหล็กเหนียว (Mild steel) โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบเนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงาน หรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันได้ และถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงมากเกินไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหัก วัสดุเหนียวจะมีค่า  $\epsilon_f \geq 0.05$  และมีค่าความต้านทานแรงครากอย่างชัดเจน ซึ่งมักจะมีค่าเดียวกันสำหรับการดึงและการอัด  $S_{yt} = S_{yc} = S_y$

สำหรับวัสดุที่มีจุดครากต่ำมาก หรือไม่มีจุดครากก่อนเกิดการแตกหักและ  $\epsilon_f \geq 0.05$  จะเรียกว่า “วัสดุเปราะ” เช่น อลูมิเนียม โดยมาก  $\sigma - \epsilon$  diagram จะแสดงเป็นรูปโค้งที่ไม่มีจุดครากที่แน่ชัด ดังนั้นจึงนิยามความต้านคราก (Yield strength) จากวิธีกราฟฟิกที่เรียกว่า Offset method โดยเลือกใช้จุดที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.2 % (0.002) และวัดจากจุดนี้ที่อยู่บนแกน  $\epsilon$  แล้วลากเส้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงไปจนตัดกับส่วนโค้งของกราฟ ก็จะได้ความเค้นที่เป็นความต้านแรงคราก



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงค่าความเครียดและความเค้นของวัสดุเหนียว (ซ้าย) และวัสดุเปราะ (ขวา)

เมื่อชิ้นงานที่ออกแบบไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ เราเรียกว่า เกิดความเสียหายต้องทำการซ่อมแซมหรือทิ้งไป คำว่าเสียหายในที่นี้มีความหมายกว้างมาก เช่น ชิ้นงานอาจจะได้รับแรงมากจนเกินไปจนเกิดการครากขึ้น การเกิดรอยร้าวหรือรอยแตกหัก เกิดการโค้งงอมากกว่าปกติจนเสียรูป หรือเกิดการล้าจนหักพังในที่สุดสภาพการใช้งานที่ไม่ตรงเงื่อนไขในการออกแบบ เช่น ลักษณะและขนาดของแรงที่กระทำ ลักษณะผิวของชิ้นงาน หรือสภาพแวดล้อมในการใช้งานที่แตกต่างไปจากเงื่อนไขในการออกแบบ อาจเป็นสาเหตุของความเสียหายเหล่านี้ อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้วัสดุต่าง ๆ วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องระมัดระวังเลือกวัสดุส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมเป็นเหล็กเปราะมีคาร์บอนผสมอยู่สูง และจะมีพฤติกรรมเป็นเหล็กเหนียวเมื่อมีปริมาณคาร์บอนน้อยลงนอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุจะแข็งแต่เปราะง่าย ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุจะมีสภาพอ่อนตัวแต่เหนียวขึ้น และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เช่น แรง ความดัน อายุการใช้งาน อุณหภูมิการใช้งาน และอื่น ๆ ให้มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วัสดุต่าง ๆ ในอัตราส่วนของค่าสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถรองรับได้ ต่อค่าที่ใช้ในการออกแบบนี้ เรียกว่า แฟกเตอร์ในการออกแบบ หรือค่าความปลอดภัย ใช้สัญลักษณ์  $n$  สำหรับการออกแบบที่ใช้ความเค้นเป็นหลัก

$$\text{ค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{ความเค้นสูงสุดที่ชิ้นงานจะรองรับได้}}{\text{ความเค้นที่ยอมรับได้ในการใช้งาน}} \quad \text{หรือ} \quad n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

มีวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ออกแบบซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

### 2.7.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับวัสดุเหนียว

ทฤษฎีนี้ได้ถูกนำเสนอโดย เฮนรี เทสคา (Henri Tresca) ในปี ค.ศ. 1868 ซึ่งเกิดจากการสังเกตว่า วัสดุเหนียวจะเกิดการคราก เนื่องจากผลของการเลื่อน หรือเฉือนในระนาบของผลึกโดยทฤษฎีนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวว่า “วัสดุจะเริ่มคราก เมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดขณะที่เริ่มครากของชิ้นทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย”

สำหรับการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย  $\sigma = \frac{P}{A}$  ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทำมุม

$45^\circ$  กับระนาบของแนวตั้ง โดยมีขนาด  $\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}$  ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจึงมีค่า

$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2}$  สำหรับสถานะความเค้นใน 3 มิติ ความเค้นหลักในแต่ละระนาบจะมีขนาดเรียงตามลำดับ คือ

$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  นั่นคือ ความเค้น ความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  ดังนั้น สำหรับ

สถานะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \text{ เมื่อ } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (2.5)$$

หรือ

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y \quad (2.6)$$

ให้สังเกตสมการแรงเฉือนจะมีค่าดังนี้

$$S_{xy} = 0.5S_y \quad (2.7)$$

วัตถุประสงค์ในการออกแบบ เราสามารถปรับปรุงสมการด้านบน ให้มีค่าแฟกเตอร์ในการออกแบบรวมอยู่ด้วย คือ

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{S_y}{n} \quad (2.8)$$

สำหรับปัญหาความเค้นในระนาบสามารถวิเคราะห์ได้ง่าย โดยกำหนดให้ความเค้นหลักในระนาบใดระนาบหนึ่งมีค่าเท่ากับ ศูนย์ และหาความเค้นที่เหลือ  $\sigma_a$  และ  $\sigma_b$  จากสมการ

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.9)$$

โดย  $\sigma_A \geq \sigma_B$  ดังนั้น สำหรับความเค้นใน 3 มิติ การใช้สมการ (2.5) ในการพิจารณาความเค้นในระนาบจึงมี 3 กรณีที่ต้องพิจารณา

กรณีที่ 1 :  $\sigma_A \geq \sigma_B \geq 0$  สำหรับกรณีนี้  $\sigma_1 = \sigma_A$  และ  $\sigma_3 = 0$  ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (2.5) จึงเป็น

$$\sigma_A = S_y \quad (2.10)$$

กรณีที่ 2 :  $\sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B$  สำหรับกรณีนี้  $\sigma_1 = \sigma_A$  และ  $\sigma_3 = \sigma_B$  ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (2.5) จึงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

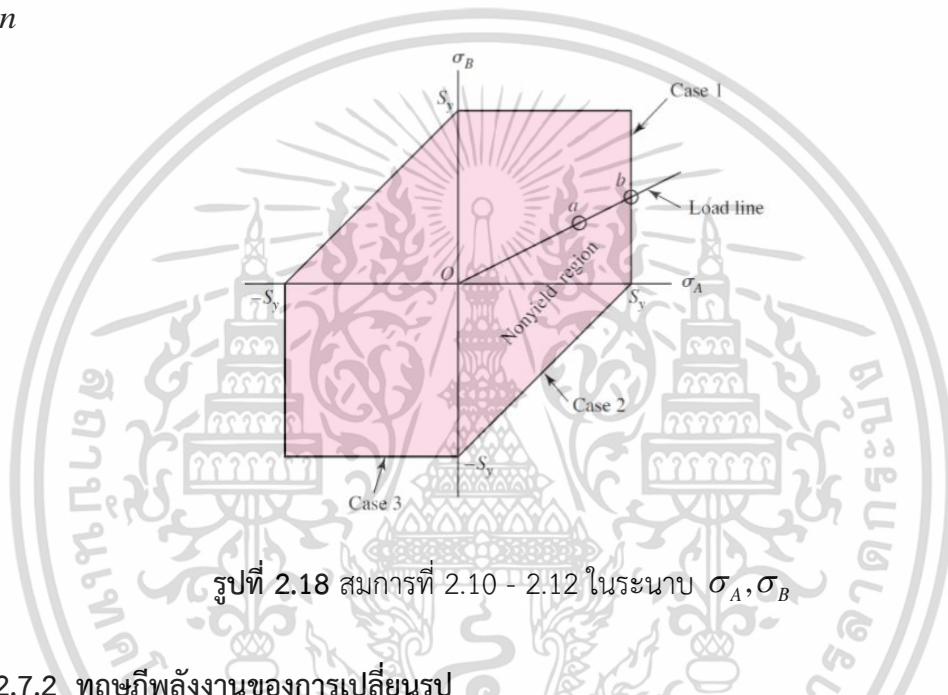
$$\sigma_A - \sigma_B = S_y \quad (2.11)$$

กรณีที่ 3 :  $0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B$  สำหรับกรณีที่  $\sigma_1 = 0$  และ  $\sigma_3 = \sigma_B$  ดังนั้นเงื่อนไขของสมการที่ (2.5) จึงเป็น

$$\sigma_A = -S_y \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.10) ถึง (2.12) แสดงให้เห็นโดยเส้น 3 เส้นในระนาบ  $\sigma_A, \sigma_B$  ตามรูปที่ 2.18 สำหรับเส้นที่เหลือซึ่งไม่มีเครื่องหมายแสดงไว้เป็นกรณีที่  $\sigma_B \geq \sigma_A$  ซึ่งจะไม่นำไปใช้ตามปกติ ส่วนการเปลี่ยนแปลงสมการที่ (2.10) ถึง (2.12) ให้เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบ แค่เพียงแทนค่า  $S_y$

ด้วย  $\frac{S_y}{n}$

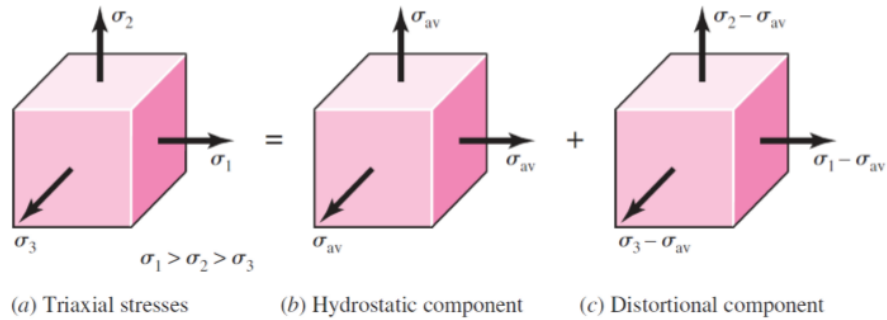


รูปที่ 2.18 สมการที่ 2.10 - 2.12 ในระนาบ  $\sigma_A, \sigma_B$

### 2.7.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป ( Distortion – Energy Theory ) นี้เกิดจากการสังเกตพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุเหนียว โดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า “วัสดุจะเริ่มคราก เมื่อพลังงานของการเปลี่ยนรูปต่อหน่วยปริมาตรของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ความเค้นรวม มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้นในการทดลองด้วยการดึงอย่างง่าย”

ในการพัฒนาสมการสำหรับทฤษฎีนี้ ให้พิจารณาพลังงานของการเปลี่ยนรูปในชิ้นส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  ดังรูป 2.19



รูปที่ 2.19 พลังงานการเปลี่ยนรูปลูกบาศก์ภายใต้ความเค้น 3 มิติ

โดย

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.13)$$

ดังนั้น ชิ้นส่วนในรูปที่ 2.19(b) จะมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงโดยไม่มีการบิดเบือนรูปร่างเชิงมุม ถ้าเราถือว่า  $\sigma_{av}$  เป็นองค์ประกอบของ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  องค์ประกอบนี้ก็จะนำไปลบออกได้ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 2.19(b) ซึ่งองค์ประกอบนี้เป็นองค์ประกอบที่อยู่ภายใต้การบิดเบือนรูปร่างเชิงมุม โดยปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง

พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้น 3 มิติ คือ

$$u = \frac{1}{2}(\epsilon_1\sigma_1 + \epsilon_2\sigma_2 + \epsilon_3\sigma_3) \quad (2.14)$$

$$= \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2.15)$$

พลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะปริมาตร  $u_v$  จึงหาได้โดยแทนค่า  $\sigma_{av}$  สำหรับ  $\sigma_1, \sigma_2$  และ  $\sigma_3$  ในสมการ (2.15) ซึ่งจะได้

$$u_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E}(1-2\nu) \quad (2.16)$$

แทนค่าสมการ (2.13) ยกกำลังสอง ลงในสมการ(2.16) และจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$u_v = \frac{1-2\nu}{6E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_1\sigma_3] \quad (2.17)$$

ดังนั้นจะสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูปได้จากการนำสมการ (2.17) ไปลบออกจากสมการ (2.15) จะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (2.18)$$

ให้สังเกตว่า พลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อ  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย ที่จุดคราก  $\sigma_1 = S_y$  และ  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  ดังนั้นพลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่าเท่ากับ

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2.19)$$

ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นในสมการ (2.18) จะทำให้สามารถทำนายจุดครากของชิ้นงานได้ ถ้าสมการที่ (2.18) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ (2.19) ซึ่งจะได้

$$\left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq S_y \quad (2.20)$$

ในการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย จะเกิดความเค้น  $\sigma$  จะเกิดการครากของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อ  $\sigma \geq S_y$  ดังนั้น เทอมข้างซ้ายมือของสมการที่ (2.20) จะเป็นค่าความเค้นที่มีผลต่อพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Effective stress) ซึ่งนิยมเรียกว่า “Von Mises Stress” ตามชื่อของผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ โดยใช้สัญลักษณ์  $\sigma'$  ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.20) ได้เป็น

$$\sigma' \geq S_y \quad (2.21)$$

เมื่อ

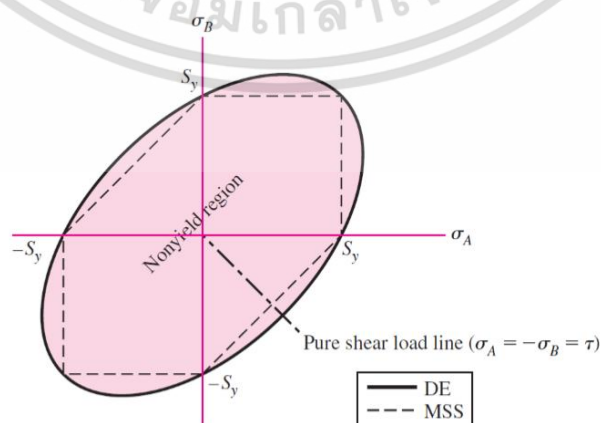
$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

ดังนั้น

สำหรับความเค้นในระนาบ กำหนดให้  $\sigma_A$  และ  $\sigma_B$  เป็นความเค้นหลักซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) นี้เป็นสมการของวงรีบนระนาบ  $\sigma_A \sigma_B$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.20 โดย  $\sigma' = S_y$  เป็นเส้นประในรูป คือทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (MSS) ซึ่งจะเห็นได้ว่าขีดจำกัดมากกว่า



รูปที่ 2.20 แสดงสมการ  $\sigma'$  บนระนาบ  $\sigma_A \sigma_B$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การใช้องค์ประกอบของความเค้น 3 มิติ  $xyz$  จะสามารถเขียน Von Mises Stress ได้ดังนี้

$$\sigma' = \frac{1}{2} \left[ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2} \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

ดังนั้น สำหรับความเค้นในระนาบ  $\sigma_z = 0$

$$\sigma' = \frac{1}{2} \left[ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2} \right] \quad (2.25)$$

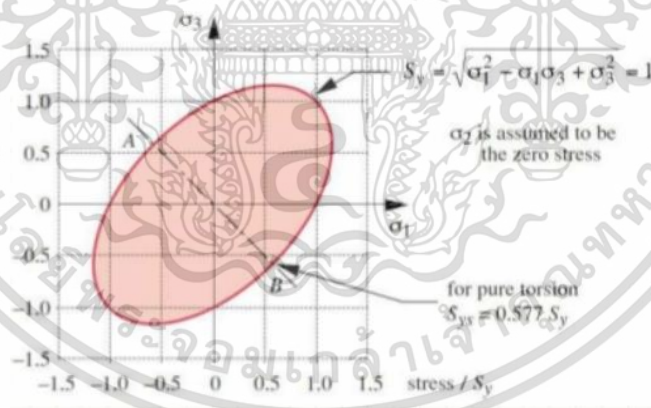
$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (2.26)$$

โมเดลสำหรับทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด จะไม่สนใจความเค้นหลักบนระนาบที่เอียงทำมุม  $45^\circ$  กับระนาบของแรงดึง ซึ่งมีค่า  $\frac{P}{2A}$  และไม่สนใจ Hydrostatic stress ซึ่งมีค่า  $\frac{P}{3A}$  และนี่คือเหตุผลที่ทำให้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด แตกต่างไปจากทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไปจะพิจารณาความเค้นที่ระนาบ ซึ่ง  $\sigma_3 = 0$  เมื่อใช้ค่าความปลอดภัย  $n$  และกำหนดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริง (Von Mises Stress),  $\sigma'$  คือ

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (2.27)$$

จะได้  $(\sigma')^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2$  ซึ่งเป็นสมการวงรี ดังรูปเช่นเดียวกับรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงสมการ  $\sigma'$  บนระนาบ  $\sigma_A \sigma_B$

หากพิจารณากรณีที่เกิดการครากจากความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว นั่นคือ  $\sigma_x = \sigma_y = 0$  จะ  
ได้

$$\sqrt{3\tau_{xy}^2} = S_y \quad \text{หรือ} \quad \tau_{xy} = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0.577 S_y \quad (2.28)$$

เมื่อใช้ทฤษฎีพลังงานการเปลี่ยนรูป จะสามารถทำนายค่าความเค้นต้านแรงเฉือนได้ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{xy} = 0.577S_y \quad (2.29)$$

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความต้านแรงเฉือนครากที่ทำนายจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดประมาณ 15%

## 2.8 ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz contact theory)

ทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ Heinrich Hertz ในปีค.ศ. 1882 ได้ศึกษาการสัมผัสของของแข็งยืดหยุ่นที่มีผิวโค้ง โดยอธิบายคุณสมบัติการสัมผัสกันด้วยความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertzian contact stress) ซึ่งคือความเค้นที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวโค้งภายใต้แรงกระทำในแนวตั้งฉากดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.22 แบบจำลองการสัมผัสตามทฤษฎีของเฮิร์ตซ์

ทฤษฎีดังกล่าวสามารถนำมาศึกษาการสัมผัสระหว่างลูกเหล็กและชิ้นทดสอบได้ หรือก็คือเมื่อลูกเหล็กสัมผัสกับชิ้นทดสอบจะส่งผลให้เกิดพื้นที่สัมผัสมีลักษณะเป็นวงรี โดยมีรัศมีวงรีตามแนวแกนหลักคือ  $a$  และมีรัศมีวงรีตามแนวแกนรองคือ  $b$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3\pi N(K_1 + K_2)}{4K_3}} \quad (2.30)$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3\pi N(K_1 + K_2)}{4K_3}} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $N$  คือแรงกระทำในแนวตั้งฉากทั้งหมดและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = \frac{1 - \sigma_w^2}{\pi E_w} \quad (2.32)$$

$$K_2 = \frac{1 - \sigma_R^2}{\pi E_R} \quad (2.33)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right] \quad (2.34)$$

เมื่อ  $R_1$  คือ รัศมีกึ่งหลักของล้อ

$R_1'$  คือ รัศมีความโค้งหลักของลูกเหล็กที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง

$R_2$  คือ รัศมีกึ่งหลักของชั้นทดสอบที่จุดสัมผัส (สำหรับชั้นทดสอบ,  $R_2 = \infty$ )

$R_2'$  คือ รัศมีความโค้งหลักของชั้นทดสอบที่จุดสัมผัสตามแนวขวาง

$\sigma_w, \sigma_R$  คือ อัตราส่วนพัวของ (Poisson's ratio) ของวัสดุที่ใช้ทำลูกเหล็กและชั้นทดสอบตามลำดับ

$E_w, E_R$  คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำลูกเหล็กและชั้นทดสอบตามลำดับ

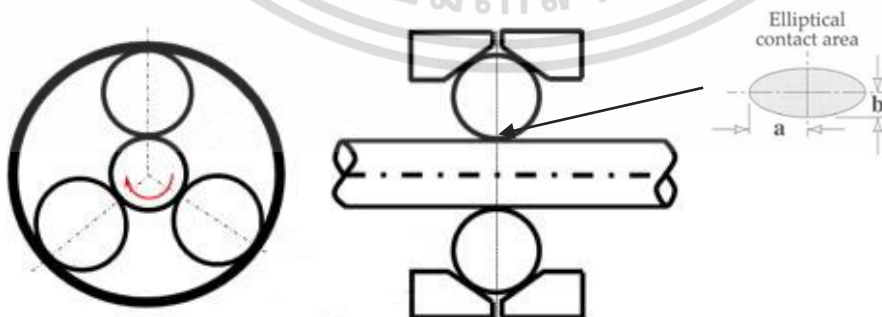
รัศมีความโค้งของวัตถุจะมีค่าเป็นบวกเมื่อจุดศูนย์กลางรัศมีความโค้งอยู่ภายในวัตถุ และค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $n$  ในสมการ (2.30) และ (2.31) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ  $\frac{K_4}{K_3}$  เมื่อ  $K_4$  สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$K_4 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right) \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right) \cos 2\psi \right] \quad (2.35)$$

เมื่อ  $\psi$  คือมุมระหว่างระนาบปกติซึ่งประกอบด้วยรัศมีความโค้ง  $\frac{1}{R_1}$  และ  $\frac{1}{R_2}$

ค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $n$  แสดงในตารางที่ 2.1 ในรูปของตัวแปร  $\theta$  คำนวณได้จาก

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{K_4}{K_3} \right) \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.23 พื้นที่สัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างลูกเหล็กกับชั้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์  $m$  และ  $n$  ในรูปของตัวแปร  $\theta$

$\theta$ (deg)	$m$	$n$	$\theta$ (deg)	$m$	$n$	$\theta$ (deg)	$m$	$n$
0	$\infty$	0	8	7.86	0.2850	55	1.611	0.6780
0.5	61.40	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.7170
1	36.89	0.1314	20	3.813	1.4123	65	1.378	0.7590
1.5	27.48	0.1522	30	2.731	0.4930	70	1.284	0.8020
2	22.26	0.1691	35	2.397	0.5300	75	1.202	0.8460
3	16.50	0.1964	40	2.136	0.5670	80	1.128	0.8930
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.6040	85	1.061	0.9440
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.6410	90	1.000	1.0000

ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกเหล็กและชิ้นทดสอบ  
คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (2.37)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (2.38)$$

เมื่อ  $p(x, y)$  คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่งต่าง ๆ

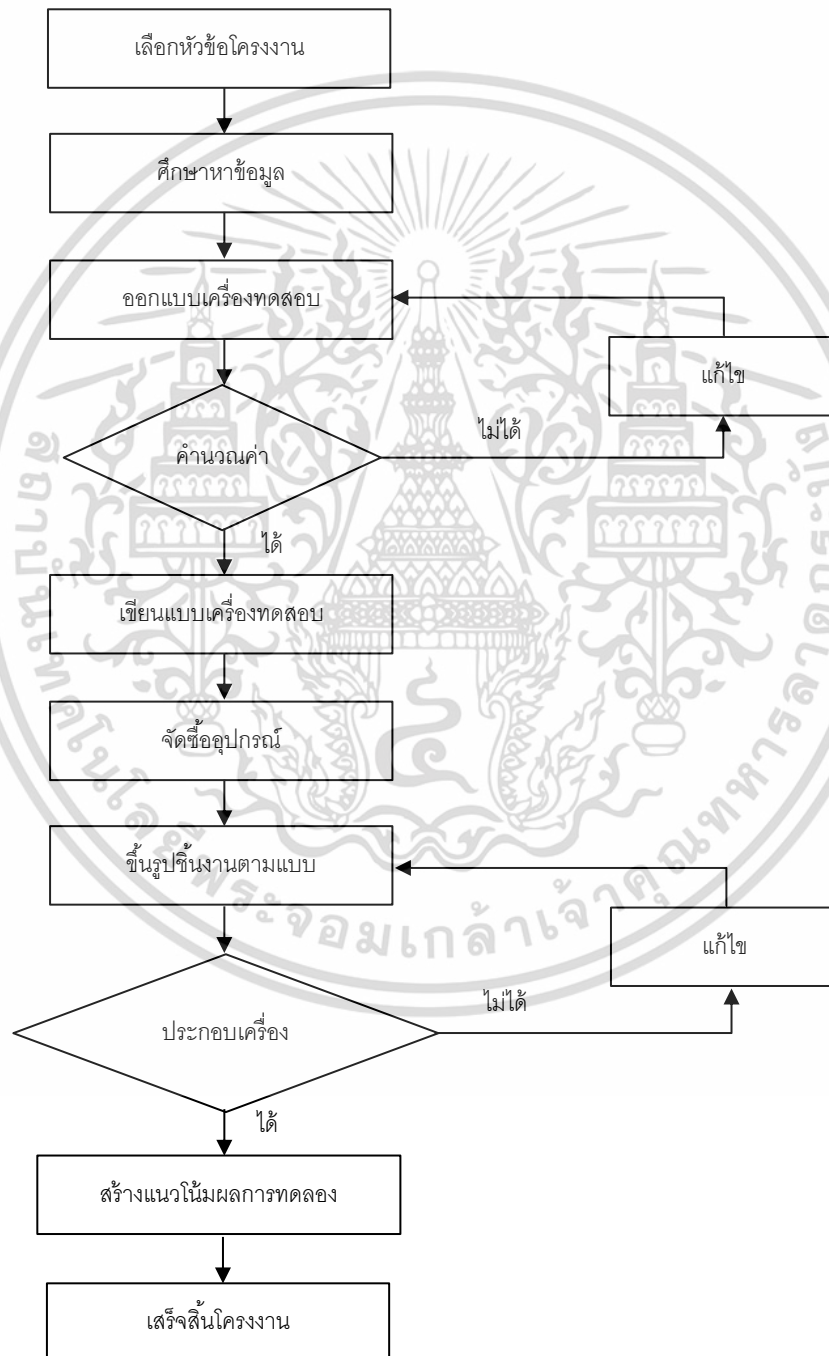
$p_0$  คือ ความดันสัมผัสในแนวตั้งฉากสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกเหล็ก  
และชิ้นทดสอบ

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินการ

#### 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนในการทำโครงการตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดการทำโครงการแสดงดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่ง ซึ่งการออกแบบควรคำนึงถึงชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องทดสอบ ชนิดและองค์ประกอบของชิ้นทดสอบ หลักการทำงานของเครื่องทดสอบและผลการทดลองที่คาดหวังจากเครื่องทดสอบ เพื่อสร้างเครื่องทดสอบที่มีประสิทธิภาพสามารถใช้งานได้จริงและตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการ

### 3.2.1 ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับแบบร่างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่ง (Rolling Contact Fatigue Tester Schematic)

เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่งมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งแบบร่างเครื่องทดสอบการล้าที่กลุ่มผู้ทดสอบสนใจ พิจารณาจากปัจจัยด้านการออกแบบ การใช้งานจริง และต้นทุนในการสร้างแล้วพบว่ามียู่อด้วยกัน 2 แบบคือ

#### 3.2.1.1 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าแบบ NTN Cylinder-to-ball

แบบร่างชนิดนี้เป็นแบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่งแบบ NTN Cylinder-to-Ball หลักการทำงานของเครื่องทดสอบชนิดนี้คือ ชิ้นทดสอบทรงกระบอกจะถูกทำให้เกิดการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่งกับลูกบอลเหล็ก 2 ลูก ใส่แรงโหลดให้กับชิ้นทดสอบคิดเป็น 2 เท่าของอัตราการหมุนของชิ้นทดสอบโดยใส่ผ่านลูกกลิ้งตัวขับ (Driving Roll) ซึ่งยึดติดกับเพลลาโดยใส่แรงผ่านสปริงกด ชิ้นทดสอบหมุนด้วยลูกบอลเหล็ก 2 ลูกซึ่งถูกหมุนด้วยลูกกลิ้งตัวนำ (Guide Roll) 3 ตัว ซึ่งแต่ละตัวมีร่องให้ลูกบอลสามารถกลิ้งอยู่ได้ เมื่อลูกกลิ้งตัวขับทำหน้าที่ขับชิ้นทดสอบ จะทำให้ลูกบอลและลูกกลิ้งตัวนำหมุนตามไปด้วย บริเวณที่ชิ้นทดสอบกับลูกบอลสัมผัสกันอยู่ตรงกลางของชิ้นทดสอบเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความสมดุลในขณะที่ทำการทดสอบ ป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบขณะทดสอบ การล้าจากการสัมผัสสเกลิ่งที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างชิ้นทดสอบและลูกกลิ้งตัวขับจะเกิดที่บริเวณปลายของชิ้นทดสอบและทำให้เกิดความเค้นสัมผัสน้อยมาก ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่ออาการล้าจากการสัมผัสสเกลิ่งที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างชิ้นทดสอบและลูกบอลเหล็ก เช่น เซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) กับ อุปกรณ์หยุดการทำงานของมอเตอร์ทำหน้าที่วัดค่าการสั่นสะเทือนของชิ้นทดสอบและลูกบอลเหล็ก เมื่อค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ บ่งบอกถึงการเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบหรือลูกบอลเหล็ก จะส่งสัญญาณเพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์โดยอัตโนมัติ เวลาในการทดสอบวัดได้จากเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการทำงาน น้ำมันหล่อลื่นถูกใส่ให้กับชิ้นทดสอบตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยแรงโหลดที่ใส่และความเร็วในการหมุนของ Roller ทั้งหมดมีดังนี้

$$\text{โหลดสัมผัสระหว่างชิ้นทดสอบและลูกบอล} = 0.423 P_0$$

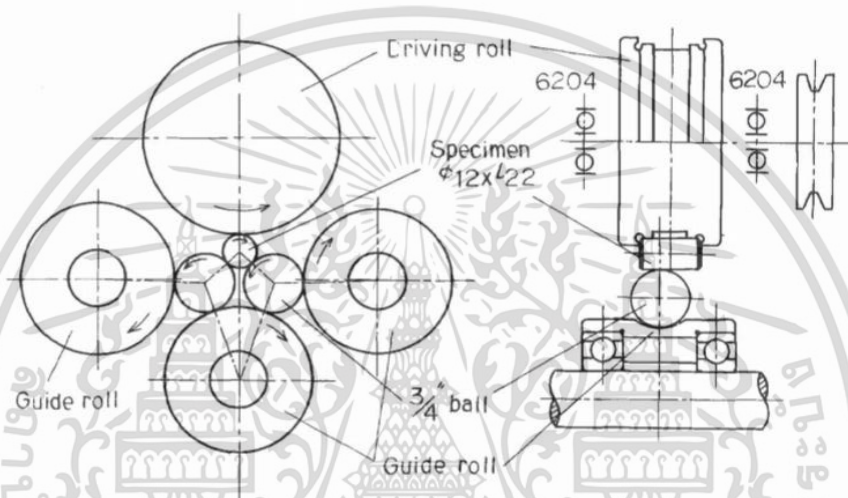
$$\text{อัตราการหมุนของลูกบอลเหล็กขนาด 19.05 mm} = \frac{63.2}{19.05} \text{ N} = 3.3175 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

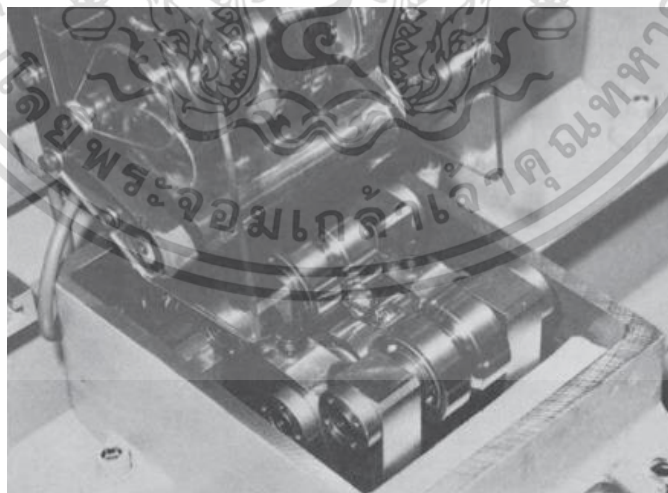
$$\text{อัตราการหมุนของชั้นทดสอบขนาด 8 mm} = \frac{63.2}{8} N = 7.9N$$

เมื่อ  $P_0$  คือ แรงโหลดทั้งหมด และ  $N$  คือ อัตราการหมุนของ Guild roll

ดังนั้นอัตราการหมุนของ Guild roll จะเท่ากับ 1410 RPM อัตราการหมุนของชั้นทดสอบขนาด 8 mm จะเท่ากับ 11139 RPM อัตราการหมุนของลูกบอลเหล็กขนาด 19.05 mm จะเท่ากับ 4677.67 RPM และอัตราการหมุนแบบวงรอบ (Cycle Stress) มีค่าเท่ากับ 22278 RPM ซึ่งถ้าทำการทดสอบโดยหมุนทั้งหมด 1 ล้ารอบ จะใช้เวลาประมาณ 44.88 นาที



รูปที่ 3.2 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสลูกกลิ้ง



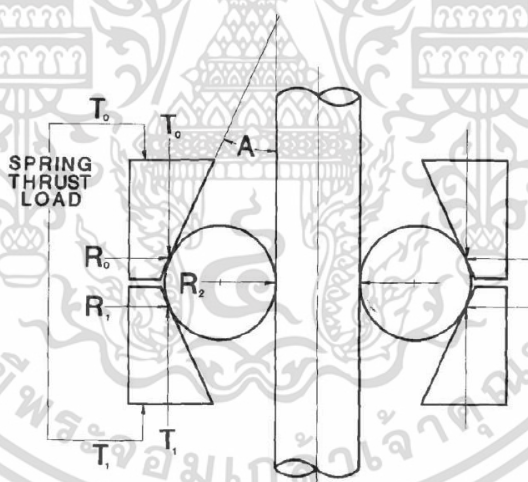
รูปที่ 3.3 แบบร่างภายในของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.2 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าแบบ Ball-rod

แบบร่างชนิดนี้เป็นแบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสลึงแบบ Ball-rod (Ball-rod RCF tester) ประกอบไปด้วยชิ้นทดสอบทรงกระบอกที่สามารถหมุนได้ถูกให้ความเค้นซ้ำ ๆ ด้วยลูกบอลเหล็ก 3 ลูก ลูกบอลทั้ง 3 ลูกนั้นยึดด้วยแหวนยึดลูกบอลได้รับแรงในแนวรัศมีผ่าน ฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเรียบ 2 ตัวที่ถูกให้แรงโดยสปริงกด 3 ตัว ซึ่งแบบร่างของเครื่องทดสอบได้ในรูปที่ 3.3 ขนาดแรงในแนวรัศมีที่ใส่ให้กับลูกบอลเหล็ก 3 ลูกและแรงที่ลูกบอลเหล็กส่งผ่านให้ชิ้นทดสอบดูได้จากตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.4 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสลึง (มุมมองด้านบน)



รูปที่ 3.5 แบบร่างของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสลึง (มุมมองด้านข้าง)

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของมุมของฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเรียบ, แรงในแนวรัศมีที่ใส่ให้กับลูกบอลเหล็ก 3 ลูกและแรงที่ลูกบอลเหล็กส่งผ่านให้ชิ้นทดสอบ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ค่าที่ได้
$A$	มุมของฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเรียบ	17 องศา
$T_0$	แรงกดจากสปริง	253.65 N

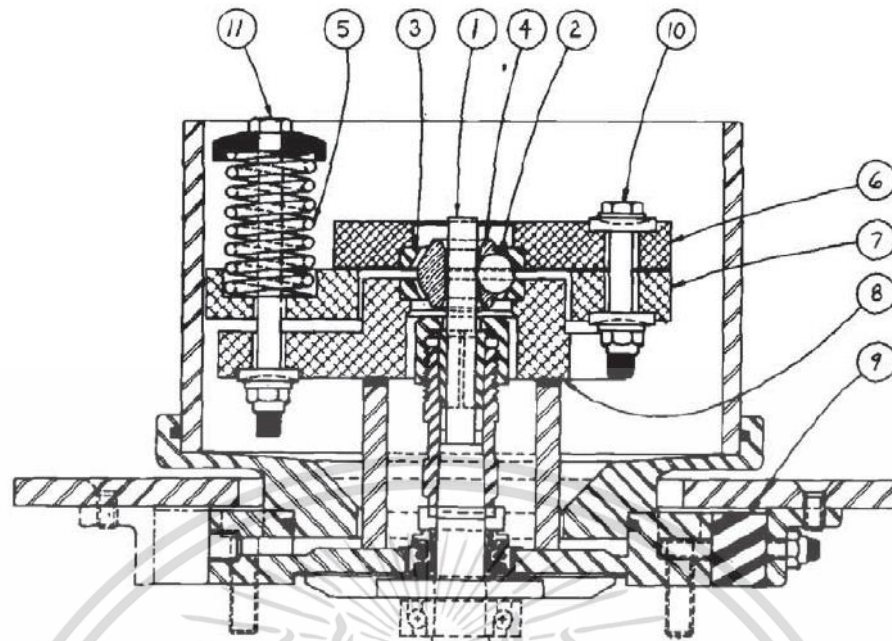
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_1$	แรงกดจากสปริง	253.65 N
$R_0$	แรงในแนวรัศมีระหว่างฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเร็วขึ้นบนกับลูกบอลเหล็ก	829.65 N
$R_1$	แรงในแนวรัศมีระหว่างฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเร็วขึ้นล่างกับลูกบอลเหล็ก	829.65 N
$R_2$	แรงในแนวรัศมีที่ลูกบอลเหล็กส่งผ่านให้ชั้นทดสอบ	1659.30 N

แบบภาพตัดขวางในรูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดการออกแบบเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสแบบ Ball-rod ชั้นทดสอบจะถูกตรึงไว้ในแนวตั้งด้วยลูกคอลเล็ตความแม่นยำสูง (Precision collet) ยึดด้วยตัวจับลูกคอลเล็ต (Collet holder) แล้วต่อเข้ากับมอเตอร์หน้าแปลน (Flange motor) ที่ยึดติดกับโต๊ะเหล็ก โดยหันด้านของเพลามอเตอร์ขึ้น ลูกบอลเหล็ก 3 ลูก ถูกยึดด้วยแหวนยึดลูกบอลทำหน้าที่ส่งแรงในแนวรัศมีที่ได้จากฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเร็ว 2 ตัวซึ่งติดตั้งอยู่ตรงกลางของแผ่นบนและแผ่นล่างให้กับชั้นทดสอบ ฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเร็วได้รับแรงจากสปริงกด 3 ตัวที่ติดตั้งอยู่บนแผ่นกลางปรับค่าของแรงที่สปริงกดด้วยน็อตปรับความสูงของสปริง เช่น เซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) กับอุปกรณ์หยุดการทำงานของมอเตอร์ทำหน้าที่วัดค่าการสั่นสะเทือนของฝาครอบตลับลูกปืนเม็ดเร็ว เมื่อค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ บ่งบอกถึงการเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ จะส่งสัญญาณเพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์โดยอัตโนมัติ เวลาในการทดสอบวัดได้จากเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการทำงาน น้ำมันหล่อลื่นถูกใส่ด้วยการหยดจากอุปกรณ์หยดน้ำมันลงบนปลายของชั้นทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| 1. Specimen            | 7. Spring retainer plate    |
| 2. Ball                | 8. Lower cup housing        |
| 3. Tapered bearing cup | 9. Shock mount              |
| 4. Ball retainer       | 10. Load application bolt   |
| 5. Compression spring  | 11. Spring calibration bolt |
| 6. Upper cup housing   |                             |

รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งแบบ Ball-rod



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างตัวเครื่องที่ประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบและประกอบเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสกลิ้ง

#### 3.3.1 กำหนดแบบของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสกลิ้ง

เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสกลิ้งที่เลือกประดิษฐ์เป็นแบบ NTN Cylinder-to-Ball โดยได้ทำการเขียนแบบด้วยโปรแกรม Auto Cad และ Solidwork โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

##### 3.3.1.1 กำหนดชุดโครงสร้างหลัก

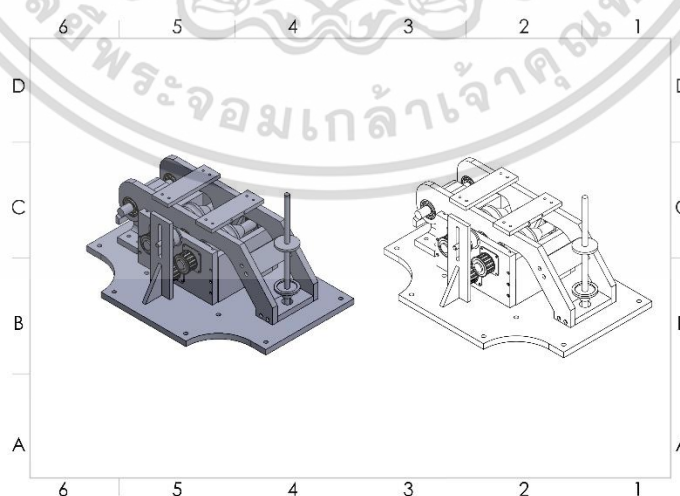
จากการพิจารณาถึงความทนทาน ความปลอดภัยของโครงสร้างและความสะดวกในการใช้งานเป็นหลัก จึงส่งผลให้เลือกวัสดุที่จะนำมาทำส่วนประกอบของเครื่องทดสอบที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ไม่ว่าจะเป็นด้านความแข็งแรง ทนทานและความประหยัดตามหลักเศรษฐศาสตร์

##### 3.3.1.2 การกำหนดและออกแบบรายละเอียด

ชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการล้าแต่ละชิ้นส่วนต้องการการระบุรายละเอียดที่แตกต่างกัน เช่น ชิ้นส่วนที่เป็นเพลลาหรือแบริ่งต้องกำหนดค่าพิถีพิถันความเผื่อของตัวเพลลาหรือแบริ่งและรูที่ต้องการจะสวมให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการว่าต้องการการสวมแบบหลวม พอดีหรือแน่น ชิ้นส่วนที่ต้องการความละเอียดควรกำหนดพิถีพิถันด้านรูปทรง (GD&T) เข้าไปด้วย ฯลฯ รายละเอียดของการออกแบบและค่าพิถีพิถันความเผื่อต่าง ๆ แสดงที่ภาคผนวก

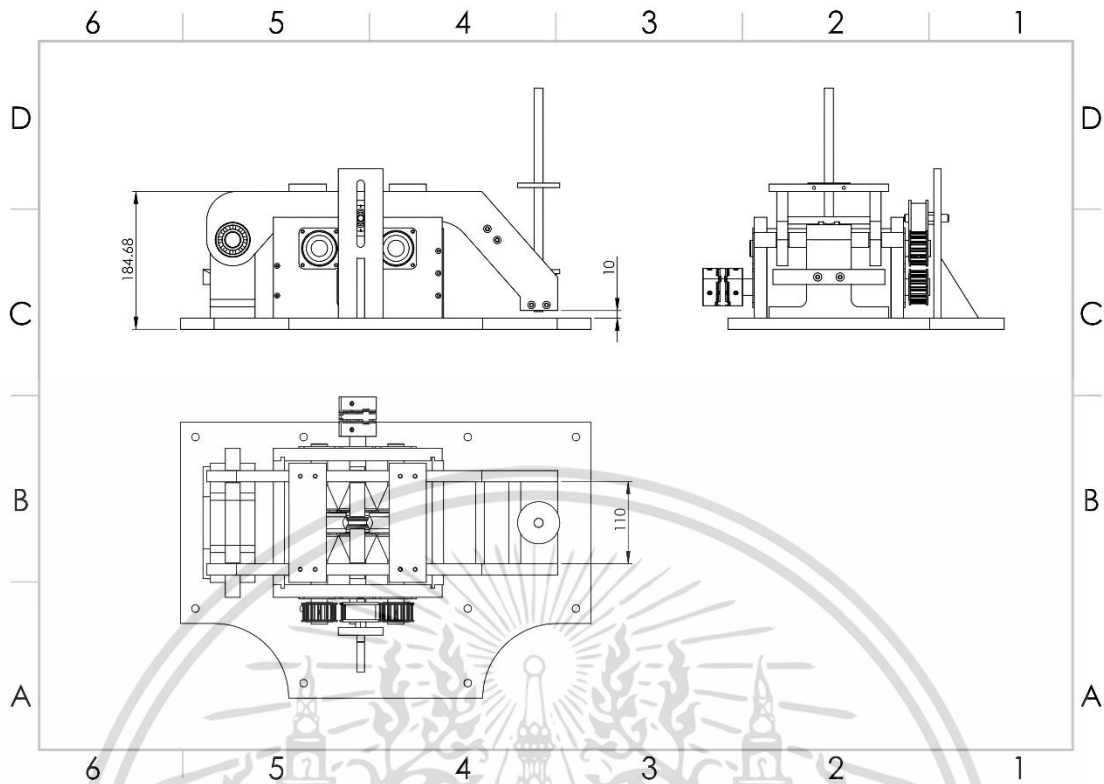
##### 3.3.1.3 ขั้นตอนการประเมินราคา

ราคาในการสร้างเครื่องทดสอบการล้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ราคาวัตถุดิบในท้องตลาด ค่าแรง ค่าขนส่ง ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดต่าง ๆ ซึ่งการประเมินราคาในครั้งนี้ จะคำนวณเฉพาะค่าวัตถุดิบและค่าชิ้นส่วนตามมาตรฐานเท่านั้น

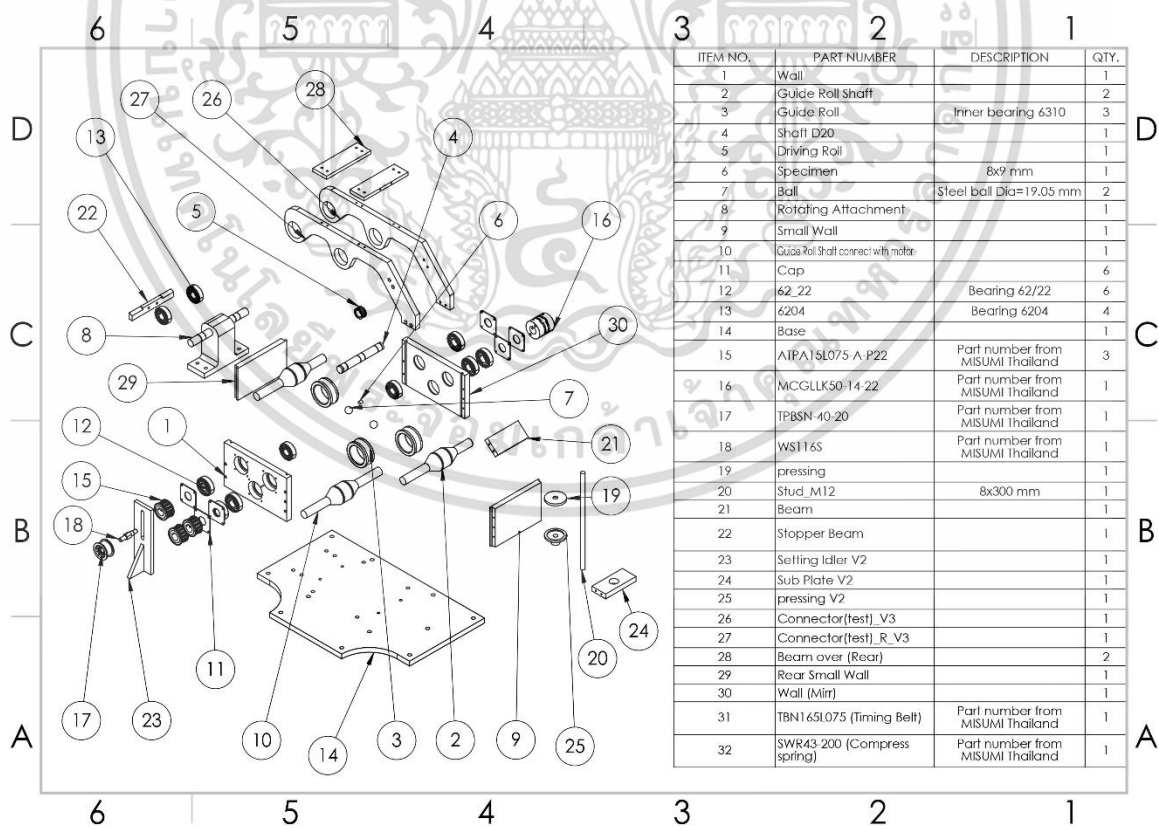


รูปที่ 3.8 แบบร่างเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสกลิ้งจากโปรแกรม Solidwork

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แบบร่างมุมมองที่ 1 เครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่งจากโปรแกรม Solidwork



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัสสกลิ่ง

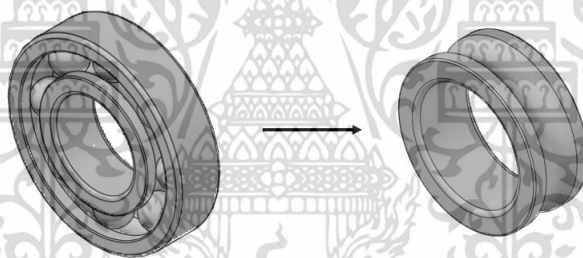
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการล้าจากการสัมผัส

**3.3.2.1 ผนังหลัก (Wall)** ใช้รองรับแบร็งที่สวมอยู่กับเพลลาของ Guild rolls ทั้ง 3 ตัว โดยเจาะรูและทำร่องเพื่อให้แบร็งสามารถสวมเข้าไปได้พอดี ปลายทั้ง 2 ด้านกลึงร่องเพื่อสวมกับผนังที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ ทำให้สะดวกต่อการเปลี่ยนและบำรุงรักษา ส่วนล่างเจาะรู 2 รูเพื่อยึดติดกับฐานด้วยสกรู (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.2 เพลลาของลูกกลิ้งนำทาง (Guild roll shaft)** ทำหน้าที่เป็นตัวหมุน Guild roll โดยบริเวณส่วนกลางจะมีขนาดที่เท่ากับกับตัว Guild roll ทำให้สวมกันได้อย่างพอดีและจะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดน้ำหนักของเพลลาอง อีกทั้งทำร่องเพื่อสวมกับแหวนล็อกเพลลาป้องกัน Guild roll เคลื่อนไปมาระหว่างใช้งานเครื่องทดสอบ ส่วนปลายมีขนาดเพลลาที่สวมกับแบร็งรุ่น 62/22 ได้พอดี (ดูได้จากภาคผนวก ก)

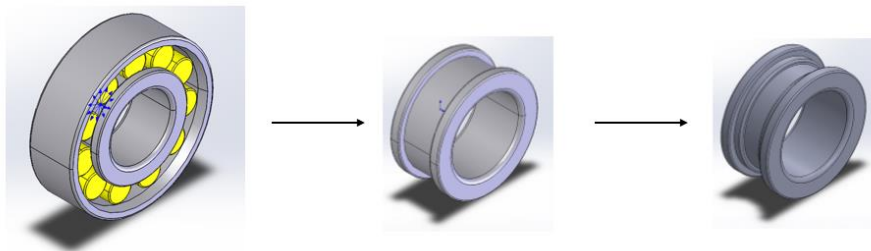
**3.3.2.3 ลูกกลิ้งนำทาง (Guild roll)** ทำหน้าที่เป็นตัวส่งกำลังการหมุนจากมอเตอร์ไปให้กับลูกบอลเหล็ก 2 ลูกที่หมุนอยู่บนร่องของ Guild roll เพื่อส่งต่อไปกับชิ้นทดสอบต่อไป Guild roll คือการนำแบร็งรุ่น 6310 ทำการถอดแยกชิ้นส่วนและนำเฉพาะแบร็งวงในมาใช้งาน



รูปที่ 3.11 Guild roll จากแบร็งรุ่น 6310

**3.3.2.4 เพลลาของลูกกลิ้งตัวส่ง (Driving roll shaft)** ทำหน้าที่เป็นตัวหมุน Driving roll โดยบริเวณส่วนกลางจะมีขนาดที่เท่ากับกับตัว Driving roll ทำให้สวมกันได้อย่างพอดี ทำร่องบริเวณตรงกลางและปลายทั้ง 2 ด้านเพื่อสวมกับแหวนล็อกเพลลาป้องกัน Guild roll และแบร็งเคลื่อนไปมาระหว่างใช้งานเครื่องทดสอบ ส่วนปลายมีขนาดเพลลาที่สวมกับแบร็งรุ่น 6204 ได้พอดี (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.5 ลูกกลิ้งตัวส่ง (Driving roll)** ทำหน้าที่เป็นตัวส่งแรงกดที่ได้จากแขนยกไปให้กับชิ้นทดสอบ Guild roll คือการนำแบร็งรุ่น N204ECP ทำการถอดแยกชิ้นส่วนและนำเฉพาะแบร็งวงในมาใช้งาน ทำการเจาะร่องบริเวณตรงกลางของแบร็งเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่กดกับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.12 Driving roll จากแบร์ริงรุ่น N204ECP

3.3.2.6 **ชิ้นทดสอบ (Specimen)** ออกแบบให้เป็นรูปทรงกระบอกขนาด 8x9 mm เพื่อให้สามารถใส่กับตัว Driving roll ได้อย่างพอดีและได้รับแรงกดที่สม่ำเสมอ

3.3.2.7 **ลูกบอลเหล็ก (Steel ball)** ลูกบอลเหล็กที่ใช้ส่งถ่ายแรงจาก Guild roll ไปยังชิ้นทดสอบใช้ลูกบอลโครเมียม เกรด G20 มีความหยาบของผิว (Surface roughness) อยู่ที่  $0.032 \mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 มม.

3.3.2.8 **จุดหมุนแขนส่งถ่ายแรง (Connector pivot)** ทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของแขนส่งถ่ายแรง ยึดติดอยู่กับฐานเครื่อง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

3.3.2.9 **ผนังแบบเลื่อนออกได้ (Removable wall)** ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมผนังหลักทั้ง 2 แผ่นเข้าด้วยกัน ส่วนปลายของผนังออกแบบให้เป็นร่องที่มีความละเอียดของผิวสูง เพื่อให้ผนังสามารถเลื่อนออกไปมาได้ สะดวกต่อการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (ดูได้จากภาคผนวก ก)

3.3.2.10 **เพลาชับที่ติดกับมอเตอร์ (Guide Roll Shaft Connect With Motor)** ทำหน้าที่หมุนตัวลูกบอลทั้งสองลูก แต่การหมุนของเพลาชับนี้จะหมุนเท่ากับความเร็วของเพลามอเตอร์โดยตรง เพราะเพลาชับตัวนี้ติดกับมอเตอร์ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

3.3.2.11 **แผ่นปิดตัวแบร์ริง (Cap)** ทำหน้าที่ป้องกันตัว แบร์ริงรุ่น 62/22 หลุดออกจากชิ้นงานผนังหลัก จะนำไปประกอบกับชิ้นงานผนังหลัก ในการติดแผ่นปิดตัวแบร์ริงจะมีระยะเผื่อที่ห่างจากตัว แบร์ริงรุ่น 62/22 เพื่อให้ตัวแบร์ริงตัวนั้นเคลื่อนที่ซ้ายขวาและหมุนได้สะดวกแต่จะไม่หลุดจากชิ้นงานผนังหลัก จะใช้ทั้งหมด 6 ชิ้น เพราะว่ามีแบร์ริงรุ่น 62/22 ทั้งหมด 6 ตัว และจะเจาะรูขึ้นละ 4 รู เพื่อใส่สกรูเพื่อทำการยึดกับผนังหลัก (ดูได้จากภาคผนวก ก)

3.3.2.12 **ลูกกลิ้งรองรับเพลลา (Support Bearing)** ทำหน้าที่รองรับเพลลาที่ใส่ลูกกลิ้งนำทางทั้ง 3 ตัว จะใช้ลูกกลิ้งรองรับเพลลา 2 ชั้น ต่อเพลลาของลูกกลิ้งนำทาง 1 ตัว ทั้งหมดจะใช้แบร์ริงรุ่น 62/22 จำนวน 6 ตัว ตอนที่เพลลาของลูกกลิ้งนำทางหมุนตัวของลูกกลิ้งรองรับเพลลาจะหมุนตาม (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.13 ลูกกลิ้งรองรับแขนส่งถ่ายแรง (Support Beam)** ทำหน้าที่รองรับแขนส่งถ่ายแรง (หมายเลขที่ 26 และ 27) ทำให้แขนนั้นสามารถหมุนเปิดหรือหมุนปิดได้ จะใช้ตัวเบริงรุ่น 6204 ทั้งหมด 2 ตัวในการรองรับแผ่นแขนตัวหมุนทั้งหมด 2 ตัวเช่นกัน (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.14 ฐานรองเครื่องทดสอบ (Base)** ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของเครื่องทดสอบทั้งหมด และจะเจาะรูทำเกลียวเพื่อใส่สกรูเพื่อยึดส่วนประกอบที่ติดกับฐานรองรับเครื่องทดสอบ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.15 ตัวขับเคลื่อนเพลลา (Timing Pulley)** ทำหน้าที่ขับเคลื่อนการทำงานของเพลลา ขับ ใช้ทั้งหมด 3 ตัว ตัวขับเคลื่อนเพลลา 2 ตัวบนเอาไว้ขับเคลื่อนเพลลาทั้งสอง(เพลลา Guide Roll) ตัวขับเคลื่อนเพลลาตัวล่างจะไปติดกับเพลลาตัวล่าง(เพลลา Guide Roll ตัวล่าง) และเพลลาตัวล่าง(เพลลา Guide Roll ตัวล่าง) ไปติดกับมอเตอร์อีกฝั่งของเครื่องทดสอบแล้วมอเตอร์ของเครื่องทดสอบจะหมุนทำให้ตัวล่าง(ตัวขับเคลื่อนเพลลา) หมุนก่อนแล้วจากนั้นจะส่งผ่านกำลังการหมุนโดยจะใช้สายพานเป็นตัวกลางเพื่อส่งผ่านกำลังไปยังตัวขับเคลื่อนเพลลาตัวบน(เพลลา Guide Roll ตัวที่ 2 และตัวที่ 3) ต่อไป (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.16 คัปปลิ่ง (Coupling)** ทำหน้าที่เชื่อมเพลลาของมอเตอร์กับเพลลาขับเคลื่อนตัวล่างให้สามารถหมุนไปพร้อมกับเพลลาของมอเตอร์ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.17 ตัวดึงสายพาน (Belt Take-Up)** ทำหน้าที่กำหนดความตึงของสายพาน เพราะสามารถเลื่อนขึ้นเลื่อนลงได้ตามล่องที่ไว้กำหนดการเคลื่อนที่ของตัวดึงสายพาน และจะมีตัวล็อคตัวดึงสายพานไว้กำหนดตำแหน่งของตัวดึงสายพาน เวลาที่สายพานหมุนตัวดึงสายพานจะหมุนด้วย (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.18 น็อตล็อคตัวดึงสายพาน (Nut)** น็อตล็อคตัวดึงสายพานไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม (เมื่อปรับแล้ว) ทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตัวดึงสายพาน (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.19 แผ่นรองรับการกด (Pressed Sheet)** ทำหน้าที่รองรับน็อตจากข้างบนและกดสปริง จะหมุนน็อตลงมาเรื่อย ๆ เพื่อให้สปริงยุบตัวตามแรงที่ต้องการ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.20 แท่นสปริง (Stud)** ทำหน้าที่ตั้งเป็นเสาหลักให้สปริงมาวางเพื่อทำให้สปริงมีตำแหน่งในการวาง และส่วนล่างจะติดกับฐานของเครื่องทดสอบ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.21 แท่นยึดแขนตัวหมุน (Beam)** ทำหน้าที่ยึดและล็อคแขนตัวหมุนทั้งสองแขนให้อยู่กับที่ทำการเจาะรูเกลียวฝั่งละสองรู เพื่อจะทำการใส่สกรูเพื่อยึดแขนตัวหมุนทั้งสอง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.22 ตัวหยุดแขนตัวหมุน (Stopper Beam)** ทำหน้าที่ป้องกันแขนส่งถ่ายแรงไม่ให้หมุนไปเกินกว่าที่กำหนดไว้ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.2.23 แท่งตั้งตัวตึงสายพาน (Setting Idler)** ทำหน้าที่เป็นที่ตั้งของตัวตึงสายพานและชะลออง เพื่อให้ตัวตึงสายพานเคลื่อนที่ไปได้แค่นั้นที่กำหนดไว้ (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.24 แผ่นรองสปริง (Sub Plate)** ทำหน้าที่รองรับแรงที่สปริงกดมาและทำหน้าที่ยึดแขนของตัวหมุนให้อยู่กับที่คงรูปเหมือนเดิมไม่เคลื่อนที่ไปมา เพราะจะเจาะรูทำเกลียวด้านละ 2 เกลียวเพื่อล็อกแขนส่งถ่ายแรง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.25 ตัวรองสปริง (Pressed Plate)** ทำหน้าที่รองรับแรงกดมาจากสปริงและทำหน้าที่ล็อกสปริงให้เคลื่อนที่ไปได้ไม่มาก เพราะหน้าที่สัมผัสกับสปริงจะทำขอบสูงขึ้นมารอบวงกลมเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของสปริงไปมา (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.26 แขนส่งถ่ายแรงฝั่งขวา (Right Connector)** ทำหน้าที่หมุนยกขึ้นและยกลง ถ้ายกลงเพื่อจะนำเพลลาที่มีแบริงติดอยู่ที่ระหว่างกลางของแขนตัวหมุนซ้ายและขวา ไปกดขึ้นทดสอบ และตรงปลายล่างของทั้งสองแขนตัวหมุนนี้จะถูกกดโดยสปริง ส่วนกลางและส่วนปลายเจาะรูเพื่อสวมแบริง และเมื่อเวลาเครื่องทำงาน แขนส่งถ่ายแรงจะไม่เกิดการหมุน ออกแบบให้แขนส่งมีความหนาที่มาก เนื่องจากต้องรับแรงกดที่มากจากสปริง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.27 แขนส่งถ่ายแรงฝั่งซ้าย (Left Connector)** ทำหน้าที่หมุนยกขึ้นและยกลง ถ้ายกลงเพื่อจะนำเพลลาที่มีแบริงติดอยู่ที่ระหว่างกลางของแขนตัวหมุนซ้ายและขวา ไปกดขึ้นทดสอบ และตรงปลายล่างของทั้งสองแขนตัวหมุนนี้จะถูกกดโดยสปริง ส่วนกลางและส่วนปลายเจาะรูเพื่อสวมแบริง และเมื่อเวลาเครื่องทำงาน แขนส่งถ่ายแรงจะไม่เกิดการหมุน ออกแบบให้แขนส่งมีความหนาที่มาก เนื่องจากต้องรับแรงกดที่มากจากสปริง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.28 แผ่นวางตัวบน (Top Plate)** ทำหน้าที่รองรับแผ่นอะคริลิกทั้งด้านบน และด้านข้างสองข้างโดยเจาะรูเพื่อใส่สกรูเข้าไป และยังทำหน้าที่ยึดแขนตัวหมุนทั้งสองฝั่งให้อยู่กับที่อีกด้วย (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.29 ผนังแบบเลื่อนออกได้ (Removable wall)** ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมผนังหลักทั้งสองแผ่นเข้าด้วยกัน ส่วนปลายของผนังออกแบบให้เป็นร่องที่มีความละเอียดของผิวสูง เพื่อให้ผนังสามารถเลื่อนออกได้สะดวกต่อการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.30 ผนังหลัก (Wall)** ใช้รองรับแบริงที่สวมอยู่กับเพลลาของ Guild rolls ทั้ง 3 ตัว โดยเจาะรูและทำร่องเพื่อให้แบริงสามารถสวมเข้าไปได้พอดี ปลายทั้งสองด้านกลึงร่องเพื่อสวมกับผนังที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ ทำให้สะดวกต่อการเปลี่ยนและบำรุงรักษา ส่วนล่างเจาะรู 2 รูเพื่อยึดติดกับฐานด้วยสกรู (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.31 สายพาน (Timing Belt)** ทำหน้าที่ส่งกำลังจากตัวขับเคลื่อนตัวล่างส่งกำลังไปให้ตัวขับเคลื่อนอีกสองตัวบนเพื่อที่เฟลาสอง ตัวบนนั้นจะสามารถหมุนได้รอบการหมุนเท่ากับเฟลาตัวขับเคลื่อนตัวล่าง (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.2.32 สปริงกด (Compress Spring)** จะโดนกดตามแรงที่ผู้ทดลองต้องการ แต่การจะไปคำนวณแรงนั้นจะไปดูการเปลี่ยนแปลงของระยะทางของสปริงว่าถูกกดไปกี่มิลลิเมตร เพื่อจะนำมาคำนวณแรงที่กดไป (ดูได้จากภาคผนวก ก)

**3.3.3 อุปกรณ์และหลักการทำงานของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแต่ละชนิดในเครื่องทดสอบการลำจากการสัมผัสกำลัง**

**3.3.3.1 เบรกเกอร์ (Breaker)** เป็นสวิตช์เปิด-ปิดที่ใช้ในงานไฟฟ้าทั่วไปแต่มีคุณภาพที่สูงกว่า เพราะว่าเบรกเกอร์นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด-ปิดวงจรไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถควบคุมและป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินในวงจรและการลัดวงจร ทำงานโดยอาศัยความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะนำไปติดตั้งระหว่างวงจรไปเพื่อให้กระแสไฟ 380 VAC สามารถไหลได้และจะสามารถเปิดมอเตอร์ได้ และสามารถตัดกระแสไฟได้ถ้ากระแสนั้นเกิน รูปที่ 3.13 คือเบรกเกอร์



รูปที่ 3.13 เบรกเกอร์ (Breaker)

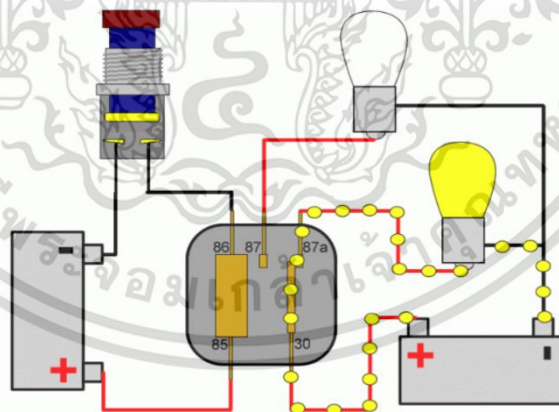
**3.3.3.2 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Power Supply)** คืออุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ โดยเลือกใช้ตัว 12V 15A 180W โดยหลักการจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 VAC เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 VDC ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับตัว Arduino, Relay Module, Accelerometer Sensor, Infrared Photoelectric Switch Sensor ให้มีไฟเลี้ยงและอุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้ โดยรูปที่ 3.14 คืออุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Power Supply)

**3.3.3.3 สวิตช์ต่อวงจร (Magnetic Contactor)** คือ อุปกรณ์สวิตช์ตัดต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อ การเปิด-ปิด ของหน้าสัมผัส (Contact) ทำงานโดยอาศัยอำนาจแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยในการเปิด-ปิด หน้าสัมผัส ในการตัดต่อวงจรไฟฟ้า ในที่นี้ใช้ในการเปิด-ปิด การทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์และ หลักการทำงานของสวิตช์ต่อวงจร เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กที่อยู่ขากกลางของ แกนเหล็ก ขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กที่แรงสนามแม่เหล็กขณะแรงสปริงดึงให้แกนเหล็กชุดที่เคลื่อนที่ เคลื่อนที่ลงมาต่อให้ครบวงจร และเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไม่ไหลไปเลี้ยงขดลวดเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวสปริงดึง แกนเหล็กกลับมา ณ ตำแหน่งเดิม ก็จะทำให้ไฟที่ติดอยู่ดับไป ในที่นี้จะนำไปติดระหว่างวงจรเพื่อเปิด-ปิด เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานหรือหยุดทำงาน รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างหลักการ ทำงานของระบบ Magnetic Contactor เบื้องต้น และรูปที่ 3.16 แสดงรูปสวิตช์ต่อวงจร Magnetic contactor



รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างหลักการการทำงานของระบบ Magnetic Contactor เบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 สวิตช์ต่อวงจร Magnetic contactor

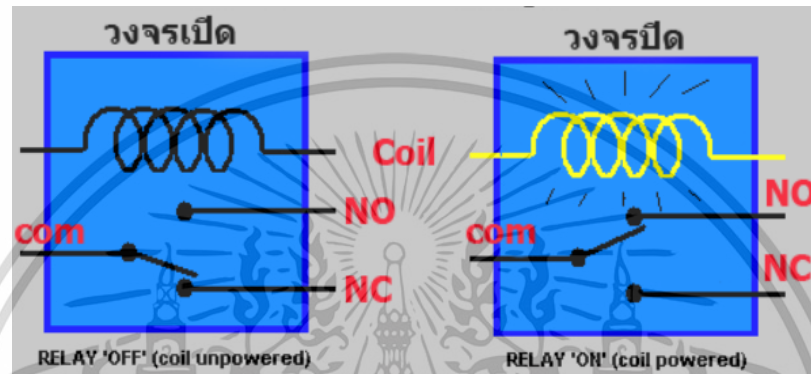
3.3.3.4 ตัวประมวลผลข้อมูล (Arduino) จะใช้เป็นตัว Arduino UNO R3 เป็นตัวที่รับข้อมูลจากผู้เขียนคำสั่งเขียนเข้าไปและเก็บคำสั่งไว้ที่ตัว Arduino UNO R3 เพื่อสั่งตัวเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ให้ทำงานได้ตามต้องการ ตัว Arduino UNO R3 ประกอบไปด้วยกัน 2 ส่วนคือ 1. ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์คือ บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ 2. ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์ ภาษา Arduino ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม MCU Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Arduino และคอมไพล์โปรแกรมและอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด จะเขียนคำสั่งใส่ตัว Arduino เพื่อจะให้ไปรับ-ส่งข้อมูลให้ตัว Accelerometer Sensor เพื่อที่จะทำงานวัดค่าความเร่งในแนวแกนและเขียนคำสั่งใส่ตัว Arduino และเพื่อจะให้ไปรับ-ส่งข้อมูลให้ตัว Infrared Photoelectric Switch Sensor เพื่อที่จะไปนับจำนวนรอบการหมุนของตัวมอเตอร์ และส่งสัญญาณให้กับหน้าจอแสดงผล (LCD) ทั้ง 2 เซ็นเซอร์นี้จะไปอธิบายอีกทีในส่วนของตัวอุปกรณ์นั้น โดยรูปที่ คือ ตัวประมวลผลข้อมูล



รูปที่ 3.17 Arduino UNO R3

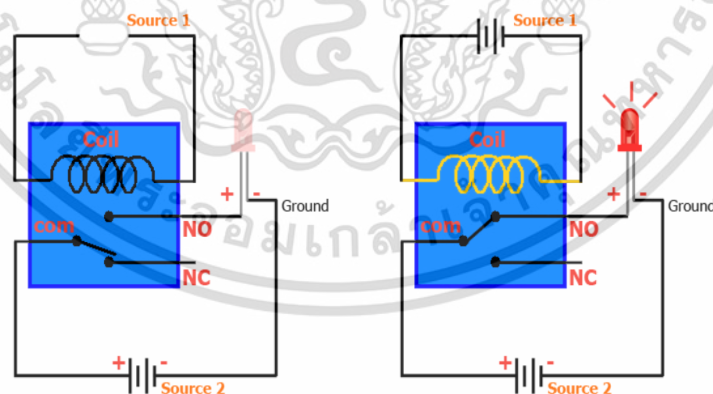
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.3.5 สวิตช์ของวงจร (Relay Module)** เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ให้กับวงจร แต่มีความสามารถต่างจากสวิตช์ทั่วไปคือ ใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวสั่งการแทนที่จะใช้มือกดเหมือนปุ่ม หรือสวิตช์อื่น ๆ และหลักการทำงานการใช้สวิตช์ของวงจรถueต้องต่อแหล่งจ่าย 2 ชุดขึ้นไป โดยชุดแรกจะจ่ายไฟให้สวิตช์ของวงจรถueและชุดที่เหลือ จะต่อให้กับวงจรถueภายนอก (หรืออาจจะใช้แหล่งจ่ายชุดเดียวแต่แยกสายให้สวิตช์ของวงจรถue กับ วงจรถueภายนอกก็ได้) เช่น เมื่อเราต้องการต่อวงจรถue LED โดยใช้ Relay เป็นตัวควบคุมการทำงาน เราจะต้องแยกแหล่งจ่ายให้ทั้ง LED และ Relay Module จะแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างแสดงการทำงานของตัวกระแสไฟฟ้ให้ตัวรีเลย์

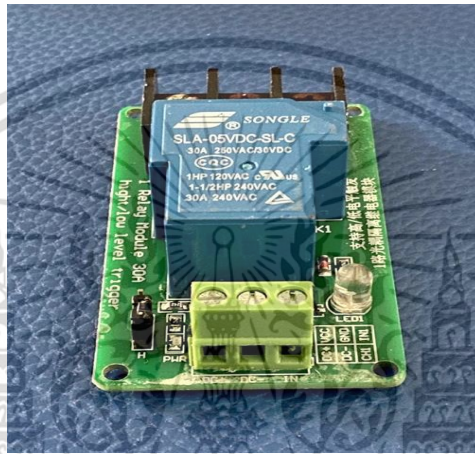
เมื่อยังไม่มีการจ่ายไฟให้กับขดลวด (Coil) ขา COM จะเชื่อมต่อกับ ขา NC (ปกติปิด) แต่เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟให้กับขดลวดแล้ว ขา COM จะสลับไปเชื่อมต่อกับขา NO (ปกติเปิด) เราใช้หลักการพื้นฐานนี้ในการสลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้ในวงจรถue จะแสดงในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างแสดงการทำงานเบื้องต้นของตัวรีเลย์เมื่อเปิดและปิด

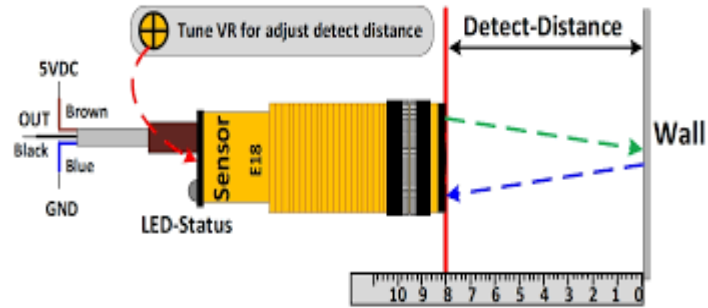
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้จะให้ทำงานคือ ใช้ไว้เพื่อทำให้กระแสไหลให้ครบวงจรไปเข้ามอเตอร์ เพราะจะมีสายไฟ 1 สายจะนำไฟไปแบ่งเป็นอีกสองสาย สายที่ 1 จะไปผ่านตัว Power Supply แปลงจาก 220 VAC ไปเป็น 12 VDC เป็นไฟเลี้ยงเพื่อไปเลี้ยงตัว Arduino, Relay Module, Accelerometer Sensor, Infrared Photoelectric Switch Sensor เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นทำงานได้อย่างปกติ ทั้งนี้กระแสอีกสายหนึ่งที่แยกออกมาจะต้องไปผ่านตัวเพื่อให้สามารถไปรวมให้เป็นเหมือนตอนที่เข้ามาทั้งหมด 3 สาย และนั่นเอง สวิตช์วงจรก็จะไปทำหน้าที่กำหนดว่าให้กระแสไฟนั้นไหลหรือไม่ไหล โดยรูปที่ 3.20 คือสวิตช์ของวงจร



รูปที่ 3.20 สวิตช์ของวงจร (Relay Module)

3.3.3.6 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ (Infrared Photoelectric Switch Sensor) จะใช้รุ่น E18-D80NK เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุที่ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นอินฟราเรด มีหัวเซ็นเซอร์หัวหนึ่งที่จะยิงคลื่นอินฟราเรดไปแล้วอีกหัวหนึ่งจะเป็นหัวที่รับการสะท้อนกลับเมื่อคลื่นอินฟราเรดไปกระทบกับวัตถุ ดังรูปที่ 3.21 ทำงานในช่วง 3-80 เซนติเมตร สามารถกำหนดระยะในการทำงานได้โดยปรับค่าที่ Potentiometer จะทำให้สามารถวัดระยะได้ใกล้หรือไกลตามกำหนดได้ ในที่นี้จะนำไปวัดรอบการหมุนของตัวมอเตอร์โดยติดใกล้ๆสายพาน เพื่อวัดรอบการหมุนแล้วโดยที่จะใช้ Arduino เพื่อทำการเขียนคำสั่งเพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุไปวัดรอบการหมุนและส่งไปยังตัว Arduino เพื่อประมวลผลหลังจากนั้นนำไปแสดงผลที่จอแสดงผล (LCD) นับค่าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมอเตอร์นั้นหยุดหมุน พอมอเตอร์หยุดทำงาน จะแสดงค่าล่าสุดค้างไว้บนหน้าจอแสดงผลและหลังจากนั้นนำมาคำนวณค่ารอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.22 คือเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ



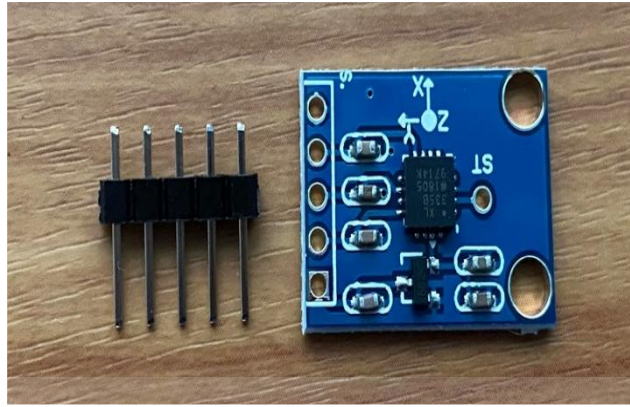
รูปที่ 3.21 การยิงคลื่นอินฟราเรดไปกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับ



รูปที่ 3.22 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ (Infrared Photoelectric Switch Sensor)

3.3.3.7 เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) เป็นเครื่องวัดความเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ เซ็นเซอร์วัดความเร่งพบได้ในสมาร์ทโฟนทั่วไปตัวอย่างการใช้งาน เช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือการเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกม เป็นต้น เหล่านี้เป็นคุณสมบัติของ Accelerometer Sensor ในการติดตั้งจะนำไปติดตั้งไว้ที่แกนส่งกำลังเพื่อดูว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร่งในแต่ละแกนและ Accelerometer Sensor จะดูการเปลี่ยนแปลงการสั่นสะเทือนที่จะทำให้เกิดการแตกหักของตัววัตถุที่นำมาทดลอง และเมื่อขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก กราฟจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนค่าความชันที่รวดเร็ว จะส่งค่าไปยังอุปกรณ์ Arduino เพื่อสั่งการให้มอเตอร์นั้นหยุดทำงานทันที โดยรูปที่ 3.23 คือเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor)

3.3.3.8 หน้าจอแสดงผล (LCD Liquid Crystal Display) ใช้แบบ 16 x 2 โดยที่จอมีแถวละ 16 ช่องตัวอักษร แต่มีทั้งหมด 2 แถวเป็นจอที่ทำมาจากผลึกคริสตัลเหลว จะแสดงผลออกมาในรูปแบบดิจิทัล หลักการคือด้านหลังจอจะมีไฟส่องสว่าง หรือที่เรียกว่า Backlight อยู่เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้นที่ผลึก ก็จะทำให้ผลึกโปร่งแสง ทำให้แสงที่มาจากไฟ Backlight แสดงขึ้นมาบนหน้าจอ จะเห็นแสงสีเหลืองบนหน้าจอนี้ ( พื้นหลัง ) และจะเห็นตัวหนังสือเป็นสีดำ ในที่นี้จะนำไปแสดงผลจำนวนค่ารอบของมอเตอร์ที่วัดจากเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ โดยรูปที่ 3.24 คือ หน้าจอแสดงผล



รูปที่ 3.24 หน้าจอแสดงผล (LCD Liquid Crystal Display)

3.3.3.9 ตัวประกอบ I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) ใช้ในการเชื่อมต่อกันแบบรับและส่งข้อมูลกับตัว LCD ที่ปกติจะใช้สายไฟ 20 เส้นในการต่อใช้งาน ทำให้บางครั้ง Arduino มีขาไม่พอที่จะควบคุมและยังทำให้การเดินสายต่อใช้งานไม่สะดวก โดยจะใช้วงจรแปลงสัญญาณสำหรับติดต่อหน้าจอ LCD แบบอินเทอร์เฟซ ( I<sup>2</sup>C ) ต่อแปลงการใช้สายไฟหลาย ๆ เส้น ให้เหลือสายไฟเพียง 4 เส้นทำให้การเขียนโปรแกรมและการต่อวงจรทำได้ง่ายขึ้น เพียงแค่ใช้ Module I<sup>2</sup>C LCD ไปต่อกับจอ LCD แบบเดิม ก็สามารถใช้งานได้ทันที Module I<sup>2</sup>C LCD นี้จะมีตัวต้านทานปรับค่าได้สำหรับปรับความสว่างหน้าจอมาด้วยทำให้สามารถเปิดไฟเต็มที่, ปิดไฟหรือหรี่ไฟได้ โดยรูปที่ 3.25 คือ ตัวประกอบ I<sup>2</sup>C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ตัวประกอบ I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit)

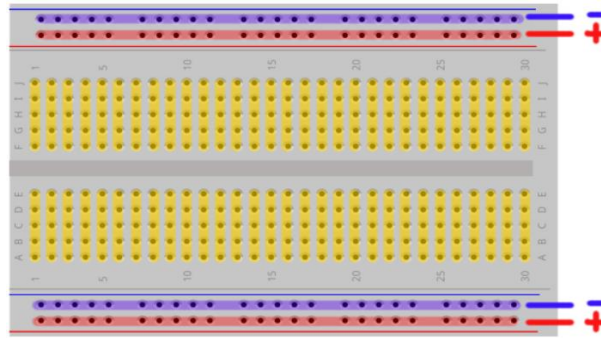
3.3.3.10 สวิตช์ปุ่มกด (Button Switch) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ตัดและต่อวงจรทางไฟฟ้าและใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ หรือการทำงานของเครื่องจักรต่าง ๆ โดยจะเขียนคำสั่งให้ตัว Arduino เพื่อสั่งการให้ปุ่มนี้ทำงานโดยที่เมื่อใส่ชิ้นงานลงไปเครื่องทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะกดปุ่มนี้ให้ตัว Arduino ทำงานตามคำสั่งที่เขียนไปให้โดยรูปที่ 3.26 คือหน้าตาของอุปกรณ์สวิตช์ปุ่มกด



รูปที่ 3.26 สวิตช์ปุ่มกด (Button Switch)

3.3.3.11 บอร์ด (Breadboard) เป็นอุปกรณ์ที่จะนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสายไฟต่าง ๆ มาเชื่อมต่อกัน โดยเสียบเข้ากับรูที่อยู่บนบอร์ด เพื่อทำเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบเพื่อใช้สำหรับทดสอบการทำงาน ก่อนจะนำไปบัดกรีลงบนแผ่นพรีนัท เพื่อใช้งานจริง โดยรูปที่ 3.27 คือ บอร์ดแถบนี้มักจะใช้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ โดยแถวหนึ่งจะเป็น Power (PWR) และอีกแถวหนึ่งจะเป็น Ground (GND) และมีการกำกับด้วยเครื่องหมายบวก (+) และเครื่องหมายลบ (-) เพื่อบอกว่าแถวไหนเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ หรืออาจจะกำกับด้วยเส้นสีแดงกับสีดำ หรือเส้นสีแดงกับสีน้ำเงิน เพื่อให้ดูได้ง่าย ซึ่งสีแดงจะหมายถึงขั้วบวกเสมอ สีน้ำเงินจะหมายถึงขั้วลบส่วนตรงกลางบอร์ดที่เป็นสีเหลือง ข้างในพลาสติกจะมีแถบทองแดงเรียงกันเป็นแถวๆขนานกับด้านกว้างของบอร์ด ตรงกลางของบอร์ดจะสามารถต่อสายขั้วบวกขั้วลบหรือสายสัญญาณได้ปกติ ซึ่งถูกแบ่งเป็นสองฝั่งด้วยร่องที่อยู่ตรงกลางซึ่งไฟจะไม่เชื่อมต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 บอร์ด (Breadboard)

3.3.3.12 สายไฟ (Jump Wire) ดังรูปที่ 3.28 คือสายไฟเส้นขนาดสั้นๆที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือเชื่อมต่อกับ Arduino ซึ่งใช้งานร่วมกับ Breadboard สาย Jump จริง ๆ แล้วก็ไม่ได้มีความแตกต่างกับสายไฟชนิดอื่น ๆ เพียงแต่ถูกตัดให้มีขนาดสั้นๆเพื่อให้ใช้งานบน Breadboard ได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 3.28 สายไฟ (Jump Wire)

3.3.3.13 มอเตอร์ (Motor) ใช้มอเตอร์ MITSUBISHI รุ่น SF-JR ชนิดหุ้มมิด กำลัง 1/2 แรงม้า (0.4 กิโลวัตต์) 3 เฟส 220/380 โวลต์ 4 โพล 3 สาย IP44 ความเร็วรอบ 1450 RPM (รอบต่อนาที) หลักการทำงานของมอเตอร์นี้ก็คือ เสียบปลั๊กแล้วรอกดปุ่ม Button Switch เพื่อพร้อมให้มอเตอร์เริ่มทำงาน โดยรูปที่ 3.29 คือ มอเตอร์



รูปที่ 3.29 มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.3.14 ตู้ไฟฟ้า (Main Distribution Board)** เป็นตู้ที่รวมอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าอันเป็นแผงจ่ายไฟ ในภาพรวม สายไฟฟ้าเมนจากมิเตอร์ของการไฟฟ้าจะถูกต่อเข้ามาที่ Breaker ในตู้นี้ ซึ่งภายใน ตู้ไฟฟ้า ประกอบไปด้วย Breaker, Magnetic Contactor, Button Switch, Relay Module, Arduino, Power Supply และ Terminal และ Ground โดยรูปที่ 3.30 คือ ตู้ไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 ตู้ไฟฟ้า (Main Distribution Board)

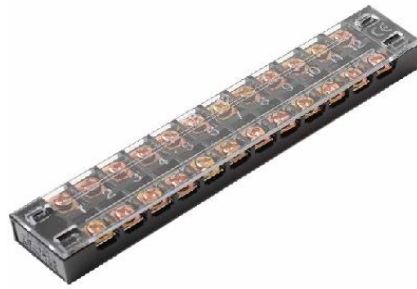
**3.3.3.15 สวิตช์ 2 ทาง (Selector Switch 2 Way)** เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมวงจรไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางของกระแสไฟฟ้าให้ตามทิศทางที่ต้องการ หรือตัดกระแสไฟไม่ให้ไหลผ่านวงจรได้ตามที่ต้องการ เป็นสวิตช์ที่ใช้งานกันมากในงานที่ต้องควบคุมการทำงานด้วยมือ โดยการบิดให้คอนแทค ที่อยู่ในเปลี่ยนสถานะปิด (NC) หรือเปิด (NO) โดยรูปที่ 3.31 คือ สวิตช์ 2 ทาง



รูปที่ 3.31 สวิตช์ 2 ทาง (Selector Switch 2 Way)

**3.3.3.16 อุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟ (Terminal Board)** คือ อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างสายไฟด้านหนึ่งเข้ากับสายไฟอีกด้านหนึ่ง หรือใช้เป็นจุดพักสายไฟ เพื่อให้ง่ายและรวดเร็วในการซ่อมบำรุง อุปกรณ์หรือเพื่อเก็บสายไฟให้เป็นระเบียบ สามารถตรวจสอบจุดที่มีปัญหาต่าง ๆ ได้ง่าย โดยรูปที่ 3.32 คืออุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟ (Terminal Board)

3.3.3.17 ตัวตัดไฟ (Overload Relay) เป็นอุปกรณ์ป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าเกินกำลังหรือป้องกันมอเตอร์ไม่ให้เกิดการเสียหายเมื่อมีกระแสไหลเกินพิกัดในการทำงานของโหลด จะไปวางระหว่างตัว สวิตช์ต่อวงจรและมอเตอร์ ในสภาวะปกติจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านเพื่อให้กระแสไหลไปยังมอเตอร์ แต่ถ้ากระแสเกินโอเวอร์โหลดจะตัดไฟที่ส่งไปยังมอเตอร์ทันทีเพื่อไม่ให้มอเตอร์ได้รับความเสียหาย



รูปที่ 3.33 ตัวตัดไฟ (Overload Relay)

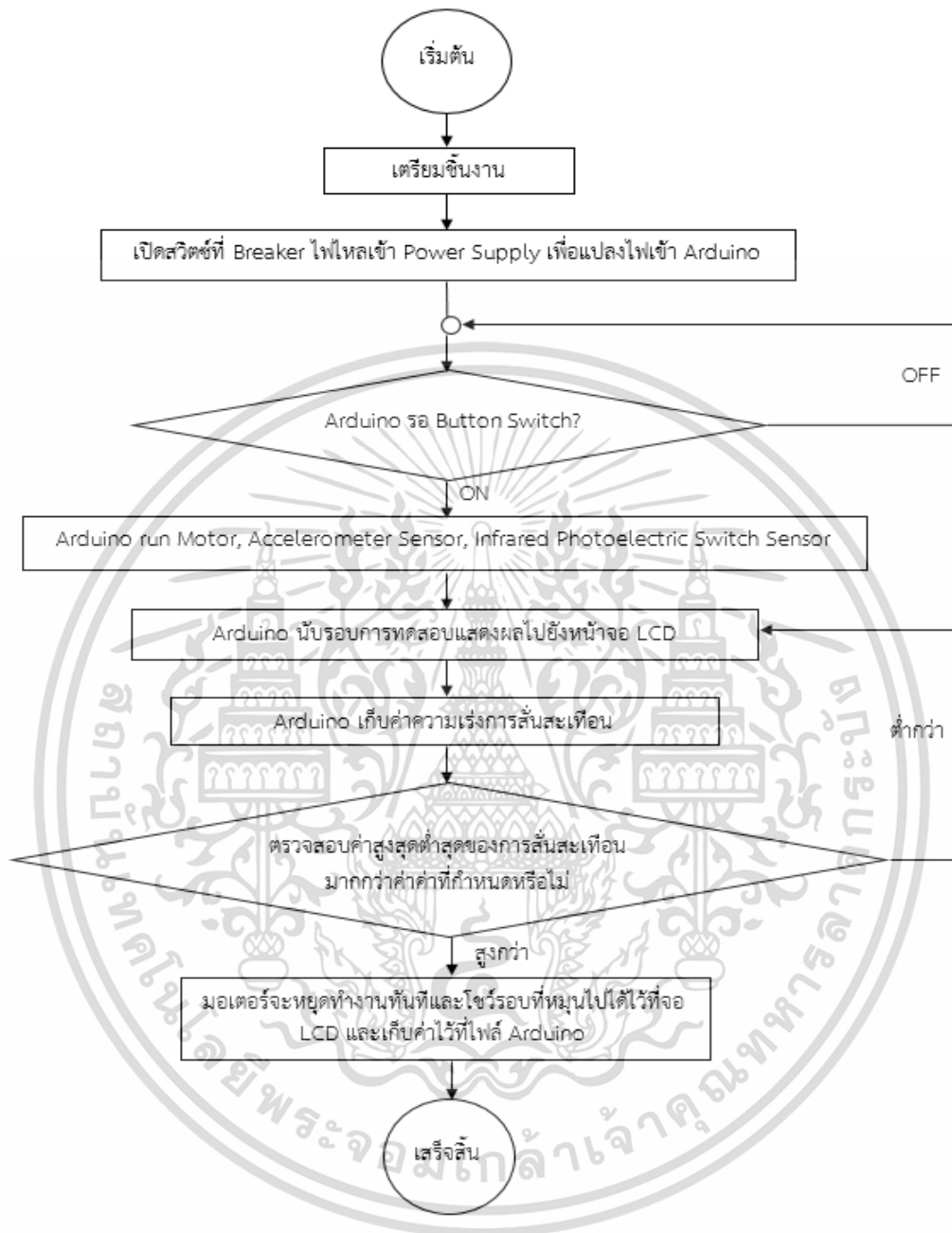
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทำงานของระบบไฟฟ้า

เริ่มจากการต่อสายไฟทั้ง 3 เฟส L1, L2, L3 ในการการแยกสายที่หนึ่ง ( L1 ) เป็น 3 ทาง และสายของ L2 และ L3 เพื่อสาย L1 ทางแรกต่อไปยัง Power Supply เพื่อที่ว่า Power Supply จะไปแปลงไฟจาก 220 VAC ไปเป็น 12 VDC เพื่อที่จะนำไฟ 12 VDC ไปต่อกับ Arduino และเพื่อที่ Arduino จะไปต่อกับอุปกรณ์ Infrared Photoelectric Switch Sensor, Accelerometer Sensor, Relay Module, Button Switch, LCD Liquid Crystal Display เพื่อที่ Arduino จะเขียนคำสั่งเพื่อรับและส่งข้อมูลไปยังตัวอุปกรณ์ต่างๆ และยังต่อไฟไปยังอุปกรณ์เหล่านี้เพื่อที่จะให้ทำงานพร้อมกันทั้งหมด Arduino จะทำการสั่งการก็ต่อเมื่อกดสวิทช์ที่ปุ่ม Button Switch จะทำให้ Infrared Photoelectric Switch Sensor นี้รอบการหมุนของ Motor และแสดงค่าไว้ที่ LCD Liquid Crystal Display และสั่งการให้ Accelerometer Sensor วัดการสั่นสะเทือนของแขนส่งกำลัง และส่งไฟไปยัง Relay Module เพื่อที่จะทำให้ Relay Module ไปเปิดหน้าคอนแทค เพื่อให้ Magnetic Contactor ทำงาน ทำให้กระแสสามารถไหลไปยัง Motor ได้โดยการทำงานของ Magnetic Contactor ทำงานได้โดย สายไฟสายที่สองที่แยกมาจาก L1 จะไปผ่านตัว Relay Module เพื่อที่จะไปต่อกับตัว Magnetic Contactor เมื่อไฟ 220 VAC จากสายที่ L1 มาทำให้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อ สาย L1 (ทางที่ 3), L2, L3 จะสามารถไหลผ่าน Magnetic Contactor และผ่าน Overload Relay ยังมอเตอร์ได้ สำหรับการงานจะเริ่มด้วยการเสียบปลั๊กไฟ 3 เฟส 380 VAC ต่อกับตัวมอเตอร์เพื่อให้ออเตอร์พร้อมในการทำงาน (ขณะที่เสียบปลั๊กเรียบร้อยแล้วมอเตอร์จะยังไม่ทำงาน) หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่จะทดสอบไปวางและปิดเครื่องทดสอบ(ยกแขนส่งกำลังลงมาปิด)ให้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะสับสวิทช์ที่ Breaker ทำให้จะมีไฟไหลไปยังอุปกรณ์ Power Supply เพื่อที่ Power Supply จะไปแปลงไฟจาก 220 VAC ไปเป็น 12 VDC ให้กับ Arduino ก่อนหลังจากผู้ทดลองตรวจสอบดูว่าทุกอย่างพร้อมหรือไม่ ถ้าพร้อม ผู้ทดลองจะทำการกด Button Switch นั้น กระแสไฟจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ มอเตอร์จะเริ่มทำงานโดยหลักการคือ Arduino จะส่งกระแสไฟไปยังตัว Relay Module เพื่อให้ขดลวดในตัวรีเลย์สร้างสนามแม่เหล็กทำให้ไฟ 220 VAC จากสาย L1 เส้นที่ 2 สามารถไหลไปทำให้ขดลวดของ Magnetic Contactor สร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อทำให้สายไฟเชื่อมต่อกันทำให้ไฟสามารถไหลไปยังมอเตอร์ได้ และในเวลาเดียวกันตอนที่กดปุ่ม Button Switch อุปกรณ์ Arduino จะสั่งการให้ตัว Accelerometer Sensor วัดความเร่งในแนวแกนของตัวแขนส่งกำลังแล้วส่งไปให้ตัว Arduino ประมวลผลรับรู้ถึงการสั่นของแขน และสั่งตัว Infrared photoelectric switch Sensor นับจำนวนรอบของการหมุนของมอเตอร์เริ่มต้นที่ 0 รอบ แล้วส่งไปให้ Arduino ประมวลผลแล้วส่งค่าที่นับไปแสดงที่หน้าจอ ประมวลผล (LCD) เมื่อรอบเปลี่ยนค่าที่แสดงในหน้าจอประมวลผล ก็จะเปลี่ยนตามค่านั้นและพอวัสดุชิ้นงานเกิดการแตกหักจากค่าที่วัดได้จาก Accelerometer Sensor จะส่งค่าไปยังอุปกรณ์ Arduino และอุปกรณ์ Arduino นั้นจะสั่งให้ Relay Module หยุดการทำงานทำให้ออเตอร์หยุดทำงานทันทีและจะแสดงค่ารอบที่มอเตอร์นั้นได้ทำงานไปแล้วสุดที่วัดได้ไว้ และจะเก็บค่าไว้ที่ตัวชิพ Arduino แต่เมื่อมีกระแสเกินตัว Overload Relay จะทำหน้าที่ตัดกระแสเพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3.33 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบความล้าของโลหะ

1. จัดทำชิ้นทดสอบ โดยตัดมาจากเหล็กทรงรถไฟรุ่น UIC54 กลึงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 9 มิลลิเมตร
2. ติดตั้งชิ้นทดสอบกับลูกเหล็ก 2 ลูก โดยชิ้นทดสอบสวมอยู่ระหว่างลูกกลิ้งตัวส่งและลูกเหล็ก ลูกเหล็กอยู่ระหว่างชิ้นทดสอบและลูกกลิ้งนำทาง
3. ยกแขนส่งถ่ายแรงมาให้ตัวลูกกลิ้งตัวส่งสัมผัสกับชิ้นทดสอบ
4. ติดตั้งสปริงกดบริเวณปลายของแขนส่งถ่ายแรง
5. ติดตั้งแผ่นอะคริลิกบริเวณด้านข้างสำหรับป้องกันน้ำมันกระเด็นระหว่างทดสอบ
6. เปิดเครื่องวัดความเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Accelerometer) และเครื่องวัดรอบการหมุนของมอเตอร์
7. เปิดการทำงานของมอเตอร์และตัวฉีดน้ำมันหล่อลื่น
8. ตั้งค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ระหว่างชิ้นทดสอบกับลูกเหล็กไปที่ 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 และ 3.50 GPa โดยปรับจากแรงกดที่ได้จากสปริง (การคำนวณสามารถดูได้จากหัวข้อถัดไป)
9. บันทึกค่าจำนวนรอบที่ชิ้นงานเกิดความเสียหาย
10. นำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าอายุการใช้งานของวัตถุที่มีโอกาสชำรุด 10 % ( $L_{10}$  Life)

#### 4.2 ผลการทดสอบ

##### 4.2.1 การคำนวณค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ระหว่างชิ้นทดสอบกับลูกเหล็ก

การหาค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ระหว่างชิ้นทดสอบกับลูกเหล็กนั้นจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติของวัตถุที่นำมาใช้คำนวณ ซึ่งชิ้นทดสอบและลูกบอลเหล็กที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติดูได้จากตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** แสดงคุณสมบัติของชิ้นทดสอบและลูกบอลเหล็ก

คุณสมบัติทางวัสดุ	รางรถไฟ	ลูกบอลเหล็ก
รหัสวัสดุ	UIC54	G20 Chrome steel ball
ชนิดโลหะ	900A	SUJ2
มาตรฐาน	EN13674	ISO3290
Young's modulus; $E$	210 GPa	207 GPa
Poisson's ratio; $\nu$	0.3	0.3

นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ตามสมการที่ (2.30) ถึงสมการที่ (2.38) เพื่อหาระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน  $x$ , แกน  $y$  และความลึกตรงรอยกดตามค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ แสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** แสดงระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน  $x$ , แกน  $y$  และความลึกตรงรอยกดตามความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์แต่ละค่า

ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (GPa)	ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน $x$ (mm)	ระยะของพื้นที่สัมผัสตามแนวแกน $y$ (mm)	ความลึกตรงรอยกด (mm)
1.00	0.1010	0.0449	0.0009
1.50	0.1514	0.0673	0.0020
2.00	0.2020	0.0897	0.0036
2.50	0.2523	0.1121	0.0055
3.00	0.3025	0.1344	0.0080
3.50	0.3535	0.1570	0.0109

นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยทฤษฎีการสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ตามสมการที่ (2.30) ถึงสมการที่ (2.38) เพื่อหาแรงกดระหว่างลูกกลิ้งตัวส่งกับชิ้นทดสอบและแรงกดของสปริงที่ต้องใส่ตามค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ แสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แสดงแรงกดระหว่างลูกกลิ้งตัวส่งกับชิ้นทดสอบและแรงกดของสปริงที่ต้องใส่ตามความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์แต่ละค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (GPa)	แรงกดระหว่างลูกกลิ้งตัวส่งกับ ชั้นทดสอบ (N)	แรงกดของสปริงที่ต้องใส่ (N)
1.00	9.5	3.27
1.50	32	11.00
2.00	76	26.13
2.50	148	50.89
3.00	255	87.68
3.50	407	139.95

#### 4.2.2 การทำนายค่าอายุการใช้งานของวัสดุที่มีโอกาสชำรุด 10 % ( $L_{10}$ Life) โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ (Weibull distribution)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการกระจายไวบูลล์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการพล็อตกราฟความน่าจะเป็น (Probability plot) วิธีการประมาณค่าความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum likelihood estimation) ซึ่งวิธีการที่เป็นที่ยอมรับระดับสากลว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของการกระจายไวบูลล์ที่มีข้อมูลน้อยถึงปานกลาง คือ วิธีโค้งถดถอยของข้อมูลลำดับมัชฌิมา รูปสถิติ (Median rank regression curve fitting)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการกระจายวิธีการถดถอยลำดับเป็นวิธีการหาเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุด (Least square error) โดยการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง  $Y = AX + B$  ซึ่งเราไม่สามารถหาจริงได้ แต่เราสามารถหาค่าประมาณของ  $\bar{Y} = \hat{A}\bar{X} + \hat{B}$  โดยที่  $\hat{A}$  คือค่าประมาณของ A,  $\hat{B}$  คือค่าประมาณของ B,  $\bar{X}$  และ  $\bar{Y}$  คือค่าเฉลี่ย ของ X และ Y ตามลำดับ โดยที่กำหนดให้ X และ Y มีค่าดังนี้

$$X = \ln(\text{Design Cycles}) \quad (5.1)$$

$$Y = \ln(\ln(1 / (1 - \text{Median Rank}))) \quad (5.2)$$

การคำนวณค่าลำดับมัชฌิมาของเวลาขัดข้อง (Time to fail: TTF) หาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{Median Rank} = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (5.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \tag{5.4}$$

$$\beta = \hat{A} \tag{5.5}$$

$$\eta = e^{-\left(\frac{\hat{B}}{\beta}\right)} \tag{5.6}$$

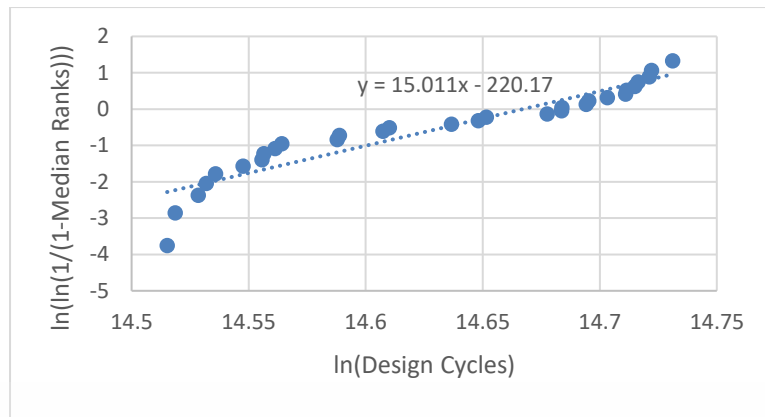
ด้วยการใช้วิธีที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความน่าจะเป็น (Probability plot) และกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เพื่อหาค่าอายุการใช้งานของวัตถุที่มีโอกาสชำรุด 10 % ( $L_{10}$  Life) ต่อไปได้

#### 4.2.2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

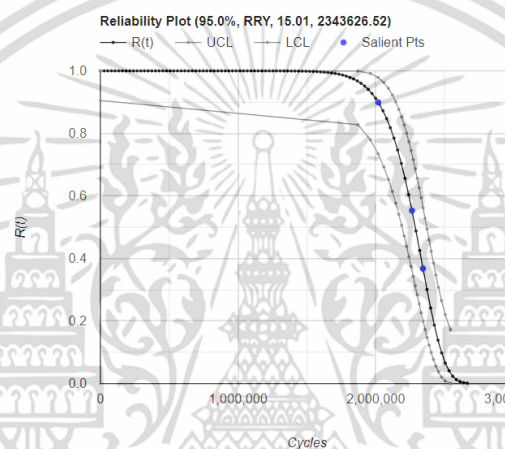
การวิเคราะห์การกระจายไวบูลล์ในโปรแกรม Microsoft Excel ต้องการการเตรียมการเล็กน้อย โดยในที่นี้จะวิเคราะห์โดยสมมติว่าได้นำขั้นทดสอบมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการล้าจำนวน 30 ครั้งต่อค่าความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์จำนวน 6 ค่า มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

A	B	C	D	E	F	G	H
Rank	Design Cycles (Random)	Design Cycles (low to high)	Median Ranks	1/(1-Median Ranks)	ln(Design Cycles)	n(ln(1/(1-Median Ranks)))	
1							
2							
3	1	45916264	40017428	0.023026316	1.023569024	17.50482562	-3.759492383
4	2	42283723	40043330	0.055921053	1.059233449	17.50547268	-2.855179589
5	3	42600348	40054350	0.088815789	1.097472924	17.50574784	-2.375046166
6	4	44956358	40198096	0.121710526	1.138576779	17.50933019	-2.041921944
7	5	44300042	41021083	0.154605263	1.182879377	17.52959671	-1.784079338
8	6	40949055	41451876	0.1875	1.230769231	17.5400437	-1.571952527
9	7	44145723	41543595	0.220394737	1.282700422	17.54225392	-1.390432871
10	8	43138735	41763032	0.253289474	1.339207048	17.5475221	-1.230735471
11	9	46647335	42373331	0.286184211	1.400921659	17.56202974	-1.087285634
12	10	41716437	43205044	0.319078947	1.468599034	17.58146781	-0.956308602
13	11	45580522	43226622	0.351973684	1.543147208	17.58196711	-0.83511642
14	12	46437415	43466942	0.384868421	1.625668449	17.58751125	-0.721713162
15	13	42111624	43662365	0.417763158	1.717514124	17.59199708	-0.614561592
16	14	48013037	43971732	0.450657895	1.820359281	17.59905753	-0.512437107
17	15	47851556	44627042	0.483552632	1.936305732	17.61385056	-0.414331454
18	16	43153946	45547059	0.516447368	2.068027211	17.63425661	-0.319385883
19	17	47855840	45618918	0.549342105	2.218978102	17.63583306	-0.226841912
20	18	45803880	45778150	0.582236842	2.393700787	17.63931746	-0.136002311
21	19	47077046	45900500	0.615131579	2.598290598	17.64198657	-0.046197074
22	20	42767712	46006905	0.648026316	2.841121495	17.64430205	0.043249957
23	21	41624145	46068268	0.680921053	3.134020619	17.64563494	0.133058413
24	22	43463441	46275641	0.713815789	3.494252874	17.65012627	0.224038817
25	23	42602230	46791685	0.746710526	3.948051948	17.66121607	0.317160007
26	24	45600887	46933085	0.779605263	4.537313433	17.66423342	0.413654868
27	25	42797951	47151458	0.8125	5.333333333	17.66887549	0.515201894
28	26	45220327	47963127	0.845394737	6.468085106	17.68594309	0.624268642
29	27	45957727	48877320	0.878289474	8.216216216	17.70482404	0.744842544
30	28	47501352	48931519	0.911184211	11.25925926	17.70593231	0.8842595
31	29	42985883	49429207	0.944078947	17.88235294	17.71605204	1.059113847
32	30	45830921	49659934	0.976973684	43.42857143	17.72070901	1.327371391
33							
34	<b>Coefficient</b>	<b>Beta/Alpha</b>					
35		17.088				17.088	
36		-301.49				45964295.49	
37							
38	<b>Cycles</b>	<b>Survival.Prob.</b>					
39		0				1	
40		5000000				1	
41		10000000				1	
42		15000000				0.999999995	
43		20000000				0.999999332	
44		25000000				0.999969762	
45		30000000				0.999318514	
46		35000000				0.990547847	
47		40000000				0.911178897	
48		45000000				0.498541387	
49		50000000				0.014806976	
50		55000000				4.72923E-10	
51		60000000				0	

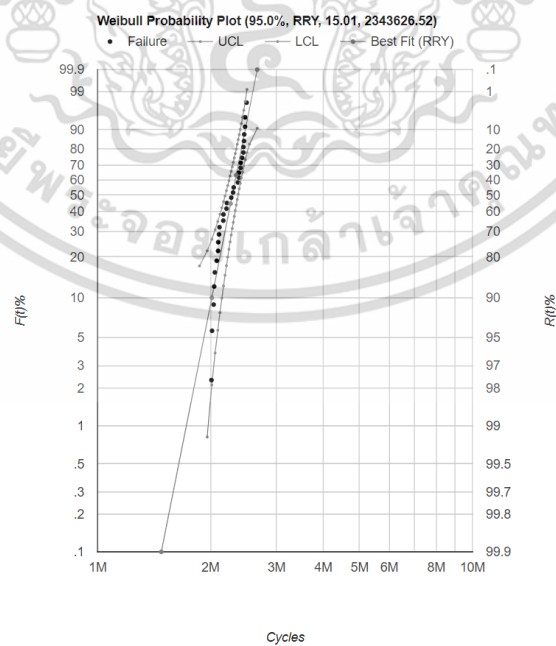
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์การกระจายไวบูลล์ใน Microsoft Excel ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุด



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot)



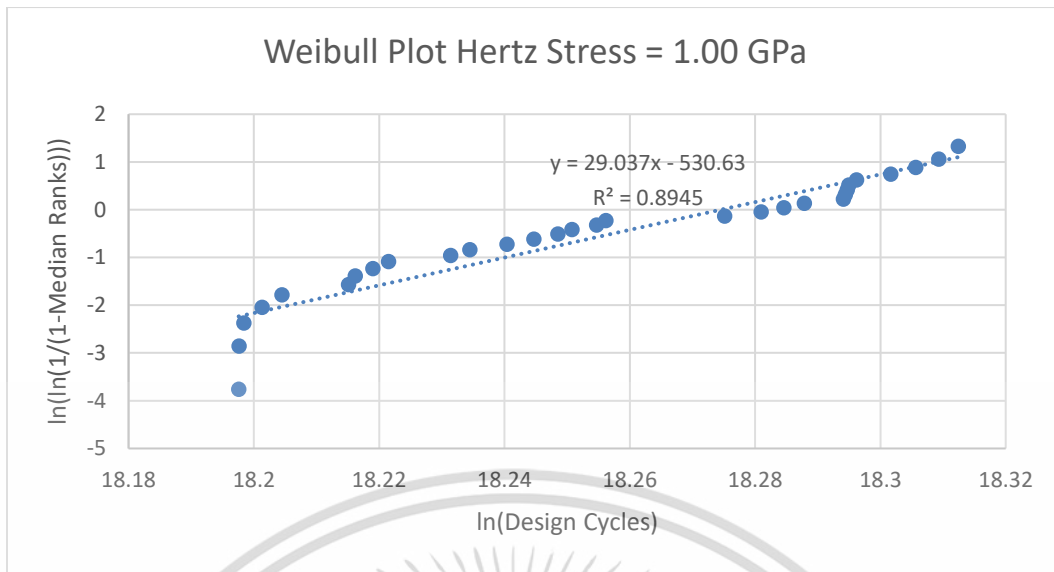
รูปที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (Weibull probability plot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

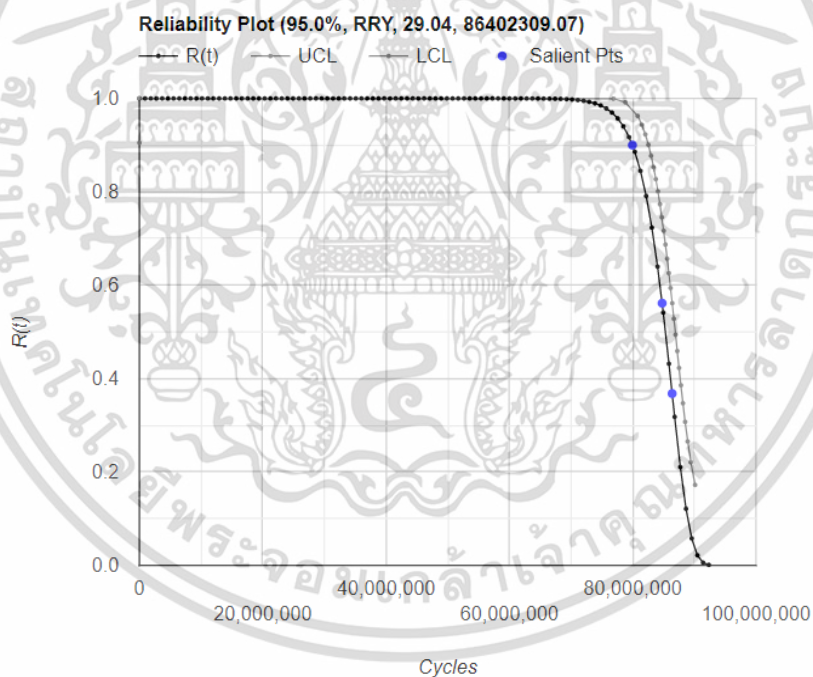
1. ในเซลล์ A3 ถึง A32 ใส่ค่าจำนวนลำดับ 1-30
2. ในเซลล์ C3 ถึง C32 ให้ใส่ค่าจำนวนรอบของชั้นทดสอบที่วัดได้เมื่อเกิดความเสียหายจำนวน 30 ค่า (ในที่นี้ได้ทำการสุ่มค่ามาทั้งหมด 30 ค่า)
3. ในเซลล์ D3 ใส่สมการ  $=((A3-0.3)/(30+0.4))$  จากนั้นคัดลอกเซลล์ D3 ลงมาจนถึงเซลล์ D32
4. ในเซลล์ E3 ใส่สมการ  $=1/(1-D3)$  จากนั้นคัดลอกเซลล์ E3 ลงมาจนถึงเซลล์ E32
5. ในเซลล์ G3 ใส่สมการ  $=LN(C3)$  จากนั้นคัดลอกเซลล์ G3 ลงมาจนถึงเซลล์ G32
6. ในเซลล์ H3 ใส่สมการ  $=LN(LN(E3))$  จากนั้นคัดลอกเซลล์ H3 ลงมาจนถึงเซลล์ H32
7. พล็อตกราฟโดยให้ข้อมูลในแกน X คือ G3:G32 ข้อมูลในแกน Y คือ H3:H32 แล้วสร้างเส้นแนวโน้มแบบเส้นตรงขึ้น ( $Y = AX + B$ )
8. ในเซลล์ B35 ใส่ค่าสัมประสิทธิ์  $A$  จากเส้นแนวโน้มแบบเส้นตรง
9. ในเซลล์ B36 ใส่ค่าสัมประสิทธิ์  $B$  จากเส้นแนวโน้มแบบเส้นตรง
10. ในเซลล์ C35 ใส่สมการ  $=B35$
11. ในเซลล์ C36 ใส่สมการ  $=EXP(-B36/B35)$
12. ในเซลล์ B39:B51 ใส่ค่าจำนวนรอบตั้งแต่ 0-6,000,000 รอบ โดยเพิ่มขึ้นทีละ 500,000 รอบ
13. ในเซลล์ C39 ใส่สมการ  $=1-WEIBULL.DIST(B39, \$C\$35, \$C\$36, TRUE)$  จากนั้นคัดลอกเซลล์ C39 ลงมาจนถึงเซลล์ C51
13. พล็อตกราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) โดยให้ข้อมูลในแกน X คือ B39:B51 ข้อมูลในแกน Y คือ C39:C51

#### 4.2.2.2 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่า 1.00 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

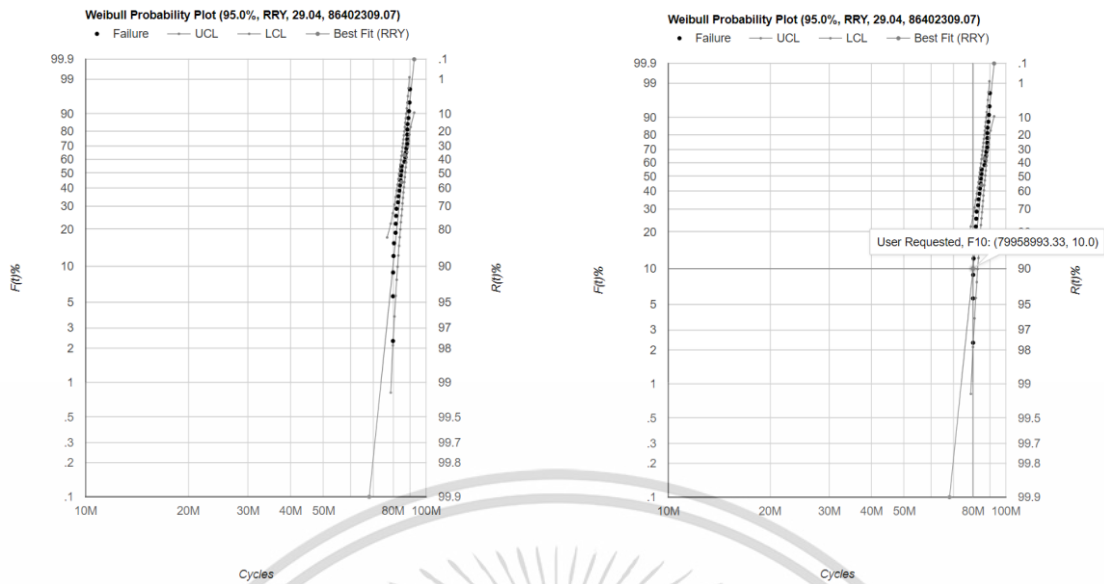


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาชีวิตซึ่งที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.00 GPa



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีเรตซ์มีค่าเท่ากับ 1.00 GPa

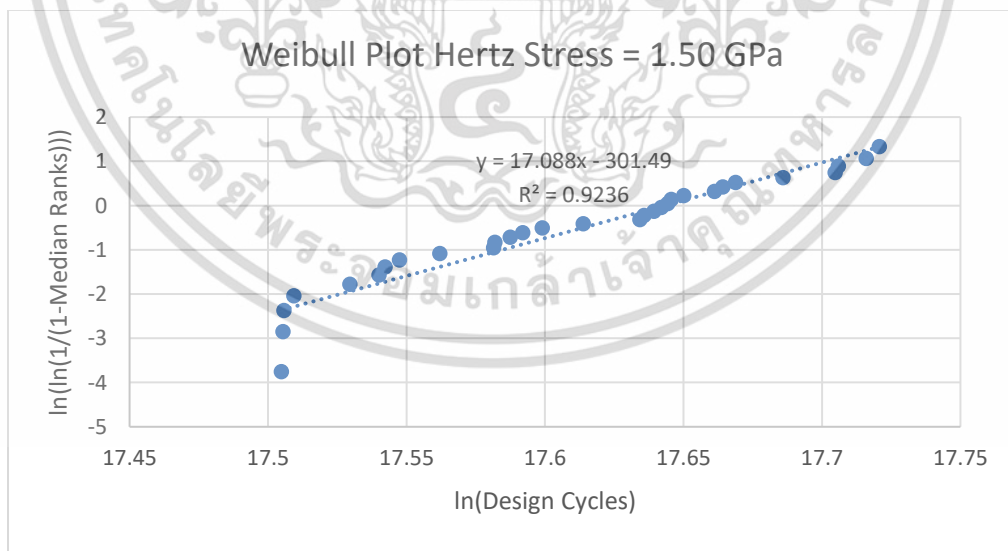
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.00 GPa

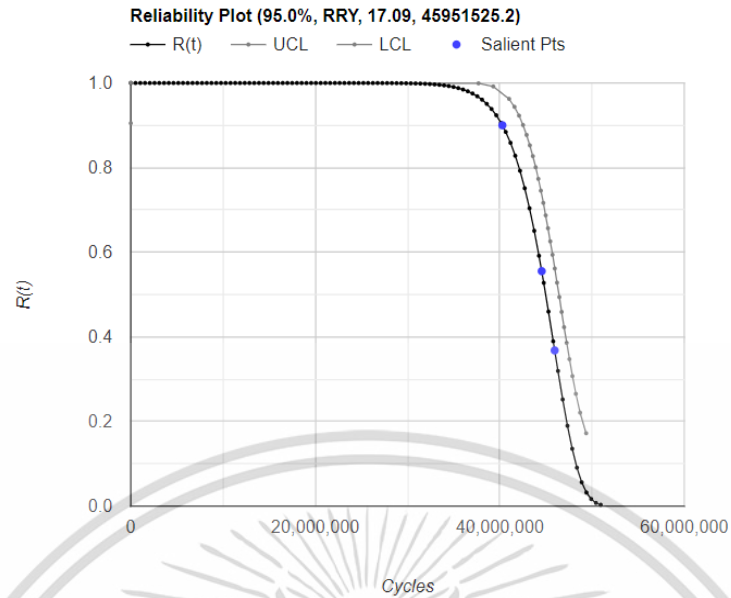
#### 4.2.2.3 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.50 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

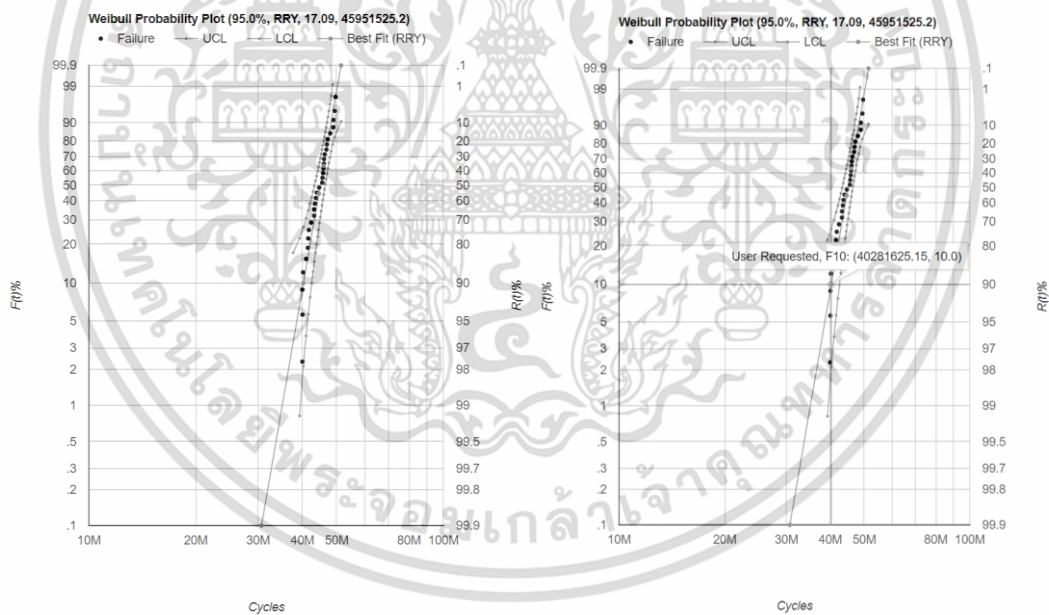


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่าเท่ากับ 1.50 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเอิร์ทซ์มีค่าเท่ากับ 1.50 GPa

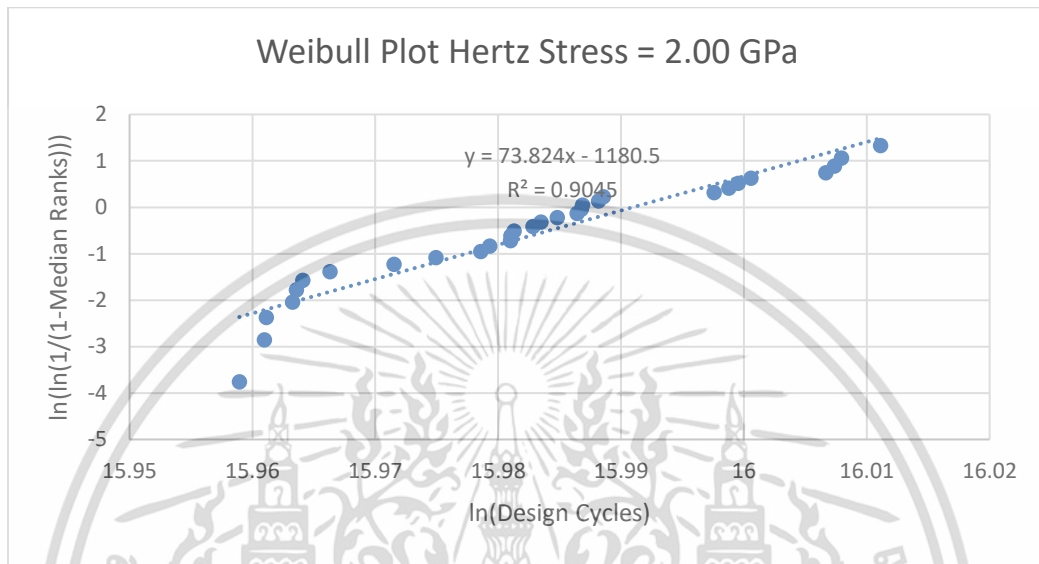


รูปที่ 4.10 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเอิร์ทซ์มีค่า 1.50 GPa

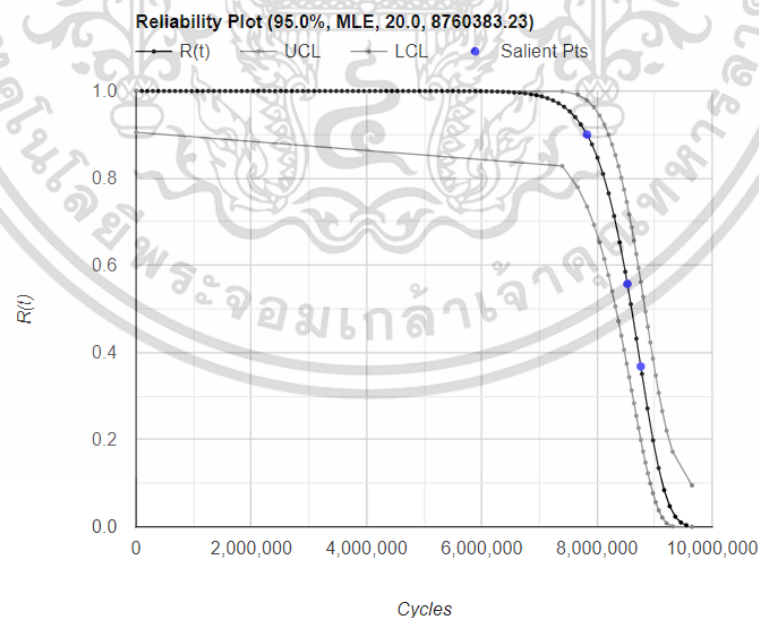
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.4 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 2.00 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้อมาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

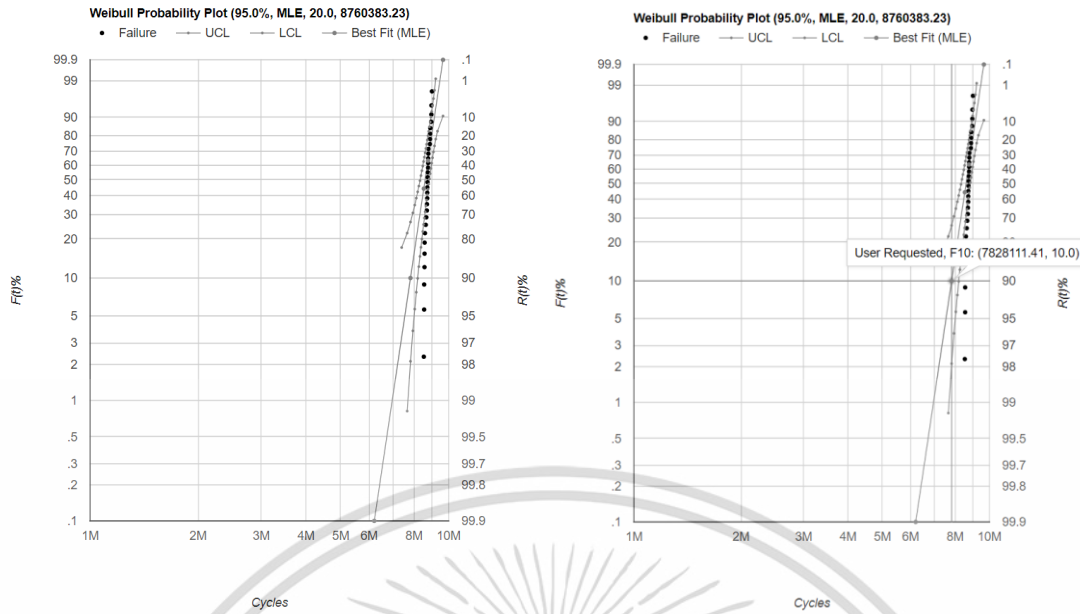


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาชีวิตซึ่งที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่าเท่ากับ 2.00 GPa



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่าเท่ากับ 2.00 GPa

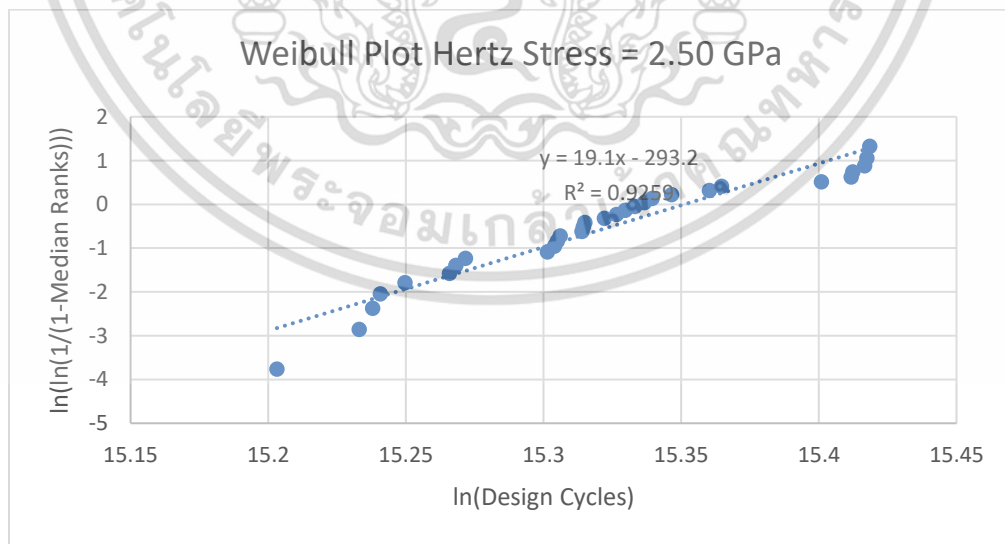
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์เฮิร์ตซ์มีค่า 2.00 GPa

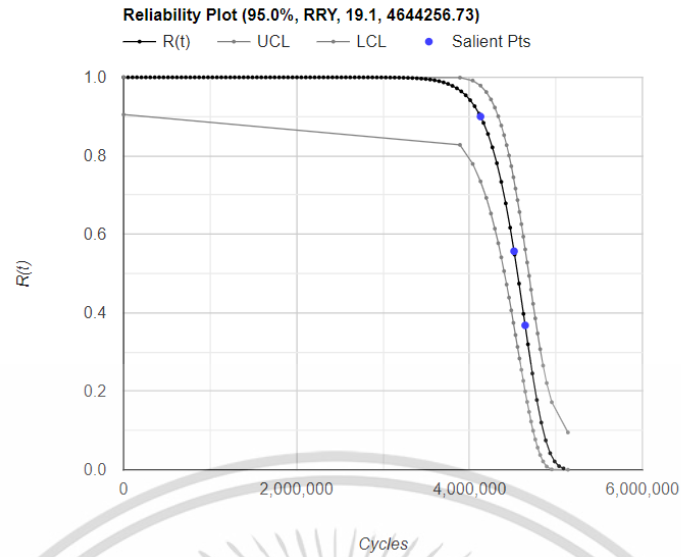
#### 4.2.2.5 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมพัทธ์เฮิร์ตซ์มีค่า 2.50 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

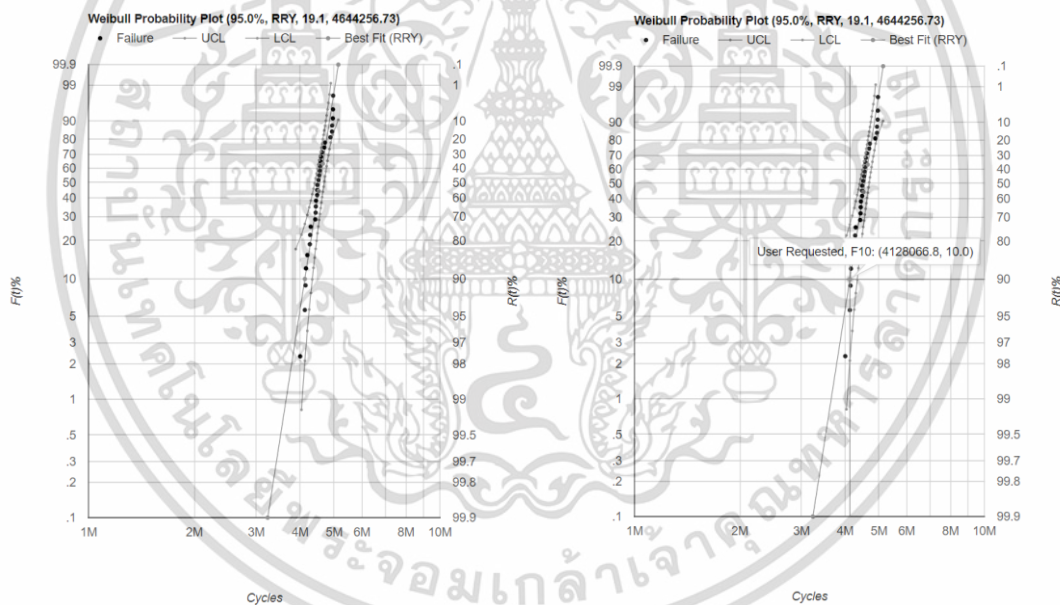


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์เฮิร์ตซ์มีค่าเท่ากับ 2.50 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเอิรตซ์มีค่าเท่ากับ 2.50 GPa

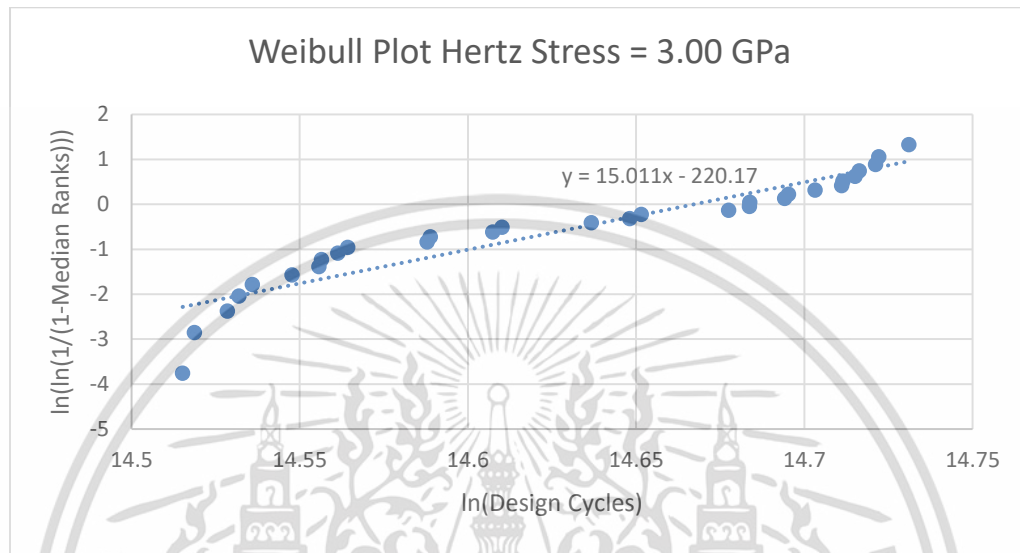


รูปที่ 4.16 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเอิรตซ์มีค่า 2.50 GPa

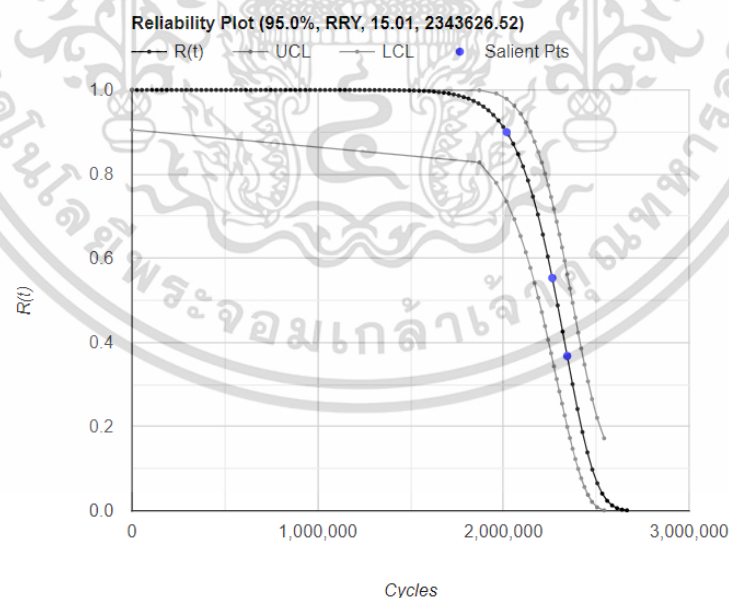
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.6 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสฮีรตซ์มีค่า 3.00 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

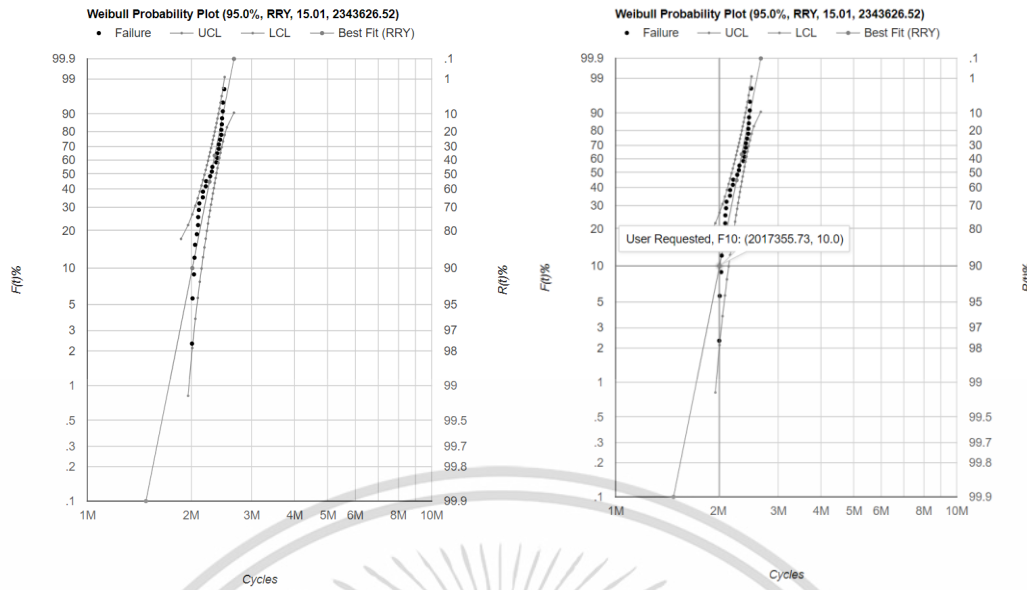


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.00 GPa



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสฮีรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.00 GPa

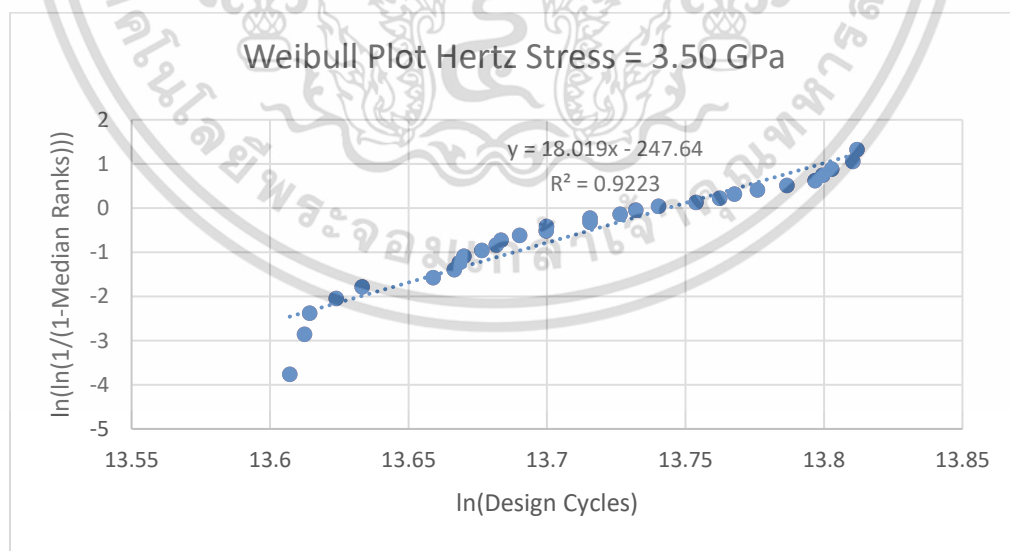
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.00 GPa

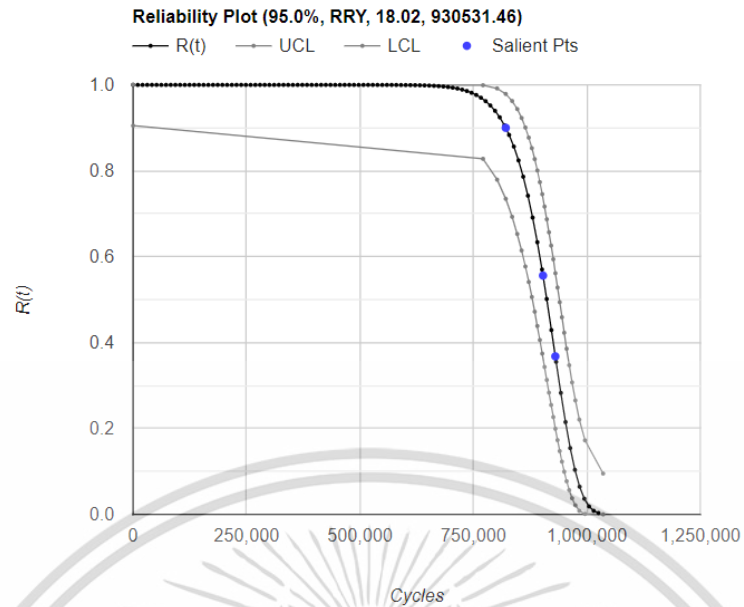
#### 4.2.2.7 การกระจายไวบูลล์เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.50 GPa

จากการสร้างฟังก์ชันการกระจายไวบูลล์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และเขียนกราฟความน่าจะเป็นของอัตราการรอดและกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ได้ดังนี้

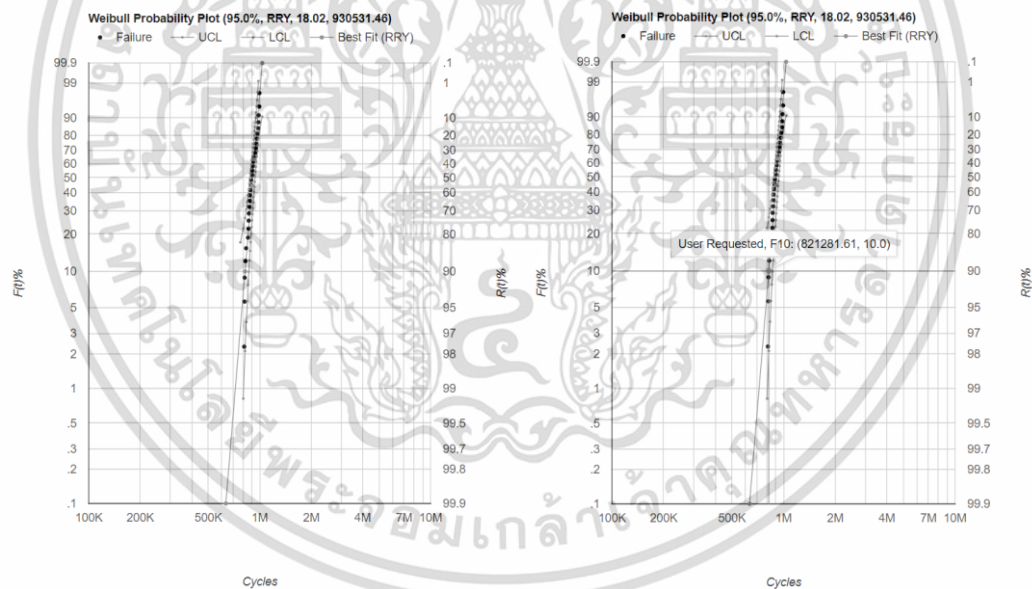


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงเส้นตรงตัวแทนชุดข้อมูลเวลาขัดข้องที่มีค่าความผิดพลาดกำลังสองต่ำที่สุดเมื่อค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่าเท่ากับ 3.50 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของอัตราการรอด (Survival probability plot) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่าเท่ากับ 3.50 GPa

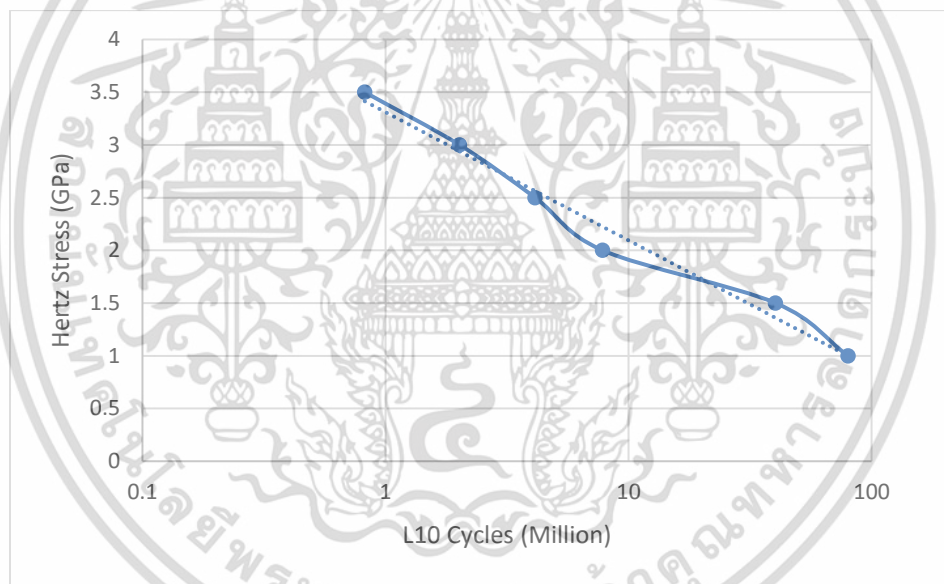


รูปที่ 4.22 กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ซ้าย) และค่า  $L_{10}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลล์ (ขวา) เมื่อค่าความเค้นสัมพัทธ์ฮีโรตซ์มีค่า 3.50 GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลลีในแต่ละค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์ ค่า  $L_{10}$  ที่อ่านได้จากกราฟมีค่าดังนี้

- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 79,958,994 รอบ
- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 1.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 40,281,626 รอบ
- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 2.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 7,828,112 รอบ
- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 2.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 4,128,067 รอบ
- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 2,017,356 รอบ
- เมื่อความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์มีค่า 3.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 821,282 รอบ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $L_{10}$  และค่าความเค้นสัมผัสเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

- 1) สามารถสร้างเครื่องทดสอบความล้าจากการสัมผัสสกลิ่งแบบ Cylinder-to-ball ตรงตามที่ต้องการ ออกแบบไว้และถูกต้องตามหลักวิศวกรรมการออกแบบเครื่องจักรกล
- 2) เครื่องทดสอบความล้าจากการสัมผัสสกลิ่งแบบ Cylinder-to-ball สามารถทดสอบวัสดุได้หลายชนิด โดยเฉพาะแต่วัสดุล้อยและรางของรถไฟเพียงอย่างเดียวเท่านั้น
- 3) จากการศึกษาการจำลองแนวโน้มความล้าของเหล็กทรงรถไฟ UIC54 โดยขึ้นทดสอบที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 9 มิลลิเมตร โดยการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้เวลาสัมผัสฮีตซ์ที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างลูกบอลเหล็กและขึ้นทดสอบที่แตกต่างกัน คือ 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 และ 3.50 GPa พบว่าเมื่อเราเพิ่มความเค้นสัมผัสฮีตซ์ ส่งผลให้แรงสปริงที่ใส่ให้กับแกนถ่ายส่งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้จำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นไปด้วย
- 4) จากการวิเคราะห์กราฟความน่าจะเป็นของการกระจายไวบูลลินในแต่ละค่าความเค้นสัมผัสฮีตซ์ ค่า  $L_{10}$  ที่อ่านได้จากกราฟมีค่าดังนี้
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 1.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 79,958,994 รอบ
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 1.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 40,281,626 รอบ
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 2.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 7,828,112 รอบ
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 2.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 4,128,067 รอบ
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 3.00 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 2,017,356 รอบ
  - เมื่อความเค้นสัมผัสฮีตซ์มีค่า 3.50 GPa ค่า  $L_{10}$  จะมีค่าเท่ากับ 821,282 รอบ

#### 5.1 ข้อเสนอแนะ

- 1) ะไหล่บางตัวของเครื่องทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น เช่น แบริ่งสามารถเปลี่ยนไปใช้แบริ่งที่มีคุณภาพที่สูงขึ้น เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครื่องทดสอบ
- 2) ถ้าต้องการให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีความผิดพลาดน้อยลง ควรทดสอบชิ้นงานให้มากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ถ้าต้องการให้เครื่องทดสอบความล้าจากการสัมผัสสิ่งก่อสร้างขึ้นเป็นเครื่องทดสอบที่ได้มาตรฐาน ควรนำเครื่องทดสอบไปทำการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดกับสถาบันที่ได้มาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Galbato, A.T. (1982). *Methods of Testing for Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels*. American Society for Testing and Materials, pp. 169-189.
- [2] Glover Douglas. (1982). *A Ball-Rod Rolling Contact Fatigue Tester*, American Society for Testing and Materials, pp. 107-124.
- [3] Eric E. Magel. (2011). *Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review*, U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, *Final Report, 2011*.
- [4] J. I. McCool. (1982). *Analysis of Sets of Two-Parameter Weibull Data Arising in Rolling Contact Endurance Testing*, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*, pp. 293-319.
- [5] Vijay K. Garg, Rao V. Dukkipati. (1984), *Dynamics of railway vehicle systems*. Academic Press Canada, Ontario.
- [6] ชาวสวน กาญจนมัย. (2552). *ความเสียหายของวัสดุทางวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] นคร จันทศร (2554). *ช่างรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย*, กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [8] วเรศรา วีระวัฒน์และคณะ. (2560). *ระบบรางขั้นพื้นฐาน (Fundamentals of rail systems)*, นครปฐม: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [9] เจน บุญชื้อ. (2554). *ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ*. กรุงเทพฯ: แสงไทย.
- [10] ASTM E466-15, *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015). URL: <http://www.astm.org>, access on 24/10/2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

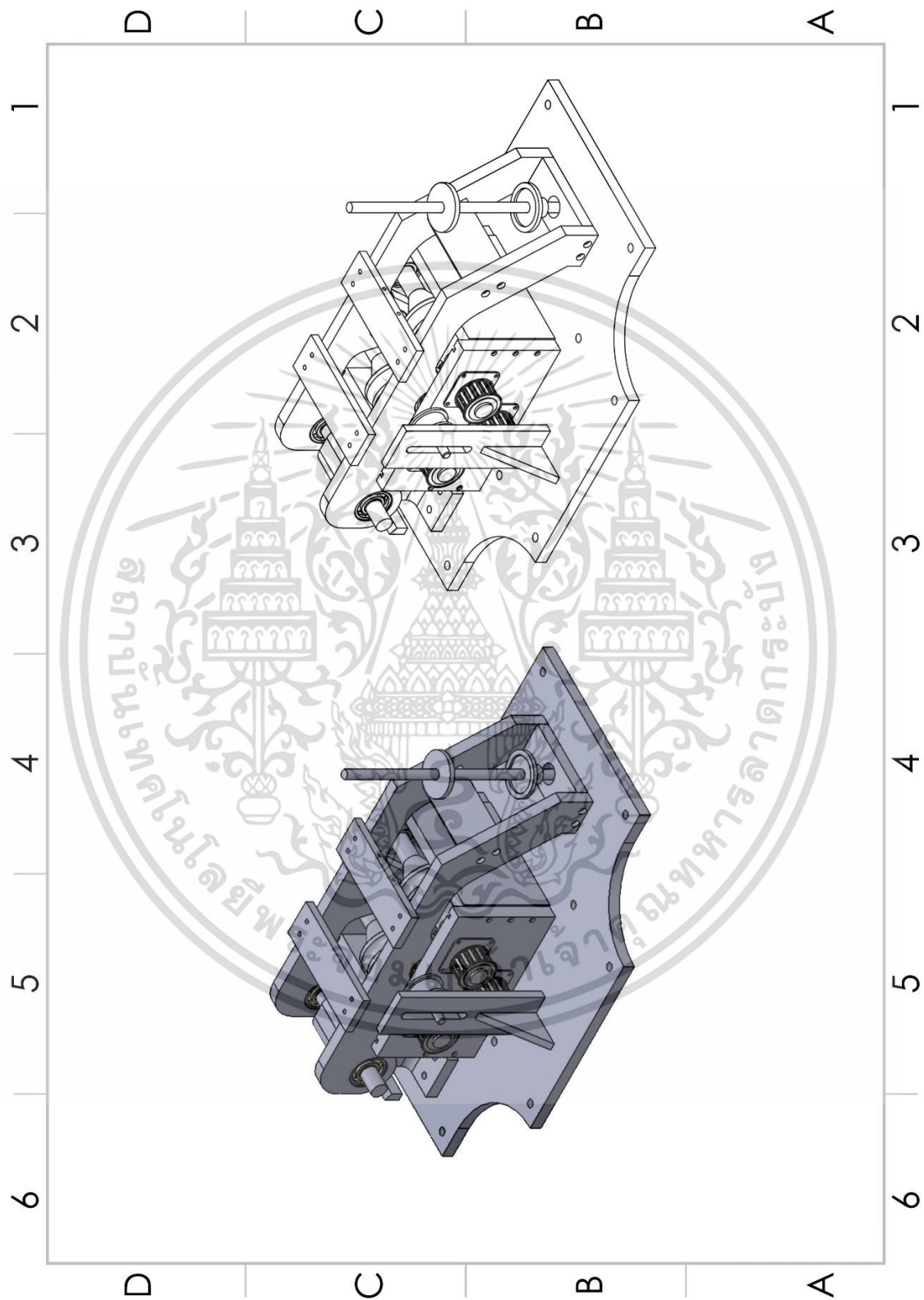
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

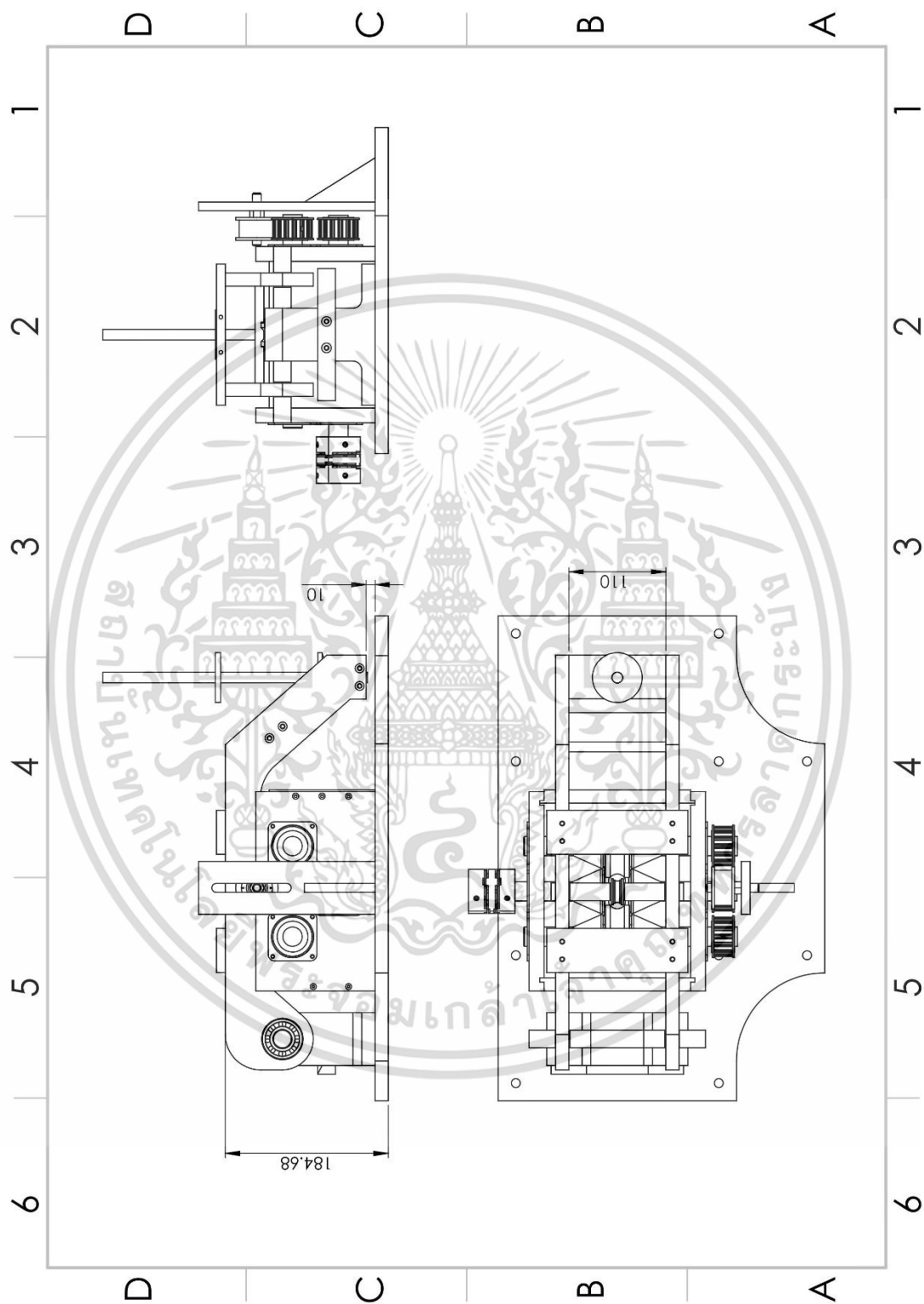


แบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบความล้าของโลหะ

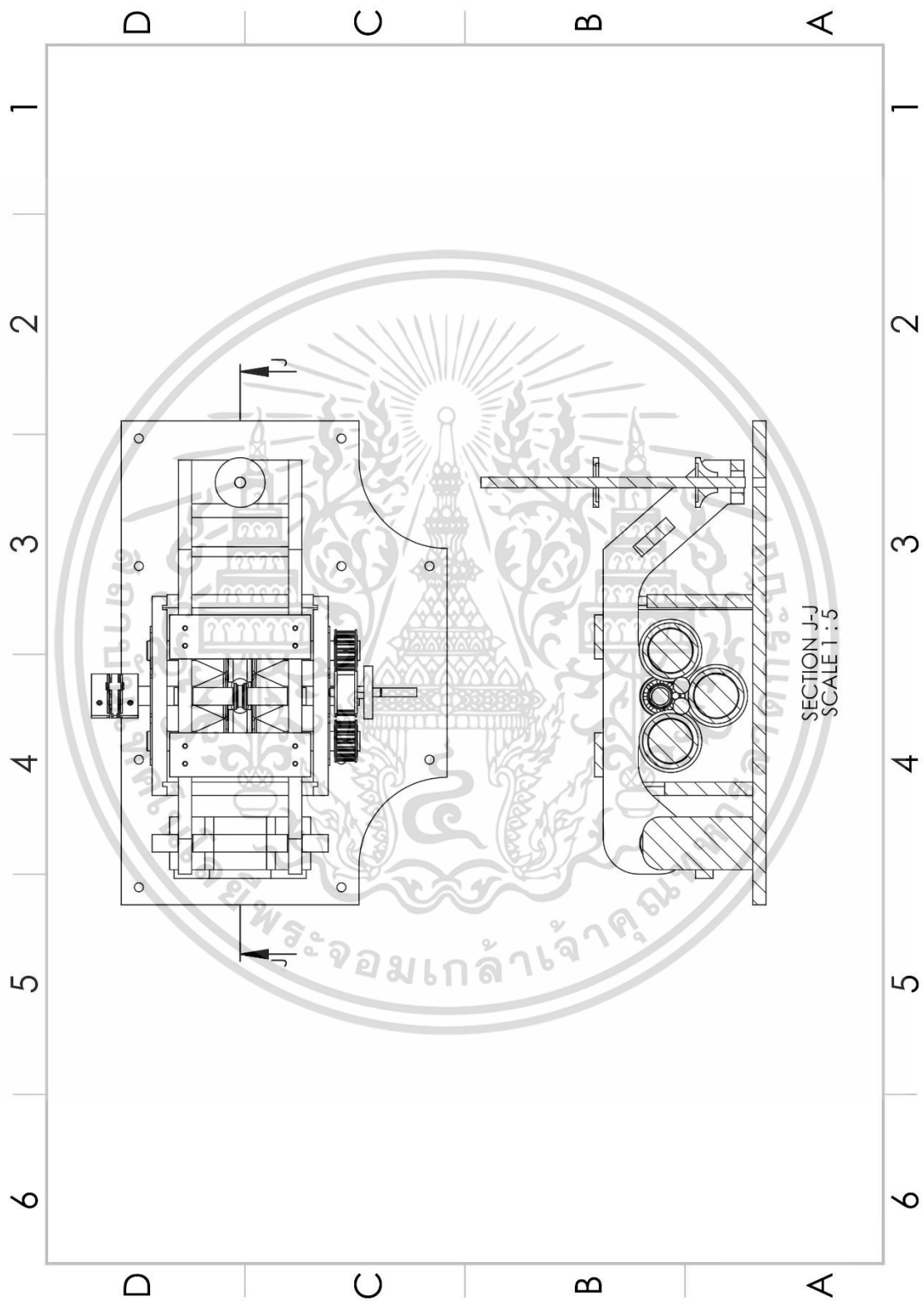
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



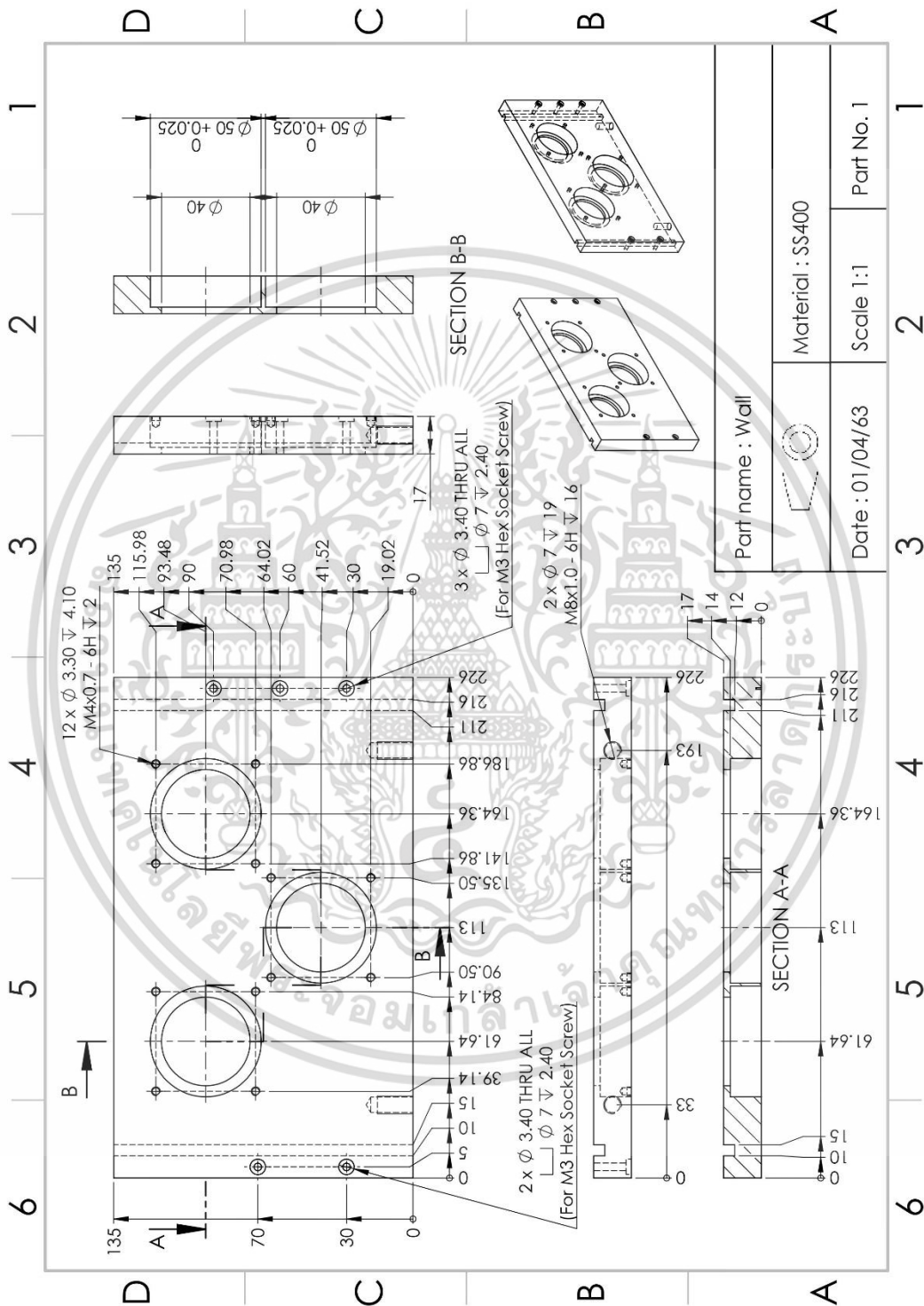
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



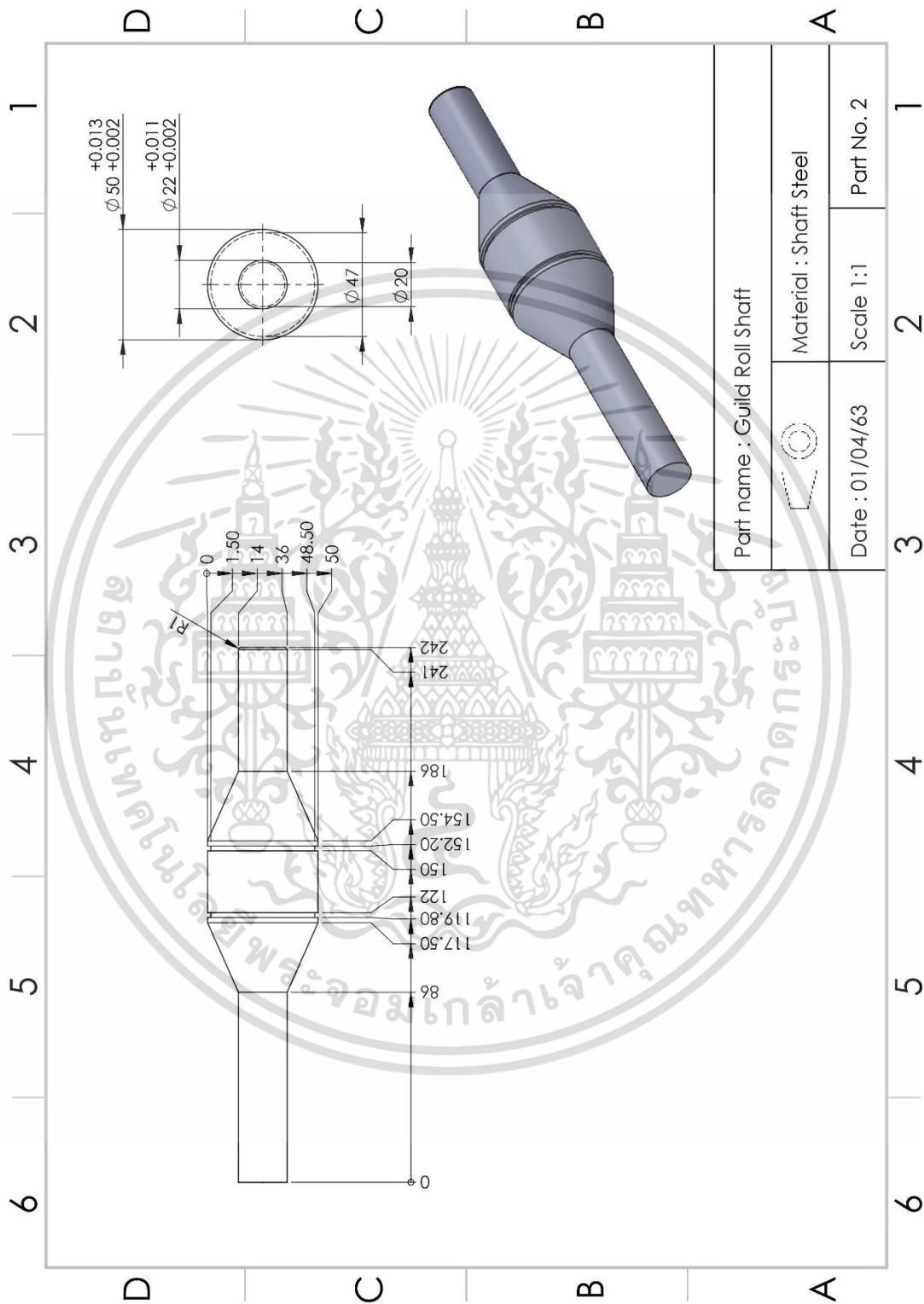
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Wall		1
2	Guide Roll Shaft		2
3	Guide Roll	Inner bearing 6310	3
4	Shaft D20		1
5	Driving Roll		1
6	Specimen	8x9 mm	1
7	Ball	Steel ball Dia=19.05 mm	2
8	Rotating Attachment		1
9	Small Wall		1
10	Guide Roll Shaft connect with motor		1
11	Cap		6
12	62-22	Bearing 62/22	6
13	6204	Bearing 6204	4
14	Base		1
15	ATPA15L075-A-P22	Part number from MISUMI Thailand	3
16	MCGLK50-14-22	Part number from MISUMI Thailand	1
17	TPBSN-40-20	Part number from MISUMI Thailand	1
18	WS116S	Part number from MISUMI Thailand	1
19	pressing		1
20	Stud_M12	8x300 mm	1
21	Beam		1
22	Stepper Beam		1
23	Selfing Idler V2		1
24	Sub Plate V2		1
25	pressing V2		1
26	Connector(fest)_V3		1
27	Connector(fest)_R_V3		1
28	Beam over (Rear)		2
29	Rear Small Wall		1
30	Wall (Mirr)		1
31	TBN165L075 (Timing Belt)	Part number from MISUMI Thailand	1
32	SWR43-200 (Compress spring)	Part number from MISUMI Thailand	1

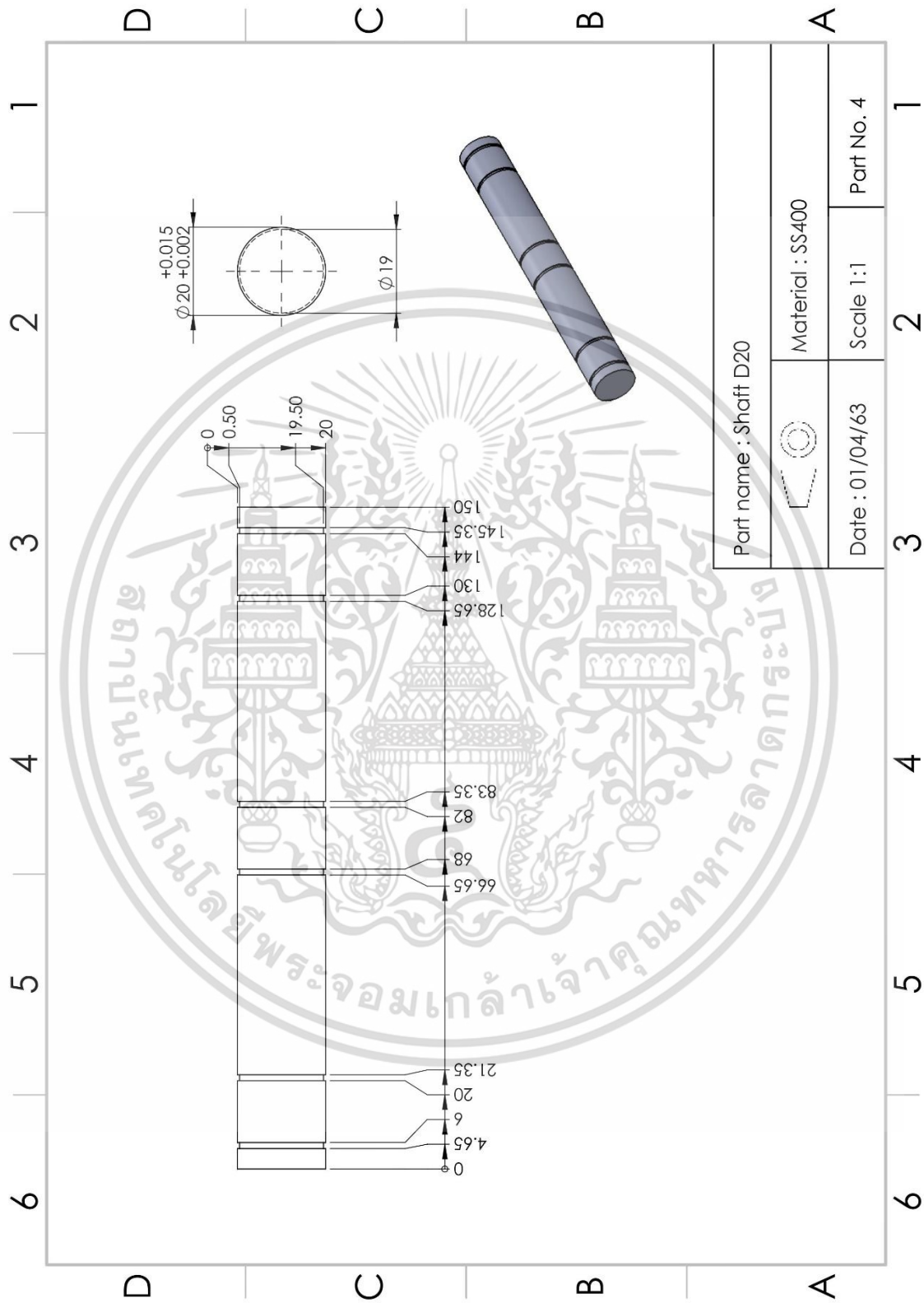
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



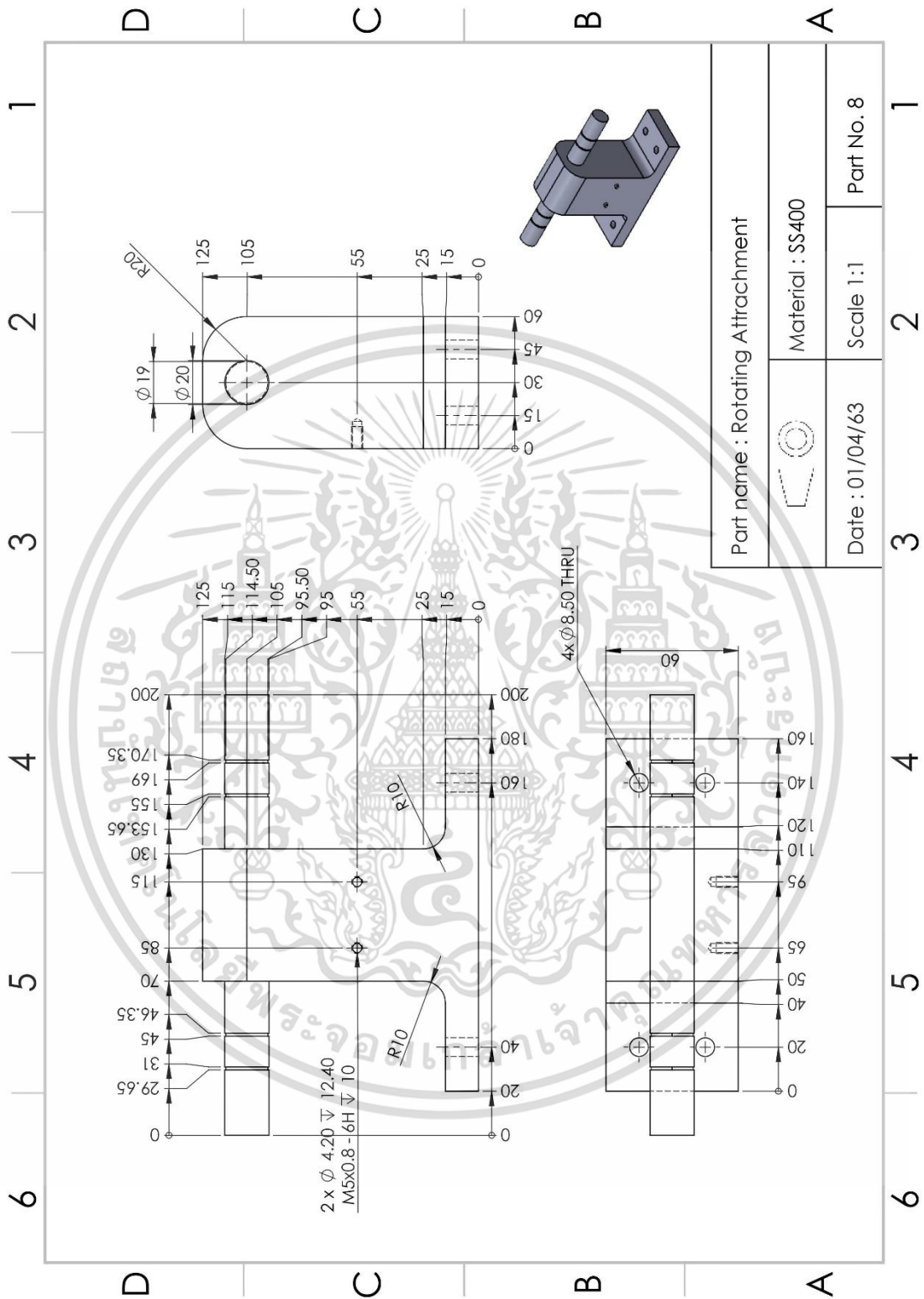
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



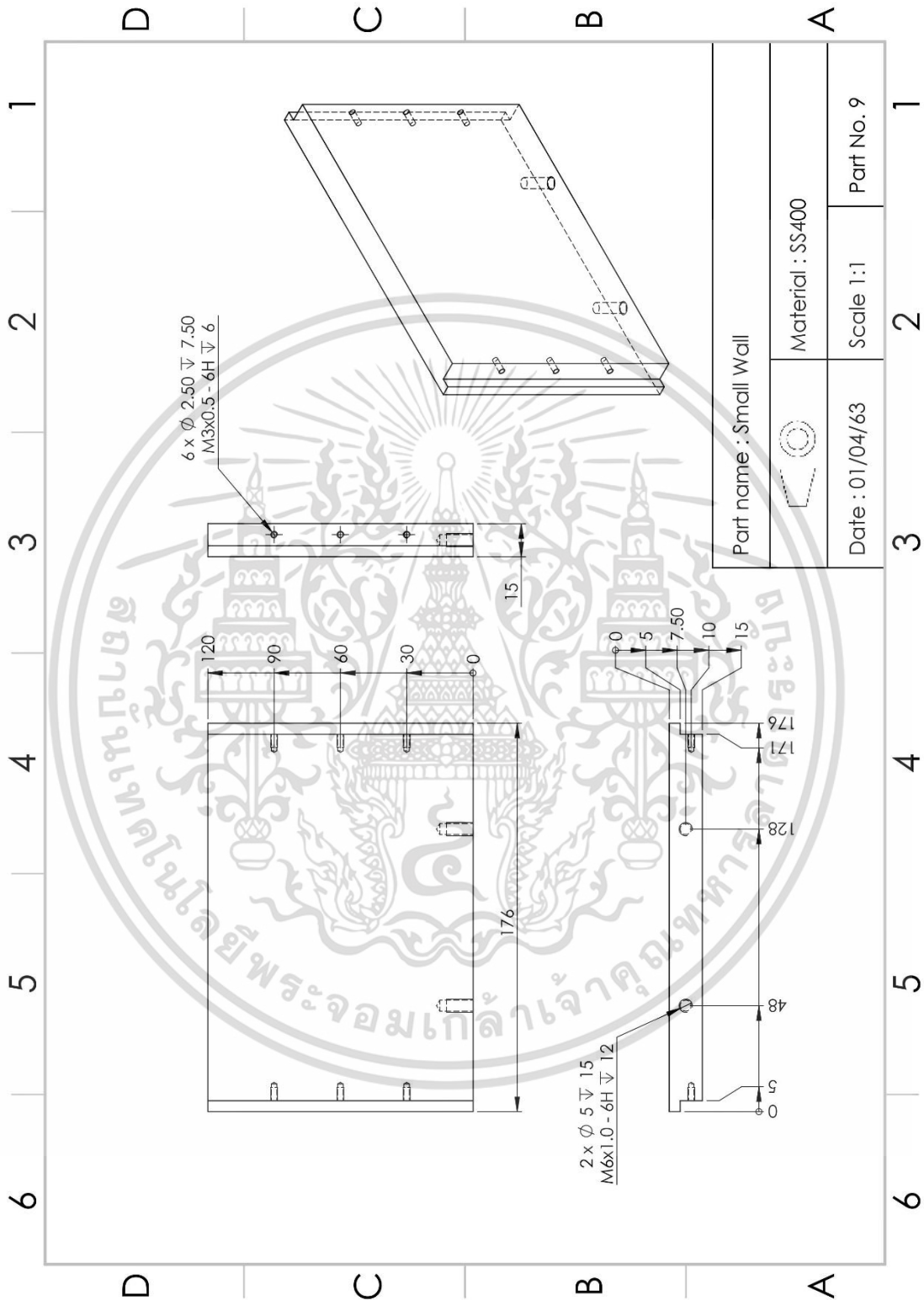
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



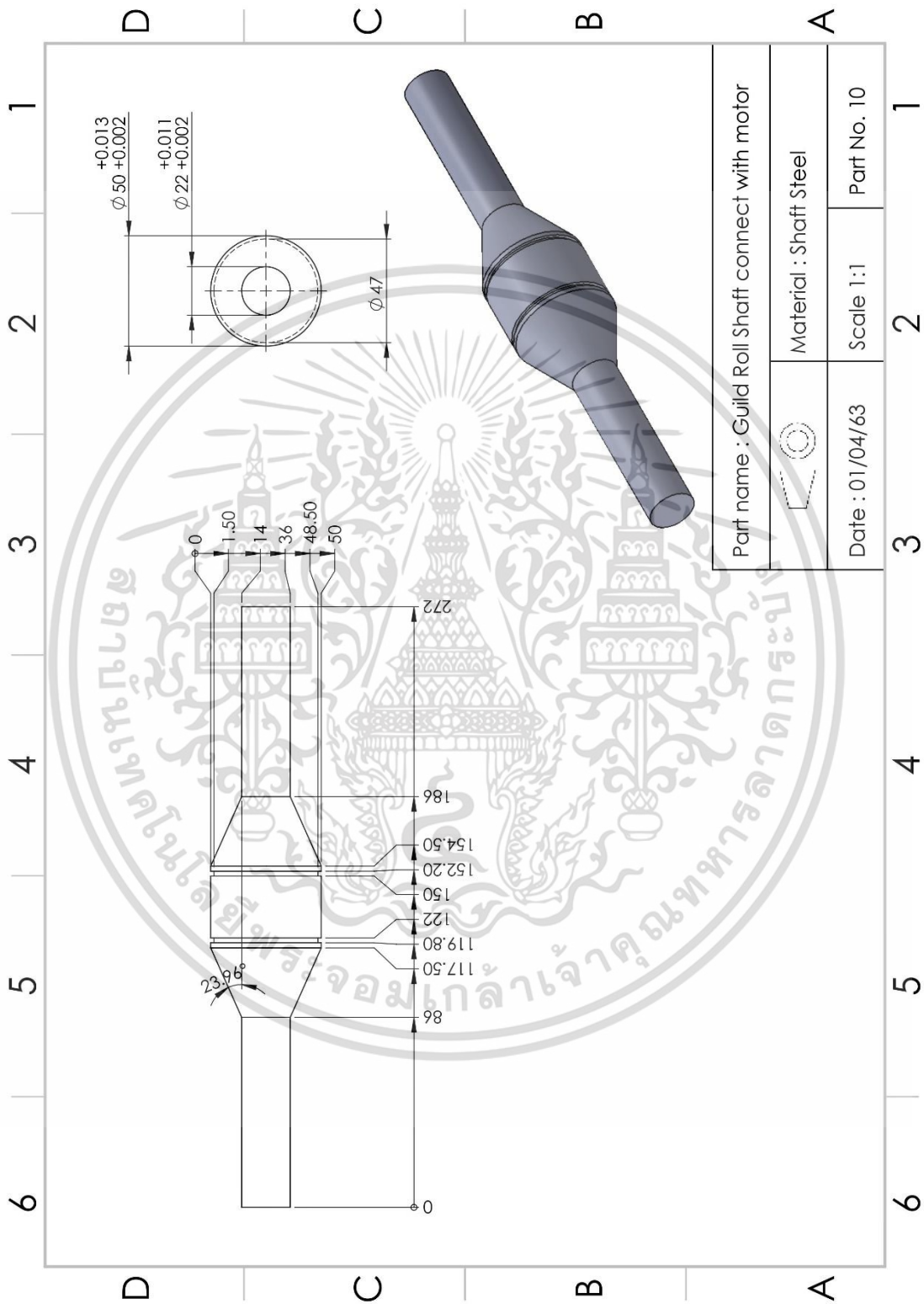
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



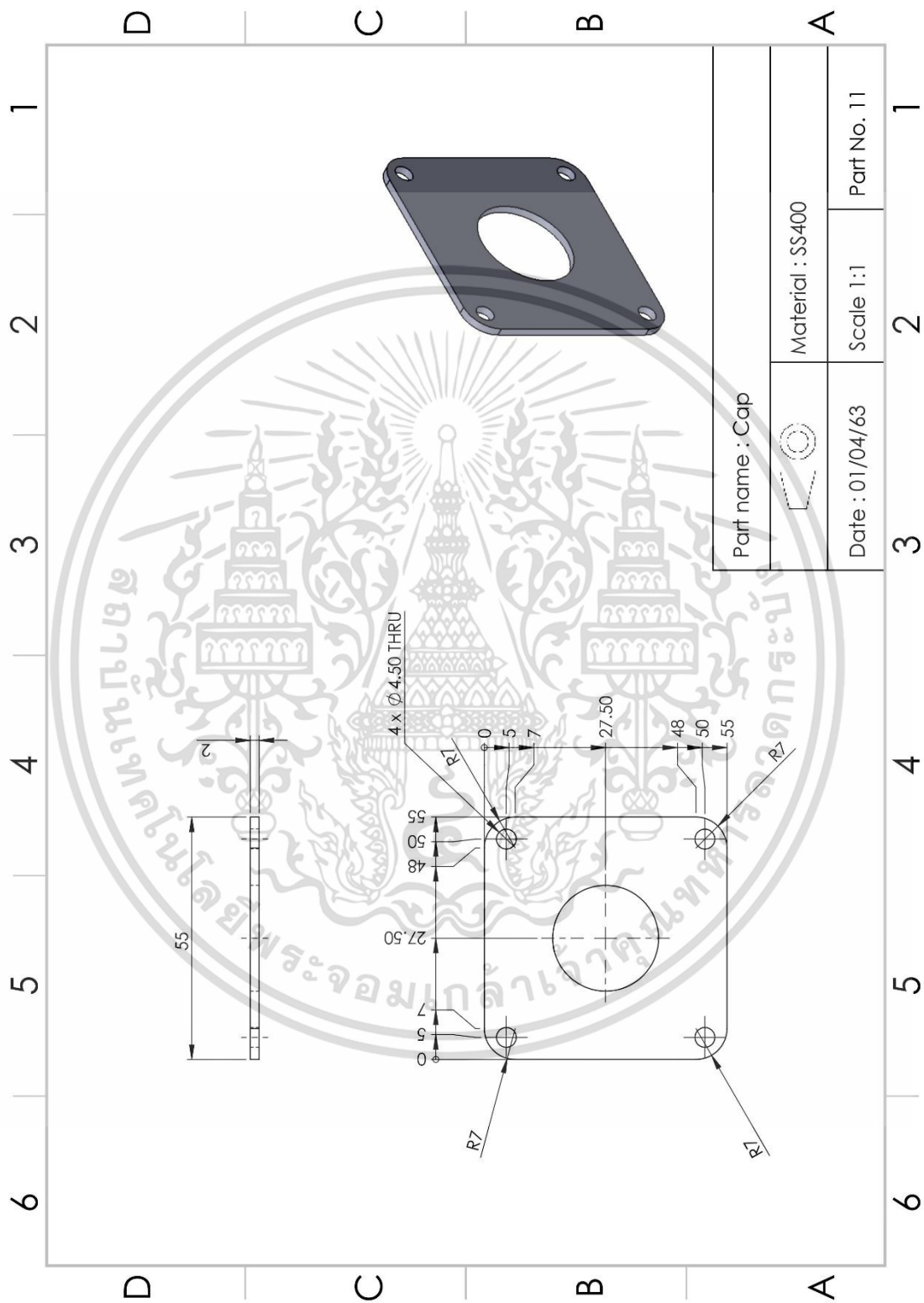
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



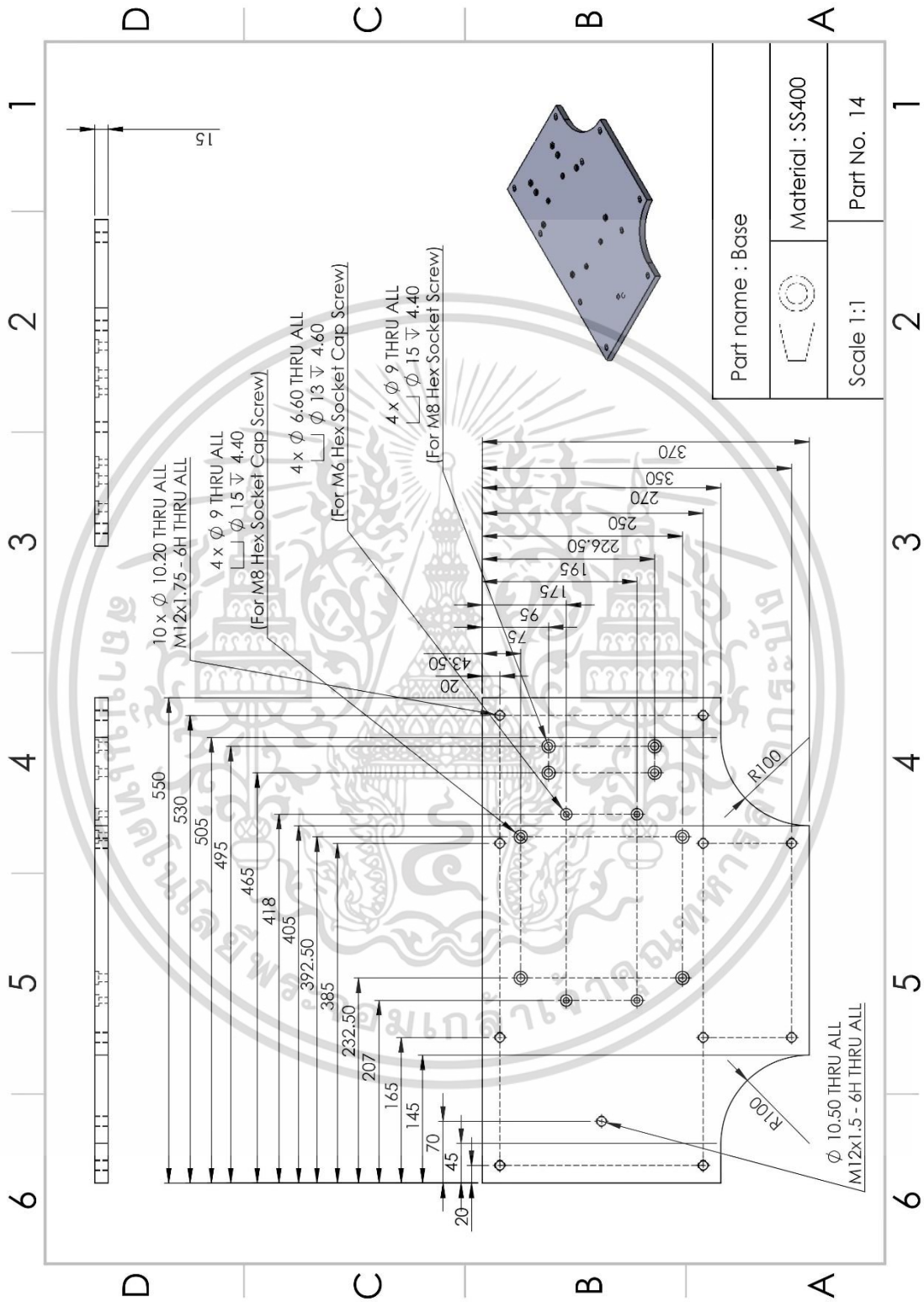
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



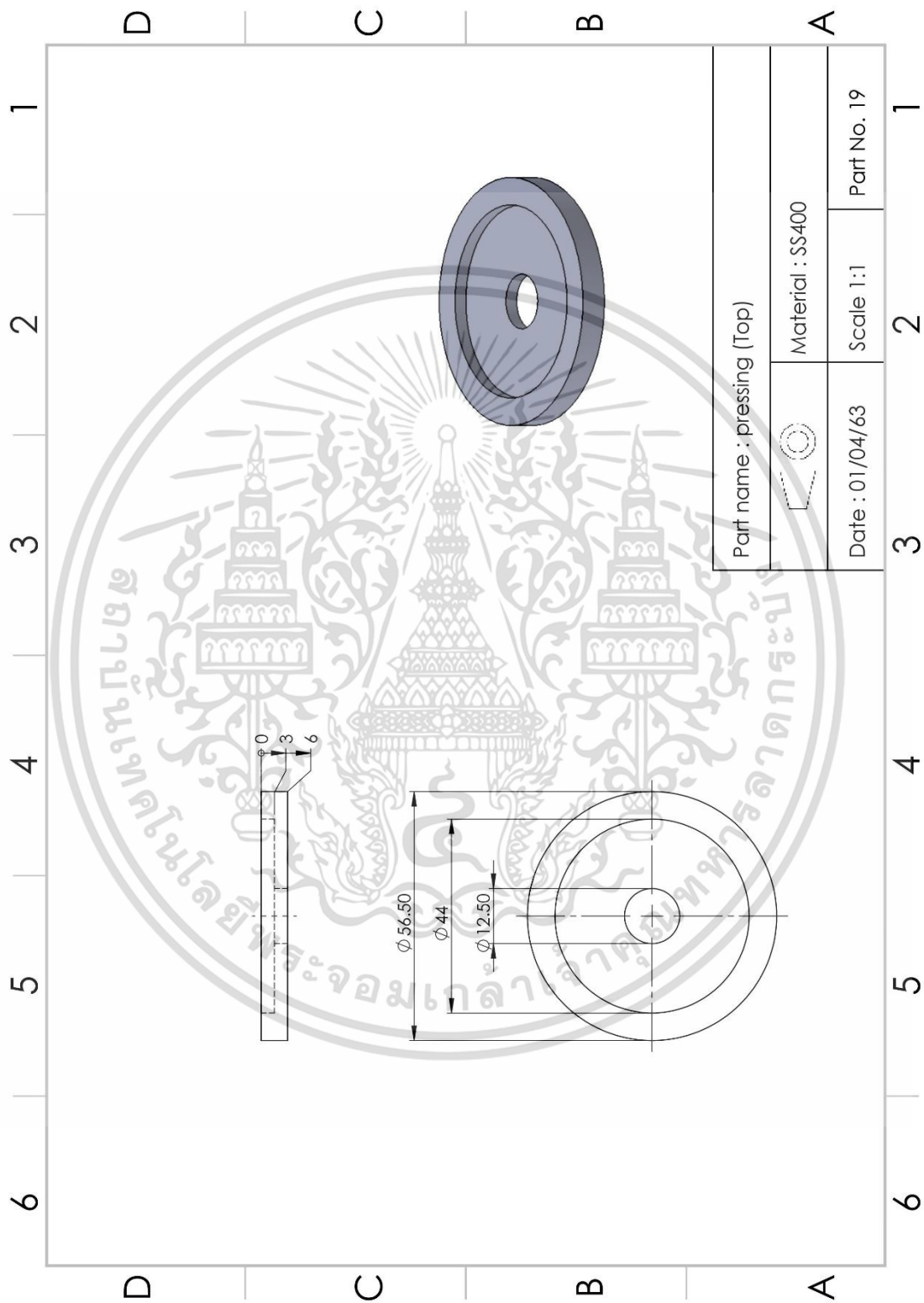
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



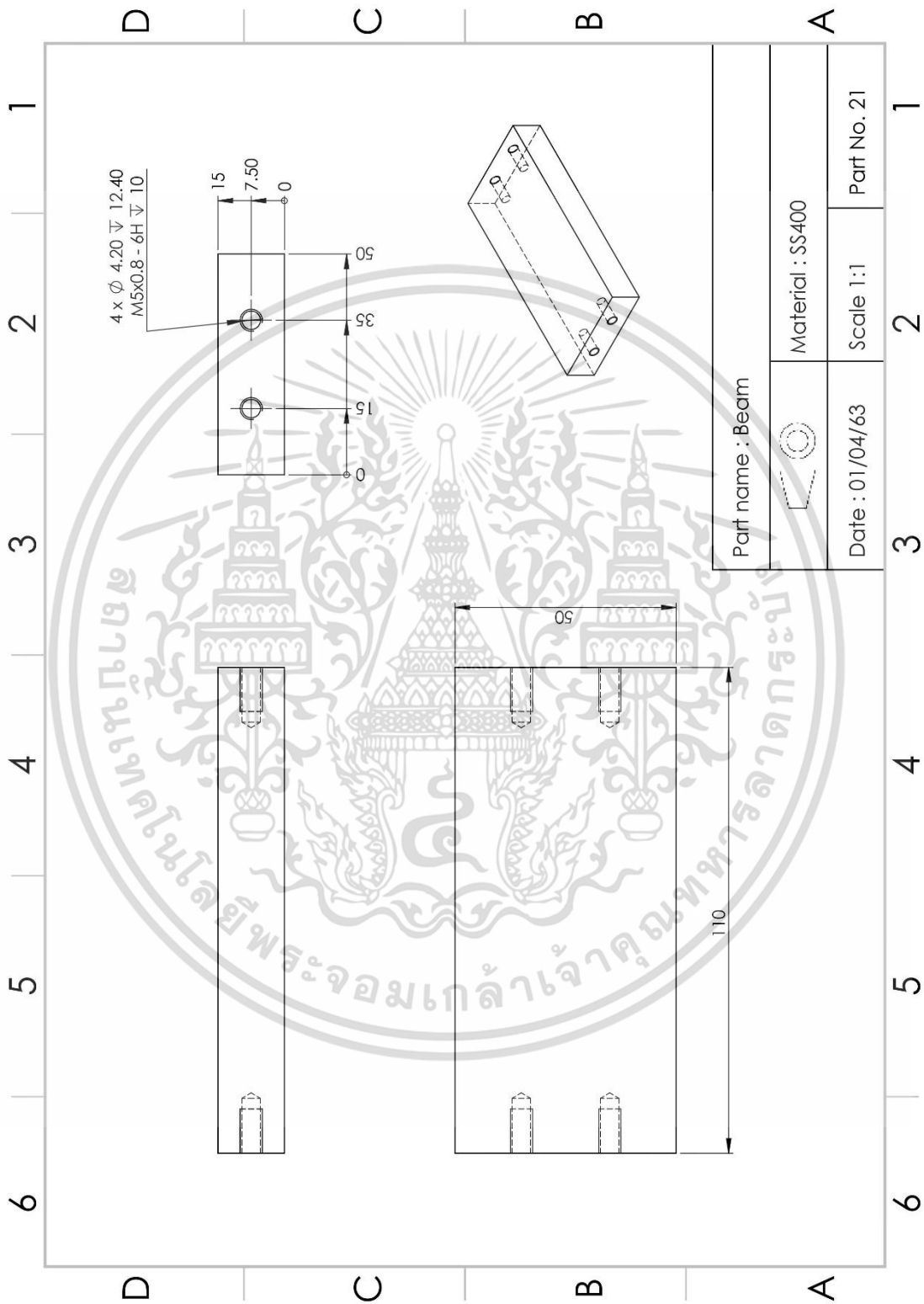
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



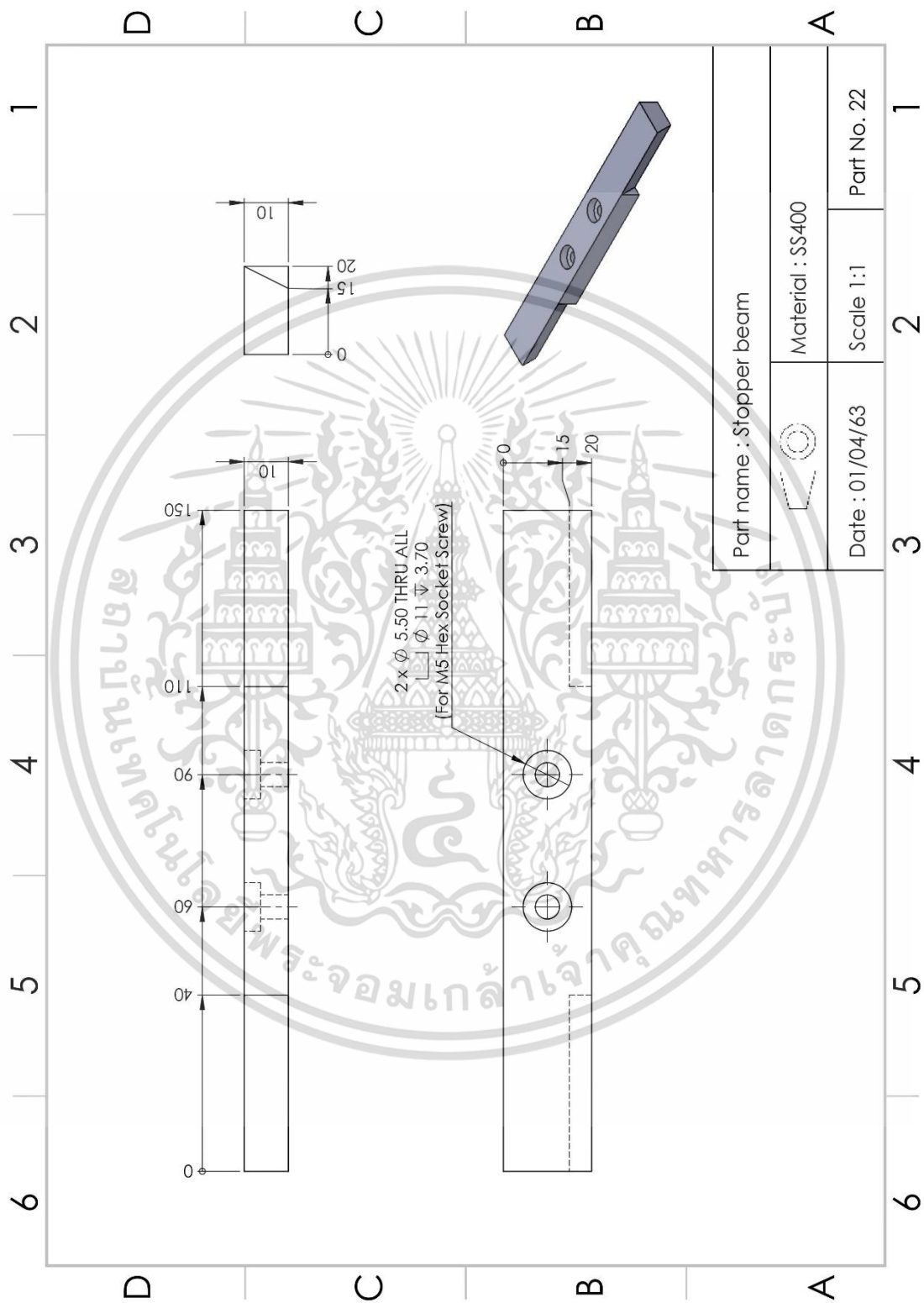
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



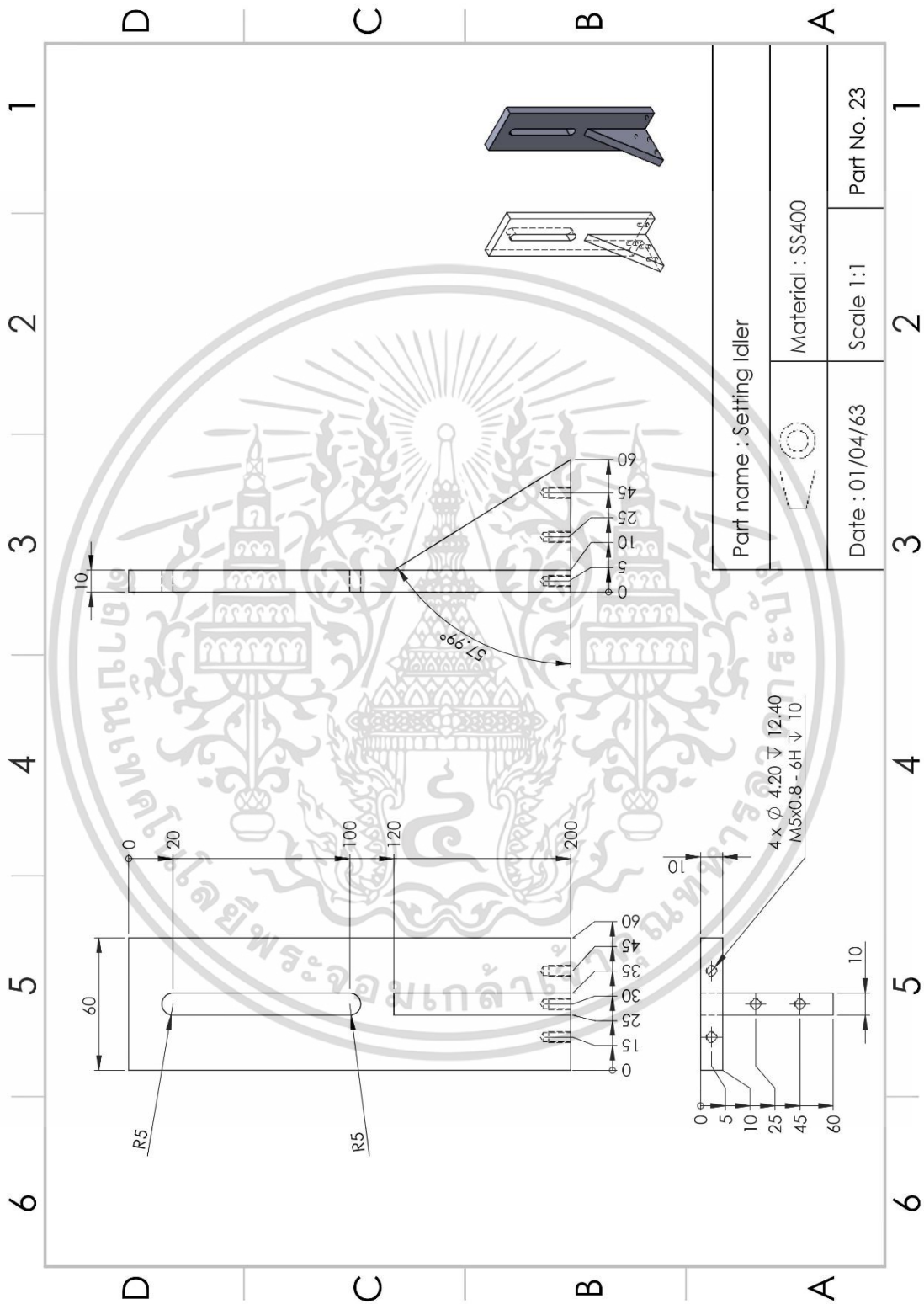
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



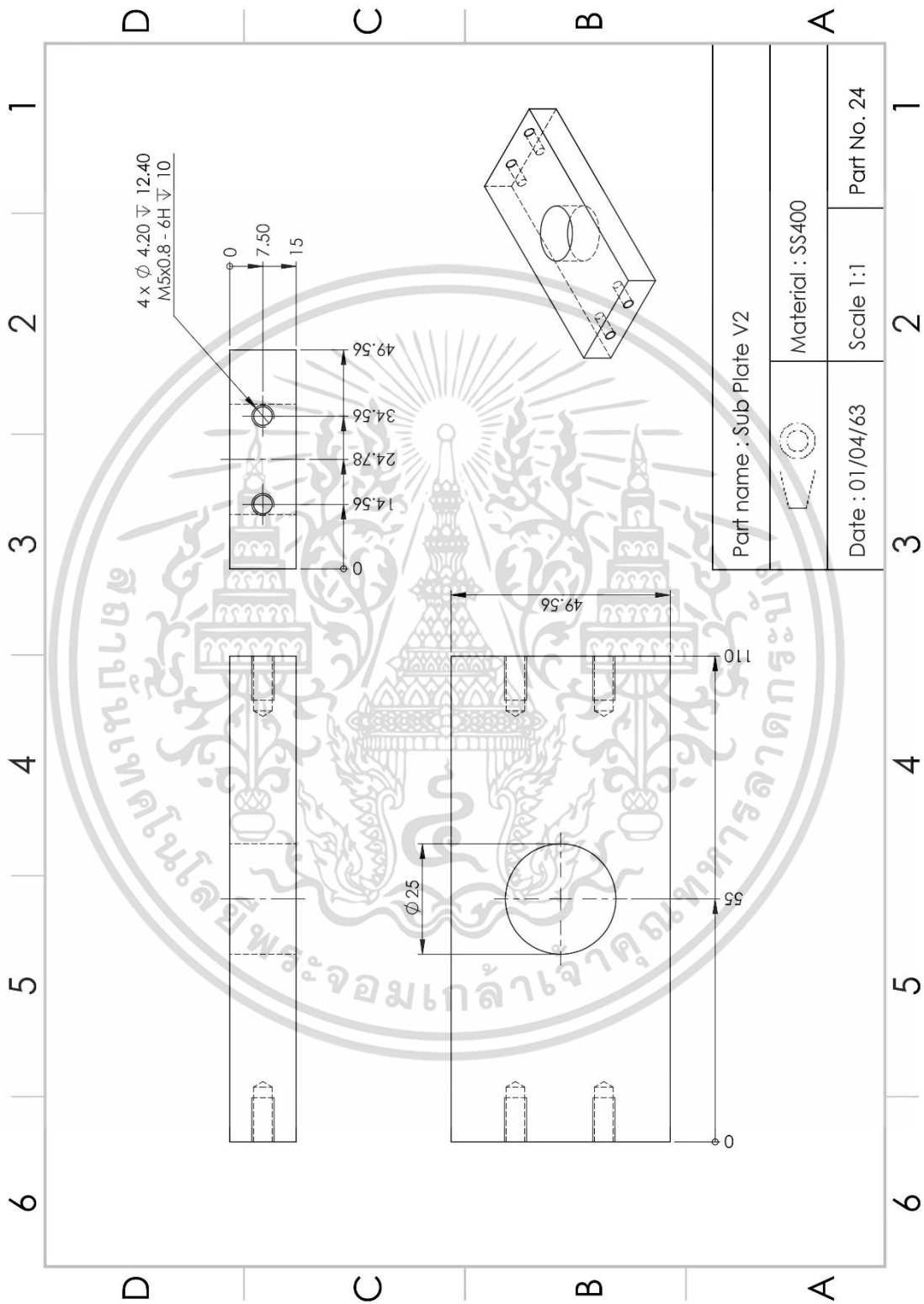
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



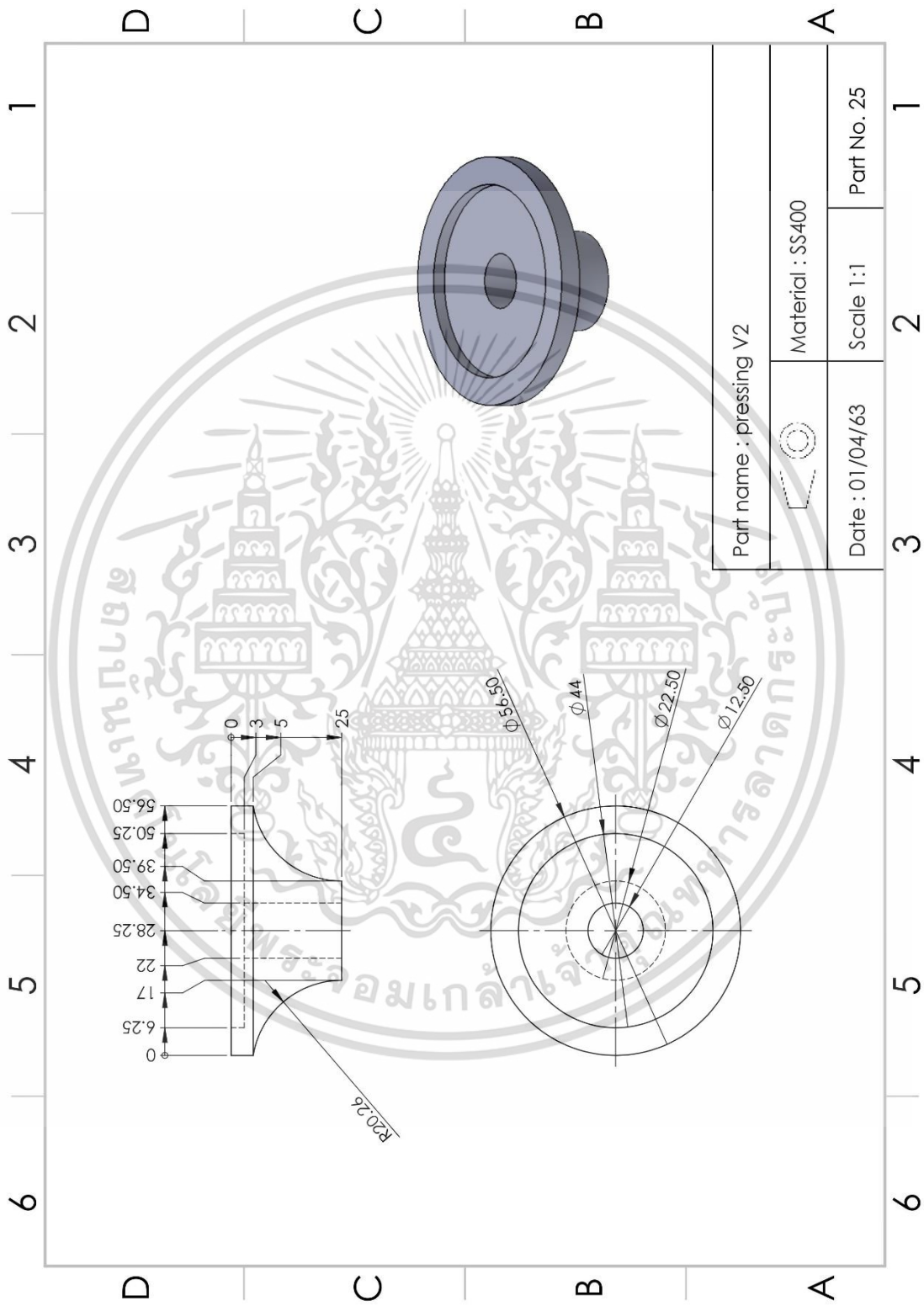
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



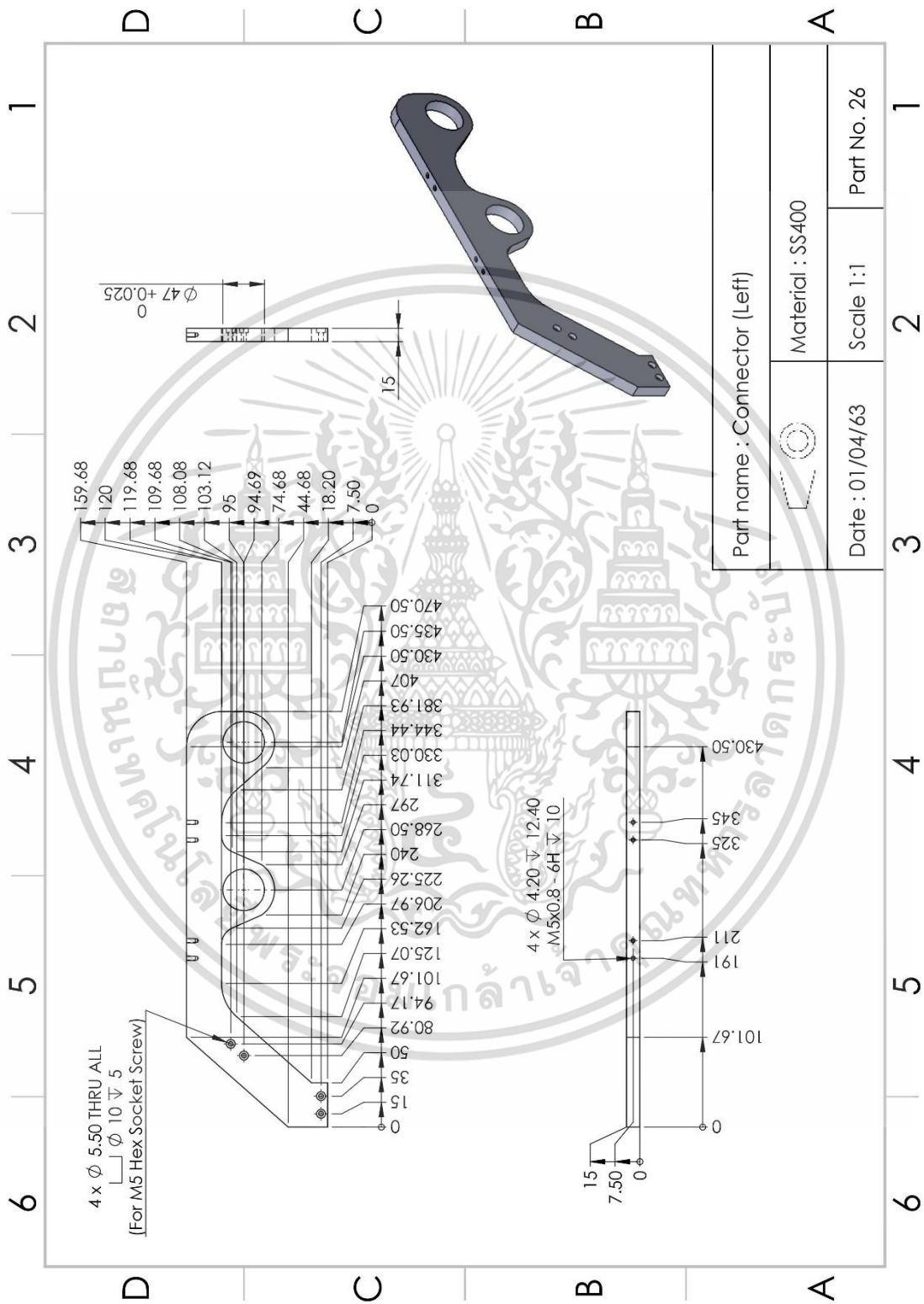
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



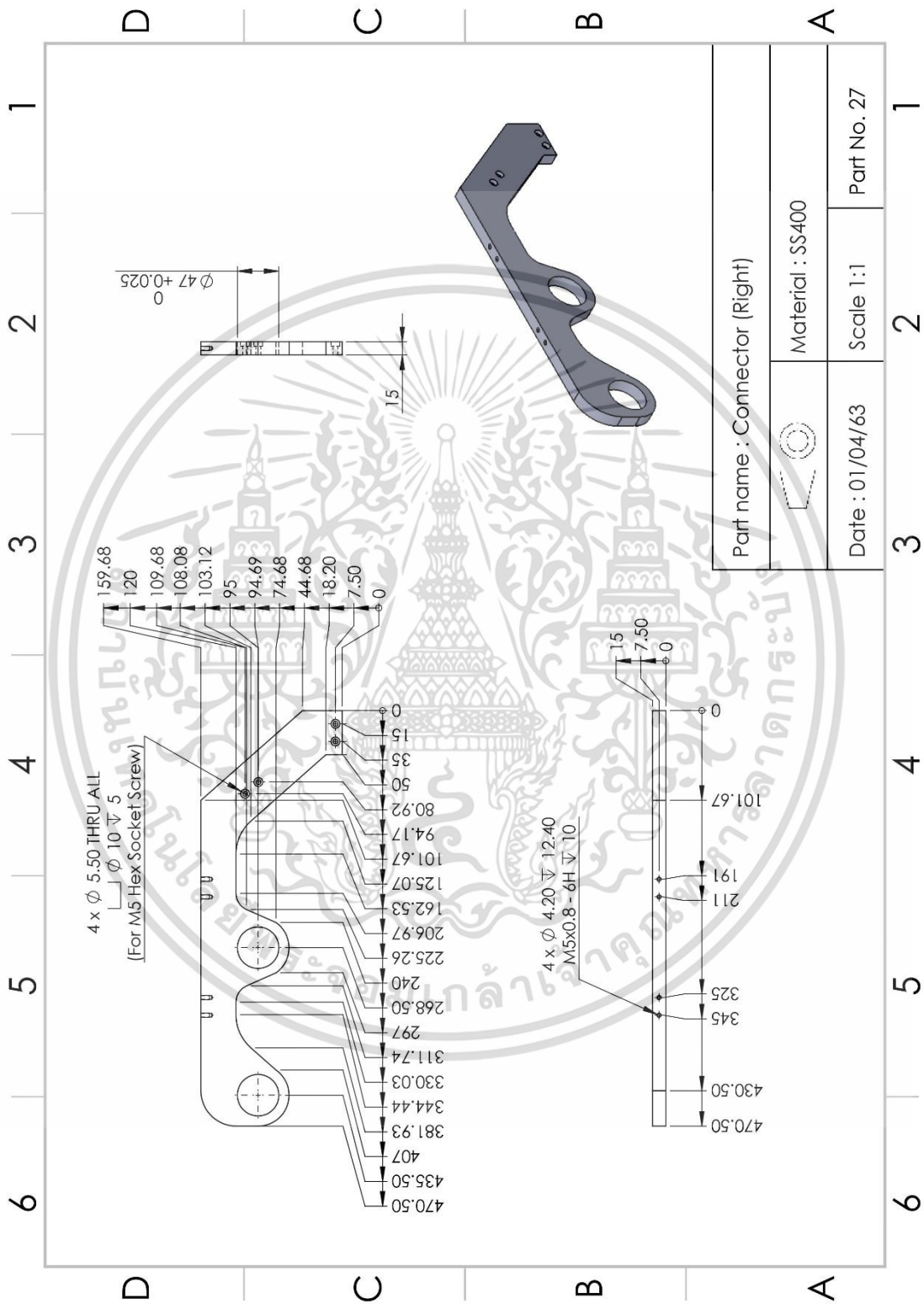
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



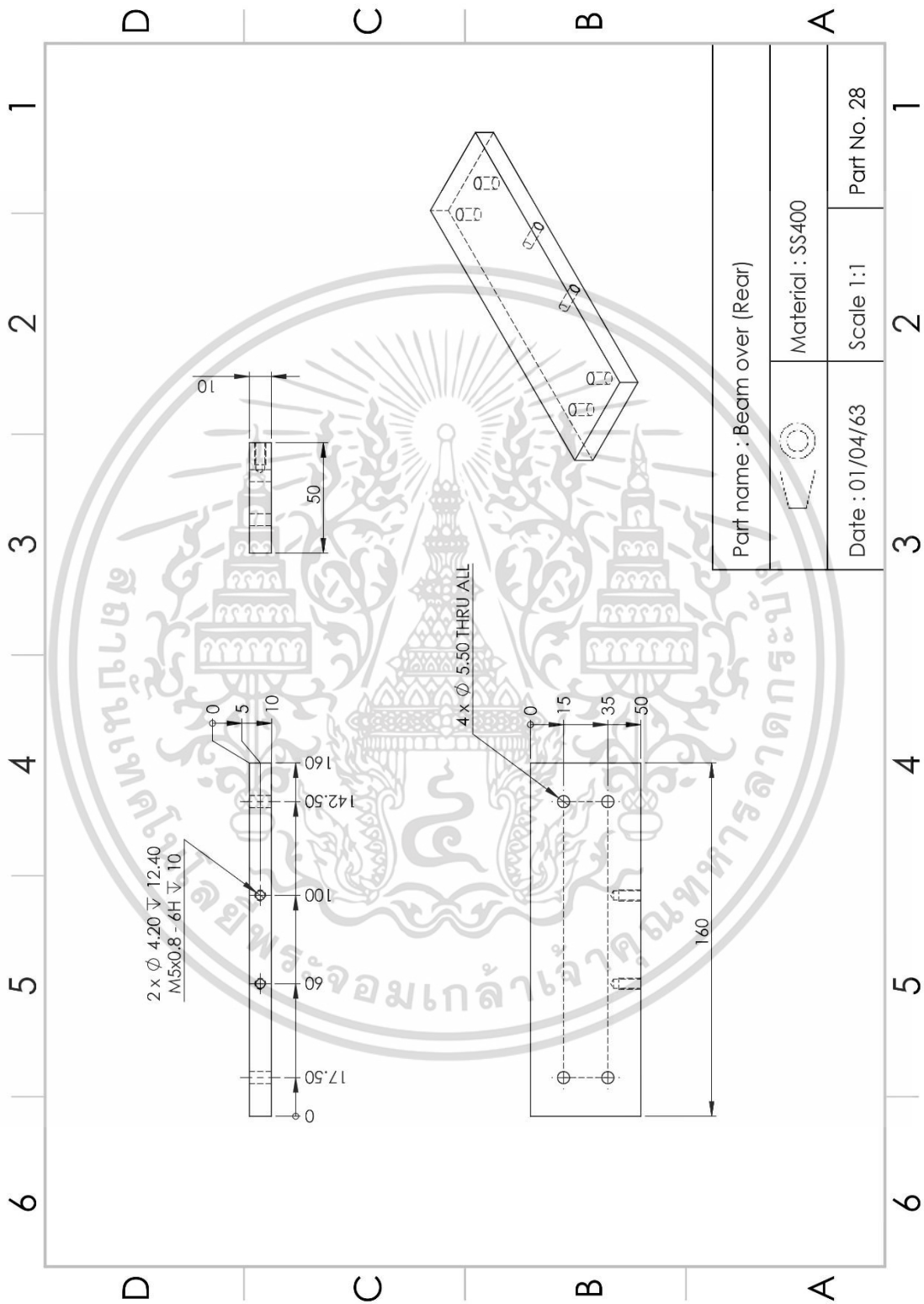
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



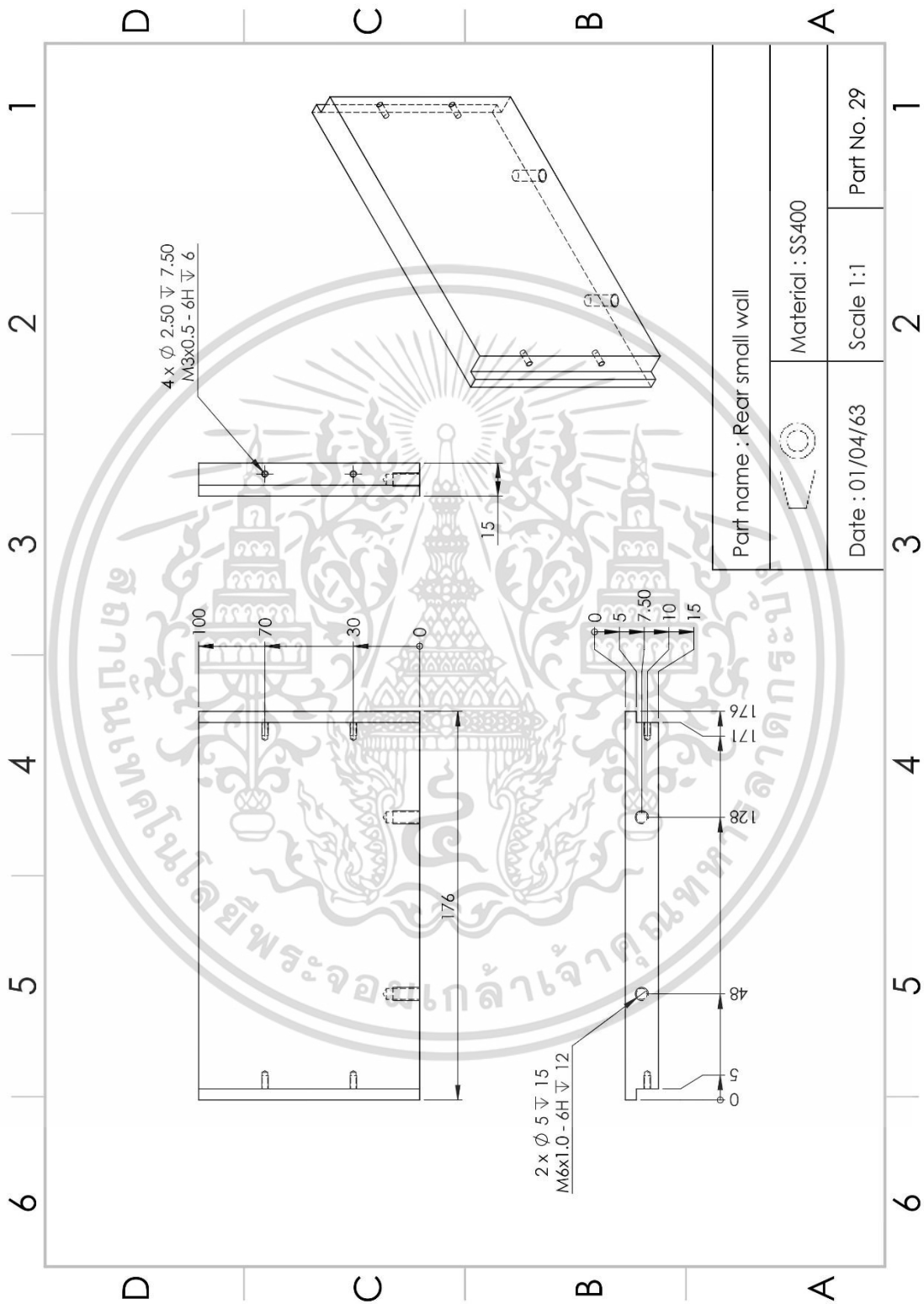
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



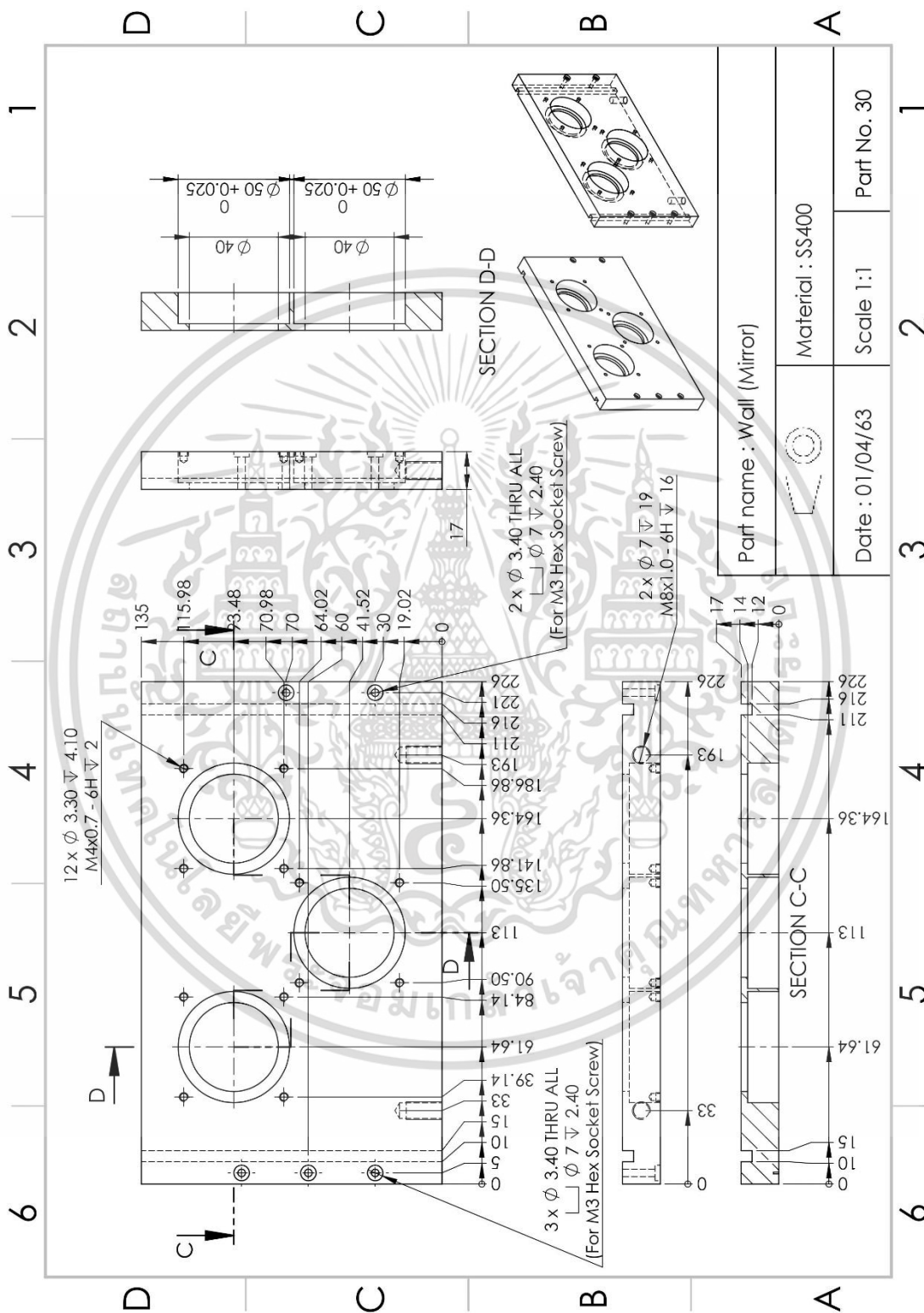
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข



### การประกอบเครื่องทดสอบความถี่ของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 ชิ้นส่วนเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ (1)



รูปที่ ข-2 ชิ้นส่วนเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

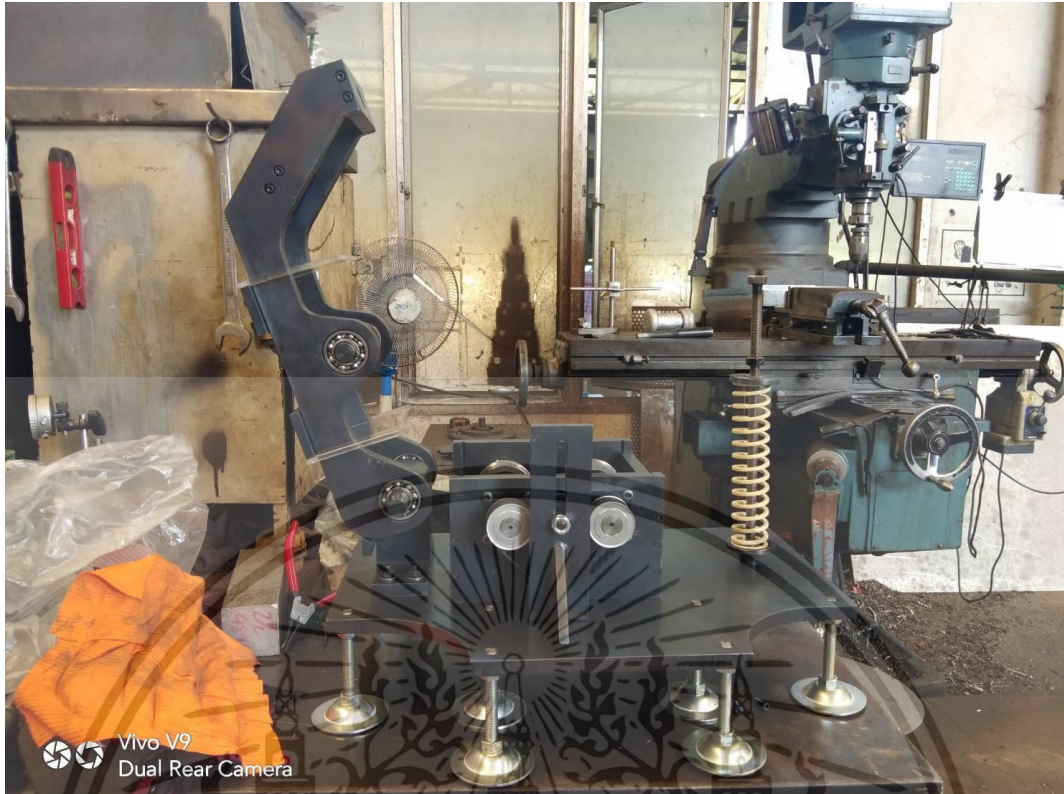


รูปที่ ข-3 ชิ้นส่วนเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ (3)



รูปที่ ข-4 ภาพมุม Isometric ของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 ภาพด้านข้างของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ



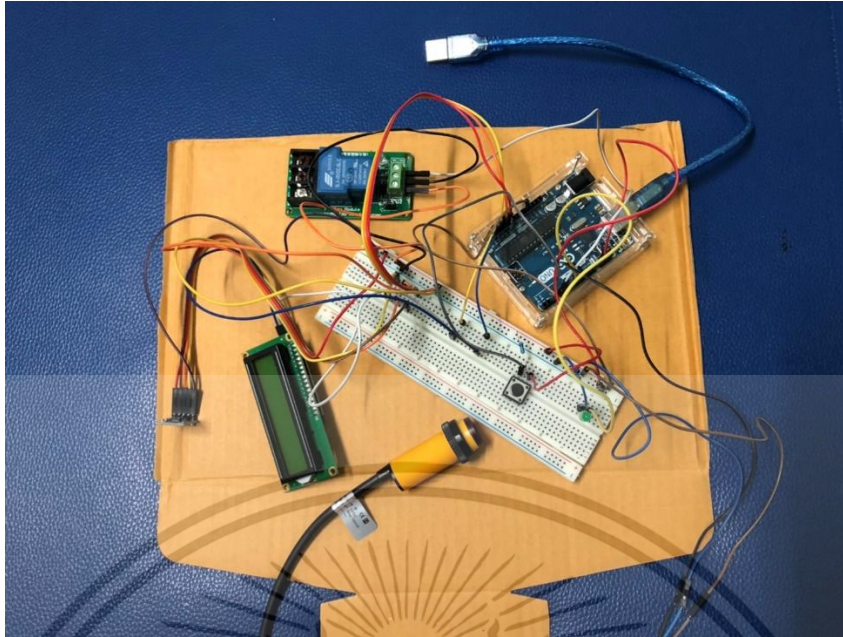
รูปที่ ข-6 กลไกด้านในของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

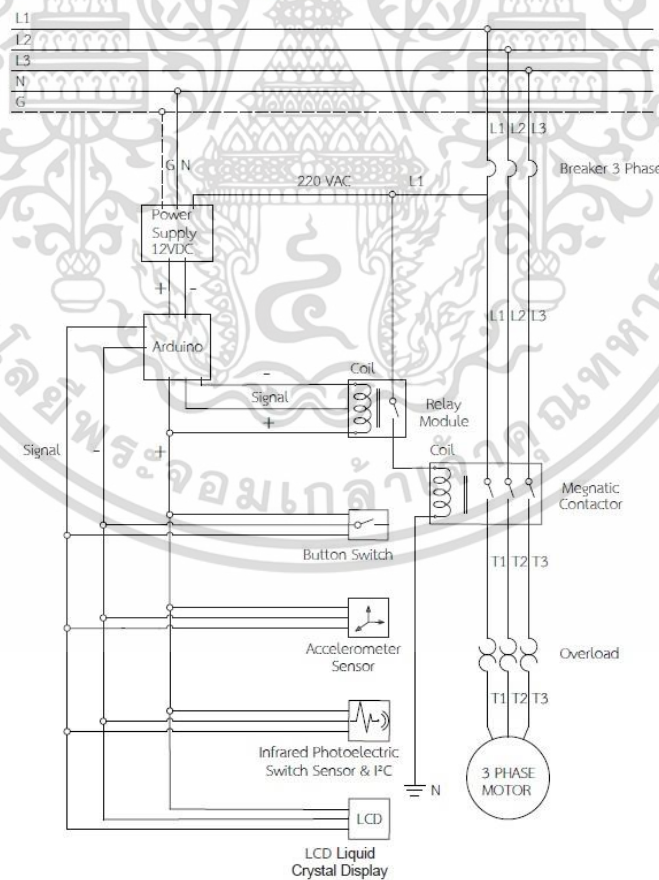


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-1 วงจรการนับรอบการหมุนของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ

### การทำงานของระบบไฟฟ้า



รูปที่ ค-2 การทำงานของระบบไฟฟ้าของเครื่องทดสอบการล้าของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้