

การพัฒนาชุดปรับอุณหภูมิสำหรับเครื่องทดสอบแรงดึง  
THE DEVELOPMENT OF HEATING CHAMBER FOR  
UNIVERSAL TESTING MACHINE



T119342

นางสาวทัศนีย์ หิตะวัน

MS. TADSANEE HITAWAN

นายประชารัตน์ คงชะเวท

MR. PRACHARAT KONGCHAVATE

นางสาววรรณชิตา ชาระเขตร์

MS. WANTHIDA TARAKET

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 119342  
วัน,เดือน,ปี..... 7 S.A. 2554

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **THE DEVELOPMENT OF HEATING CHAMBER FOR UNIVERSAL TESTING MACHINE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การพัฒนาชุดปรับอุณหภูมิสำหรับเครื่องทดสอบแรงดึง  
The Development of Heating Chamber for Universal Testing Machine

นักศึกษา

นางสาวทัศนีย์ หิตะวัน	รหัสประจำตัว	50010578
นายประชารัตน์ คงชะเวท	รหัสประจำตัว	50010902
นางสาววรรณธิดา ธาระเขตร์	รหัสประจำตัว	50011374

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(ดร.วิภู ศรีสืบสาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปฏิญานิพนธ์	การพัฒนาชุดปรับอุณหภูมิสำหรับเครื่องทดสอบแรงดึง		
นักศึกษา	นางสาวทัศนีย์ หิตะวัน	รหัสประจำตัว	50010578
	นายประชารัตน์ คงชะเวท	รหัสประจำตัว	50010902
	นางสาววรรณธิดา ธาระเชษฐ์	รหัสประจำตัว	50011374
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
	2553		
อาจารย์ผู้ควบคุมปฏิญานิพนธ์	ดร.วิภู ศรีสืบสาย		

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการสร้างชุดปรับอุณหภูมิที่ใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) เพื่อทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส โดยใช้หลักทางกล และการถ่ายโอนความร้อนในการออกแบบ ชุดปรับอุณหภูมิประกอบไปด้วย ส่วนของกล่องสี่เหลี่ยมที่แยกเป็นสองส่วนซ้อนกันสองชั้น ส่วนของคานยก และขาตั้งพร้อมรางเลื่อน ภายในกล่องมีฮีตเตอร์ชนิดแท่งสำหรับปรับอุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลร่วมกับคอนโทรลเลอร์วัดและควบคุมอุณหภูมิ และใช้ฉนวนเพื่อป้องกันความร้อน บริเวณด้านหน้าของกล่องติดกระจกเพื่อให้มองเห็นชิ้นทดสอบขณะการทดสอบ การใช้งานต้องเลื่อนกล่องทั้งสองส่วนมาประกบกันโดยครอบหัวจับชิ้นงาน เมื่อเริ่มการทดสอบกล่องชั้นนอกจะเคลื่อนที่ขึ้น โดยอาศัยแรงยกจากการเคลื่อนที่ของคרוสเฮด ซึ่งมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับความเร็วในการทดสอบ ชุดปรับอุณหภูมิสามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยมีผลการดำเนินงาน คือ ค่าผิดพลาดในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบมีค่า 5.09 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ถึง 50 องศาเซลเซียส คือ 9 นาที และ 100 องศาเซลเซียส 15 นาที และเวลาในการติดตั้งเครื่องเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงพร้อมที่จะทดสอบชิ้นงานไม่เกิน 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	The Development of Heating Chamber for Universal Testing Machine
<b>Student</b>	Ms. Tadsanee Hitawan Mr. Pracharat Kongchavate Ms. Wanthida Taraket
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Wipoo Sriseubsai

### ABSTRACT

The purpose of this thesis was to develop the heating chamber for the Universal Testing Machine. The range of operating temperature was between 25-150 °C. The heat transfer and mechanical theory were used to design the system. It consists of two sides of the covers. Each cover has two step layers. The main structure had two lifting beams and stand with roller trail. Inside the chamber, the heater, thermocouple and insulator were installed. The temper glass was fixed at the front side of the chamber. The chamber would be closed during the operating. The outer side at chamber would be moved up due to lifting force by moving up the crosshead with constant speed. The results showed the heating error about 5.09% to the specimen. The heating time to reach 50 °C was 9 min and 15 min to reach 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเรื่อง การพัฒนาชุดปรับอุณหภูมิสำหรับเครื่องทดสอบแรงดึง สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร. วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรฉบับนี้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาบัตร

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรฉบับนี้ คำแนะนำ กำลังใจ ความเอาใจใส่ตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรเล่มนี้ ตลอดจนการช่วยเหลือ การให้ความรู้ คำแนะนำ ในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาบัตร

ผศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ คำแนะนำ ในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาบัตร

ผศ.ดร.สรพรพิทธิ ลิ้มนรินทร์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับกำลังใจ ตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาบัตร

ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ คำแนะนำ ในทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

คุณสุทรวัฒน์ วรินอินทร์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับ ความช่วยเหลือในการศึกษาเครื่องต้นแบบ และคำแนะนำในการทำปริญญาบัตร

ขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญาบัตรสำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาวทัศนีย์ หิตะวัน

นายประชารัตน์ คงชะเวท

นางสาววรรณธิคา ธาระเขตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะ.....	3
2.1.1 โลหะจำพวกเหล็ก.....	3
2.1.2 โลหะนอกจำพวกเหล็ก.....	4
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นพลาสติก.....	4
2.2.1 เทอร์โมเซตติง.....	4
2.2.2 เทอร์โมพลาสติก.....	5
2.3 การทดสอบแรงดึง.....	6
2.3.1 เครื่องมือทดสอบ.....	6
2.3.2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบ.....	11
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบ.....	14
2.4 การทดสอบแรงดึงของพลาสติก.....	15
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม.....	19
2.6 การทำความร้อนและควบคุมความร้อน.....	21
2.6.1 ฮีตเตอร์.....	21
2.6.2 เทอร์โมคัปเปิล.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 พื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับกระจก.....	35
2.8 จนวนกันความร้อน.....	38
2.8.1 องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาในการเลือกฉนวน.....	38
2.8.2 คุณสมบัติของฉนวนความร้อนที่ดี.....	39
2.8.3 ชนิดของฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้.....	39
2.9 โพลีคาร์บอเนต.....	41
2.10 การรับแรงของคาน.....	44
2.11 การถ่ายเทความร้อน.....	49
2.11.1 การนำความร้อน.....	49
2.11.2 การพาความร้อน.....	50
<b>บทที่ 3 การดำเนินงาน</b>	<b>52</b>
3.1 การวางแผนดำเนินงาน.....	52
3.2 ทดสอบชิ้นทดสอบพลาสติก.....	53
3.2.1 ชิ้นทดสอบ.....	53
3.2.2 ดำเนินทดสอบแรงดึง.....	54
3.3 การออกแบบชุดปรับอุณหภูมิ.....	55
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำชุดปรับอุณหภูมิ.....	55
3.3.2 การออกแบบชุดปรับอุณหภูมิ.....	56
3.4 การคำนวณ.....	64
3.4.1 การคำนวณน้ำหนักของกล่อง.....	64
3.4.2 การคำนวณการโค้งตัวของคาน.....	64
3.4.3 การคำนวณแกนปากจับยึด.....	66
3.4.4 การคำนวณพลังงานความร้อน.....	67
3.4.5 คำนวณการขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	68
3.4.6 คำนวณความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ.....	69
3.5 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึง.....	70
3.5.1 กล่องของชุดปรับอุณหภูมิ.....	70
3.5.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิและแสดงผล.....	73
3.5.3 ชุดแขนปากยึดจับ.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.4 รางเลื่อน.....	77
3.5.5 ฉนวน.....	78
3.5.6 ชุดเกลิยวเร่ง.....	78
3.5.6 ชุดคานยก.....	79
3.6 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	79
3.6.1 ขนาดของชิ้นทดสอบ.....	79
3.6.2 ออกแบบการทดสอบ.....	81
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	<b>86</b>
4.1 คุณสมบัติของชุดปรับอุณหภูมิ.....	86
4.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	87
4.2.1 ทำการทดสอบชิ้นงานพลาสติก.....	87
4.2.2 ทำการทดสอบชิ้นงานโลหะ.....	90
<b>บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงาน</b>	<b>92</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	92
5.1.1 การสร้างชุดปรับอุณหภูมิเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง.....	92
5.1.2 ผลการทดสอบ.....	92
5.1.3 การอภิปรายผลการทดสอบ.....	92
5.1.4 สรุปผลการทดสอบ.....	93
5.2 การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางในการปรับปรุงในอนาคต.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก ก.....	ผก 1
ภาคผนวก ข.....	ผข 1
ภาคผนวก ค.....	ผค 1

font  
s13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของพลาสติก.....	5
ตารางที่ 2.2 ขนาดของชั้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	16
ตารางที่ 2.3 ขนาดของชั้นทดสอบที่เป็นพลาสติกอ่อนแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	17
ตารางที่ 2.4 ขนาดของชั้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแท่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	18
ตารางที่ 2.5 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	19
ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	38
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของ โซลิกเดสรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type.....	43
ตารางที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในกล่องชั้นใน.....	61
ตารางที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในกล่องชั้นนอก.....	62
ตารางที่ 3.3 วัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในชุดปรับอุณหภูมิ.....	63
ตารางที่ 3.4 บันทึกผลการทดลอง.....	85
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิห้อง.....	87
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	88
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส.....	88
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบโลหะที่อุณหภูมิห้อง.....	90
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	90
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	91
ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point).....	11
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก.....	12
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุประและพลาสติก.....	13
รูปที่ 2.4 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	16
รูปที่ 2.5 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกอ่อนตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	17
รูปที่ 2.6 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแท่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08.....	18
รูปที่ 2.7 ผลของซีบีค.....	26
รูปที่ 2.8 ผลของเพลเทียร์.....	27
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนจุดอ้างอิงจาก 0 ถึง 20°C ซึ่งจะสอดคล้องกับการเลื่อนลงของเส้นโค้งแรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิล.....	29
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล.....	30
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการแตกของกระจกนิรภัยเทมเปอร์กับกระจกนิรภัย.....	36
รูปที่ 2.12 ฉนวนรีดควูล.....	40
รูปที่ 2.13 วงจรการต่อใช้งานแบบพื้นฐานของอาร์เมเจอร์รีเลย์และ โซลิดสเตตตรีเลย์.....	41
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ โซลิดสเตตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type.....	42
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจร โซลิดสเตตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type.....	42
รูปที่ 2.16 วงจรพื้นฐานของ โซลิดสเตตตรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type.....	43
รูปที่ 2.17 รูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจร Solid State Relay แบบ Zero Crossing Type.....	43
รูปที่ 2.18 เส้นโค้งอีลาสติก.....	44
รูปที่ 2.19 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานยื่น.....	46
รูปที่ 2.20 แรงกระทำเป็นแบบกระจายในคานยื่น.....	46
รูปที่ 2.21 แรงกระทำเป็นแรงคู้ควบหรือ โมเมนต์ในคานยื่น.....	47
รูปที่ 2.22 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานช่วงเดียวที่ตำแหน่งกึ่งกลาง.....	47
รูปที่ 2.23 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานช่วงเดียวที่ตำแหน่งไม่กึ่งกลาง.....	48
รูปที่ 2.24 แรงกระทำเป็นแบบกระจายในคานช่วงเดียว.....	48
รูปที่ 2.25 แรงกระทำเป็นแรงคู้ควบหรือ โมเมนต์ในคานช่วงเดียว.....	49
รูปที่ 2.26 การนำความร้อนตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์.....	49
รูปที่ 2.27 การระบายความร้อนออกจากวัตถุ โดยการพาความร้อน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวางแผนและการดำเนินงาน.....	52
รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบพลาสติก.....	53
รูปที่ 3.3 การตัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC Controller.....	54
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu.....	54
รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron.....	55
รูปที่ 3.6 ชุดกล่องปรับอุณหภูมิ.....	57
รูปที่ 3.7 ชุดกล่องปรับอุณหภูมิเมื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง.....	58
รูปที่ 3.8 กล่องปรับอุณหภูมิส่วนด้านใน.....	58
รูปที่ 3.9 กล่องปรับอุณหภูมิส่วนด้านนอก.....	59
รูปที่ 3.10 ชุดปรับอุณหภูมิส่วนที่เป็นกล่องขณะประกอบ.....	59
รูปที่ 3.11 ขาดังและรางเลื่อน.....	59
รูปที่ 3.12 แขนปากคีบ.....	60
รูปที่ 3.13 คานยก.....	60
รูปที่ 3.14 คานยกขณะประกอบกับเกลียวเร่ง.....	61
รูปที่ 3.15 ขนาดของคาน.....	65
รูปที่ 3.16 แขนปากคีบยึดพร้อมสลัก.....	67
รูปที่ 3.17 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิ.....	71
รูปที่ 3.18 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิชั้นนอก.....	72
รูปที่ 3.19 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิชั้นใน.....	73
รูปที่ 3.20 ฮีตเตอร์แห่งรูปตัวยูและตัวดับเบิลยู.....	74
รูปที่ 3.21 เทอร์โมคัปเปิล.....	74
รูปที่ 3.22 ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	75
รูปที่ 3.23 สวิตช์ปิด – เปิด.....	75
รูปที่ 3.24 โซลิตัสเตตรีเลย์.....	76
รูปที่ 3.25 วงจรไฟฟ้า.....	76
รูปที่ 3.26 ชุดแขนปากคีบ.....	77
รูปที่ 3.27 รางเลื่อน.....	77
รูปที่ 3.28 เกลียวเร่ง.....	78
รูปที่ 3.29 ชุดคานยก.....	79
รูปที่ 3.30 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบอะคริลิก.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.31 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบแผ่นโลหะ.....	80
รูปที่ 3.32 การทำออตจูนิ่ง.....	81
รูปที่ 3.33 การประกอบแกนปากยึดจับ.....	82
รูปที่ 3.34 การจับชิ้นทดสอบ.....	82
รูปที่ 3.35 ประกอบชุดปรับอุณหภูมิเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง.....	83
รูปที่ 3.36 หน้าต่างของโปรแกรม.....	84
รูปที่ 4.1 ชุดปรับอุณหภูมิเมื่อประกอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง.....	86
รูปที่ 4.2 แนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความเค้น-ความเครียด ในการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ อะคริลิก.....	89
รูปที่ 4.3 แนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความเค้น-ความเครียด ในการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ โลหะ.....	91

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

วงการอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการใช้วัสดุจำพวกโลหะ โลหะผสม อลูมิเนียม และพลาสติกในการผลิตอย่างกว้างขวาง การนำวัสดุประเภทต่างๆ เหล่านี้มาใช้ผู้ใช้งานควรต้องทราบถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำไปใช้ในการผลิตและการปรับปรุงชิ้นงานเพื่อที่จะนำวัสดุไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้อย่างถูกต้อง โดยการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการต้านแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติทางกลที่มีความสำคัญอย่างหนึ่ง คือ คุณสมบัติการต้านทานการทดสอบแรงดึง

การนำวัสดุไปใช้งานที่สภาพแวดล้อมและอุณหภูมิต่างกัน อุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้มีอิทธิพลอย่างมากกับวัสดุจำพวกพลาสติก การทดสอบค่าแรงต้านแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ระดับอุณหภูมิใช้งาน จะทำให้ทราบค่าการทดสอบที่สามารถนำไปเปรียบเทียบเพื่อดูความเหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องนำไปใช้จริง

การทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิใช้งานของโลหะ โลหะผสม และอลูมิเนียม อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทดสอบน้อย ตรงกันข้ามกับวัสดุจำพวกพลาสติก อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทดสอบแรงดึง พลาสติกบางประเภทสามารถยืดได้ถึง 10 เท่าของความยาวของชิ้นงานทดสอบ ผลการทดสอบของทั้งโลหะ และพลาสติกจะนำมาแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-เครียด (Stress-Strain Diagram) และนำมาใช้คำนวณหาค่าสมบัติทางกลต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบได้ เช่น ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) จุดคราก (Yield Point) พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ความต้านแรงดึง ความเค้นประลัย ความเหนียวริขีเลียนส์ ความแกร่ง ความเค้นจริง และความเครียดจริง โดยนำค่าที่ได้ไปใช้ในการเลือกวัสดุ เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับพลาสติกที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Thermal forming ค่า melt strength มีความสำคัญมาก เพราะทำให้ทราบค่าของแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปได้

จะเห็นได้ว่าการทดสอบแรงดึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม การทดสอบที่จริงจังทำให้สามารถสร้างความมั่นใจในการเลือกใช้วัสดุได้ปลอดภัย สามารถลดต้นทุนในการผลิต รวมไปถึงการรักษาทรัพยากรโลกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากทางสาขาวิศวกรรมอุตสาหการมีเครื่องทดสอบแรงดึงที่มีคุณภาพ แต่ยั้งขาดเครื่องที่ใช้ปรับอุณหภูมิได้อยู่ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบ วางแผนและจัดสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิขึ้นเพื่อใช้ในห้องทดลองของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงหลักการและรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องปรับอุณหภูมิ
2. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิในการทดสอบแรงดึง ที่สามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอยู่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถใช้เครื่องปรับอุณหภูมิในการทดสอบแรงดึงในการทดลองทางวิศวกรรมและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

### 1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบแรงดึงแบบปรับอุณหภูมิได้ โดยมีขอบเขตอุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบแรงดึงที่ 150 องศาเซลเซียส
2. ความสามารถของเครื่อง สามารถใช้ปรับอุณหภูมิสำหรับทดสอบชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 เพื่อใช้ทดสอบวัสดุประเภทพลาสติก และสามารถทดสอบชิ้นทดสอบ โลหะได้
3. เครื่องนี้จะใช้เป็นส่วนที่ใช้ครอบวัสดุทดสอบในขณะที่เครื่องทดสอบแรงดึงทำงาน เพื่อใช้ในการปรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ และสามารถอ่านค่าอุณหภูมิภายในกล่องได้
4. เครื่องปรับอุณหภูมิสามารถเคลื่อนที่ขึ้นสูงสุด 33 เซนติเมตร
5. ชิ้นงานที่สามารถทดสอบได้ ต้องมีระยะ gauge length อย่างน้อย 11 เซนติเมตร

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบเครื่องปรับอุณหภูมิเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอยู่
2. สามารถเลือกซื้อวัสดุให้มีคุณสมบัติและคุณลักษณะตามสภาพแวดล้อมในการใช้งานได้ตรงตามความต้องการ
3. สามารถใช้โปรแกรม Solid Works เพื่อช่วยในการออกแบบเครื่องปรับอุณหภูมิ
4. สามารถใช้เครื่อง CNC Controller ในการตัดชิ้นทดสอบได้
5. ได้รับความสัมพันธ์ของ ความเค้น-ความเครียดที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>2</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปฏิญญาพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาทฤษฎี เนื้อหา มาตรฐานต่างๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา โดยได้ทำการศึกษาจากตำรา เอกสาร บทความ รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นองค์ความรู้ และแนวทางในการศึกษาได้อย่างครอบคลุม ถูกต้อง เพื่อให้ปฏิญญาพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ ซึ่งประกอบไปด้วย

### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับโลหะ [1]

วัสดุในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปนั้นมียุหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ โลหะ ทั้งนี้เนื่องจากโลหะนั้นหาได้ง่าย ราคาไม่แพง แข็งแรง ทนทาน และแปรสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก โลหะดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ โลหะจำพวกเหล็ก และโลหะนอกจำพวกเหล็ก

#### 2.1.1 โลหะจำพวกเหล็ก

เหล็กดิบ เป็นผลผลิตที่ได้มาจากเตาสูง หรือเรียกว่า เตาบลาสต์เฟอร์เนส (Blast Furnace) โดยการถลุงสินแร่เหล็ก ความร้อนที่ใช้ในการถลุงนั้น ได้มาจากการเผาไหม้ของถ่านโค้ก (Coke) โดยมีลมร้อนเป็นสิ่งที่ช่วยในการเผาไหม้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยให้ความร้อนสูงได้ถึง 3000 องศาฟาเรนไฮด์ หรือประมาณ 1649 องศาเซลเซียส ซึ่งในระดับอุณหภูมิดังกล่าวนี้ สามารถหลอมละลายสินแร่ต่าง ๆ ได้ และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ สิ่งสกปรกซึ่งในกระบวนการหลอมละลายสินแร่ด้วยเตาสูงนั้น จะมีสิ่งสกปรกเกิดขึ้น ซึ่งเราเรียกว่า สแลก (Slag) ซึ่งต้องกำจัดออกจากน้ำโลหะ ก่อนนำโลหะนั้นไปเทลงสู่แบบหล่อสำหรับวัตถุดิบที่ใช้ถลุงเหล็กดิบนั้น ได้แก่ สินแร่เหล็ก หินปูน ถ่านโค้ก และเหล็กใช้ซ้ำ ซึ่งจะถูกรรจลงในเตาสูงตามลำดับ

เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน เหล็กหล่อคล้ายกับเหล็กกล้า (Steel) ตรงที่เหล็กหล่อนั้นเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน เพียงแต่ว่าปริมาณของคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า คือ มีคาร์บอนตั้งแต่ร้อยละ 2 - 6.67 เปอร์เซ็นต์ ในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อโดยทั่วไปแล้ว จะมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 2.5 - 4 เปอร์เซ็นต์ ถ้าปริมาณคาร์บอนมากกว่านี้เหล็กจะสูญเสียคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (Ductility) คือ เปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก ปกติเหล็กหล่อส่วนมากจะขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียวเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าจึงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยการรีดหรือการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงได้ การขึ้นรูปเหล็กหล่อที่อุณหภูมิสูงนั้นทำได้ยาก แต่วิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปถึงแม้ว่ารูปร่างจะซับซ้อนก็สามารถทำได้ โดยการหลอมเหล็กให้ละลายแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำด้วยทราย หรือวัสดุทนความร้อนจึงได้ชื่อตามกรรมวิธีการขึ้นรูปว่า เหล็กหล่อ แม้ว่าเหล็กหล่อส่วนใหญ่จะให้คุณสมบัติความแข็งแรงดึงสูงสุด ต่ำ และขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียว แต่เหล็กหล่อมียุราคาถูกกว่า มีจุดหลอมตัวต่ำ สามารถขึ้นรูปได้รูปร่างง่ายกว่าเหล็กกล้า และยังสามารถปรับคุณสมบัติต่าง ๆ โดยการเติมธาตุผสมที่เหมาะสม และการอบชุบที่ก็จะทำให้คุณสมบัติของเหล็กหล่อนั้นเปลี่ยนแปลงได้อย่างกว้างขวาง จนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กหล่อบางชนิดมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าทำให้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเป็นไปอย่างกว้างขวาง รวมทั้งปริมาณการผลิตเหล็กหล่อก็เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว ชนิดของเหล็กหล่อสามารถจำแนกประเภทได้หลายลักษณะ มีทั้งจำแนกโดยกำหนดส่วนผสม, การอบชุบภายหลังการหล่อ, อัตราการเย็นตัวของเหล็กภายในแบบหล่อ และธาตุผสมตลอดจนสิ่งเจือปน แต่ที่แพร่หลายเป็นที่ยอมรับกันนั้นอาศัยลักษณะโครงสร้างพื้นฐานและลักษณะการรวมตัวของคาร์บอนเป็นหลักในการจำแนกประเภท ซึ่งจัดไว้ 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ เหล็กหล่อสีขาว เหล็กหล่อสีเทาหรือเหล็กหล่อเหนียว เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ

เหล็กกล้า เป็นเหล็กที่ถูกนำไปใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้านั้นมีคุณสมบัติในการรับแรงต่างๆ ได้ดี เช่น แรงกระแทก (Impact Strength) แรงดึง (Tensile Strength) แรงอัด (Compressive Strength) และแรงเฉือน (Shear Strength) ซึ่งธาตุผสมส่วนใหญ่จะเป็นทั้งโลหะ และอโลหะ เช่น โมลิบดีนัม ทังสเตน วานาเดียม เป็นต้น สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อเหล็กกล้านั้น จะทำให้โครงสร้างเล็ก ๆ (Microstructure) ของเหล็กกล้าเปลี่ยนไป

### 2.1.2 โลหะนอกจำพวกเหล็ก

โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ซึ่งโลหะหนักมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมอย่างมาก และยังเป็นค้ำยันโลหะผสมอีกหลายชนิดด้วยกัน โลหะหนักที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ ทองแดง เงิน ตะกั่ว และดีบุก

โลหะเบา คือ โลหะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร โดยทั่วไป ได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และเบริลเรียม

โลหะผสม คือ โลหะที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมที่จำเป็นต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานในแต่ละด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกล คือ ต้องมีความสามารถที่จะรับแรงต่างๆ ได้ แต่โดยปกติโลหะบริสุทธิ์ส่วนมากจะอ่อนและรับแรงต่างๆ ได้ไม่มาก เมื่อจะนำไปใช้งานก็ไม่เหมาะสม ฉะนั้น จำเป็นต้องเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะเหล่านั้น โดยการผสมธาตุต่างๆ ลงไป ตัวอย่างของโลหะผสมได้แก่ ทองเหลือง บรอนซ์ และโลหะซินเตอร์

## 2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก [2]

พลาสติก หรือที่เรียกว่า โพลีเมอร์ (Polymer) เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากขบวนการที่เรียกว่า โพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้หน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) เกิดการรวมตัวเชื่อมต่อกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนสถานะทางการภาพจากเดิมที่อาจอยู่ในรูปของก๊าซหรือของเหลว ให้อยู่ในรูปของแข็ง ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ พลาสติกที่มีใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ใหญ่ๆ คือ

### 2.2.1 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พลาสติกชนิดนี้จะมีรูปร่างที่ถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ความดันหรือตัวเร่งปฏิกิริยา การขึ้นรูปทำได้ยาก และไม่สามารถหลอมเหลวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนสูง รวมทั้งการใช้งานยังอยู่ในวงแคบ ทำให้ปัจจุบันมีการใช้งานในอุตสาหกรรมไม่กี่ประเภท พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน ฟีนอลิก ยูเรียฟอรัมาดีไฮด์ โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อ้อมตัว เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์

เครื่องครัวต่างๆ เช่น ถ้วยชาม หูหม้อ กระจุก ชิ้นส่วนปลั๊กไฟ พลาสติกหล่อ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน ที่คาดผม เป็นต้น เทอร์โมเซตติงมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ที่สำคัญและใช้กันอยู่ทั่วไปมีดังนี้คือ อะมิโน (Amino) ฟีนอลิก (Phenolic) โพลีเอสเตอร์ (Unsaturated Polyester Resin) ซิลิโคน (Silicone) ยูรีเทน (Uretane) หรือ โพลียูรีเทน (Polyurethane)

## 2.2.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาให้ใหม่ได้อีกครั้งหลังจากนำไปหล่อทำผลิตภัณฑ์แล้ว เปรียบเสมือนน้ำแข็งเมื่อทำให้เย็นน้ำจะแข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็จะละลาย และเมื่อทำให้เย็นก็จะกลับมาแข็งตัวอีกครั้ง และจะกลับไปกลับมาไม่มีที่สิ้นสุด เรียกว่า Plastics With a Memory พลาสติกประเภทนี้เมื่อได้รับความร้อน หรือความดันระหว่างขบวนการขึ้นรูป จะเปลี่ยนแปลงสถานะกายภาพ กล่าวคือ เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนนุ่มและเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัว โดยที่โครงสร้างทางเคมีจะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับสู่ขบวนการซ้ำๆ ได้นอกจากนี้ยังสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายต้นทุนการผลิตต่ำและมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ของเด็กเล่น ดอกไม้ประดิษฐ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์

ในประเทศไทยนิยมใช้พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติกกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในงานหลายประเภท ดังตารางที่ 2.1

เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายประการของพลาสติก โดยเฉพาะต้นทุนที่ต่ำ ทำให้การใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมขยายตัวอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นมาก

ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของพลาสติก

เลข สัญลักษณ์ การรีไซเคิล	ชนิดของ พลาสติก	ตัวอย่าง	จุดหลอมเหลว
1	เพท (PET)	เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความใส มองทะลุได้ มีความแข็งแรงทนทานและเหนียว ป้องกันการผ่านของก๊าซได้ดี นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำปลา ขวดน้ำมันพืช เป็นต้น	มีจุดหลอมเหลว 250 – 260 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.38 – 1.39
2	HDPE	เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง ค่อนข้างนิ่ม มีความเหนียวไม่แตกง่าย นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ถุงร้อนชนิดซุ่น ขวดนม เป็นต้น	มีจุดหลอมเหลว 130 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.95 – 0.92
3	พีวีซี (PVC)	เป็นพลาสติกที่มีลักษณะทั้งแข็งและนิ่ม สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ มีสีสันทสวยงาม เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก เช่น ท่อพีวีซี สายยาง แผ่นฟิล์มห่ออาหาร เป็นต้น	มีจุดหลอมเหลว 75-90 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>5</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชนิดและสมบัติของพลาสติก (ต่อ)

เลข สัญลักษณ์ การรีไซเคิล	ชนิดของ พลาสติก	ตัวอย่าง	จุดหลอมเหลว
4	LDPE	เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความนิ่มกว่า HDPE มีความเหนียว ยืดตัวได้ในระดับหนึ่ง ส่วนใหญ่ใช้มองเห็น ได้นิยมนำมาใช้ทำแผ่นฟิล์ม ห่ออาหาร	จุดหลอมเหลว 110 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.92-0.94
5	PP	เป็นพลาสติกที่ส่วนใหญ่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ มีความแข็งและเหนียว คงรูปดี ทนต่อความร้อน และสารเคมี นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารในครัวเรือน เช่น ถังร้อน ชนิดใส จาม ชาม อุปกรณ์ อุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด	มีจุดหลอมเหลว 160 – 170 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90 – 0.91
6	PS	เป็นพลาสติกที่มีความใส แข็งแต่เปราะแตกง่าย สามารถทำเป็นโฟมได้ นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่อง โยคีร์ม กล่องโฟม ฯลฯ	มีจุดหลอมเหลว 70 – 115 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.90 – 0.91

### 2.3 การทดสอบแรงดึง [3]

การทดสอบแรงดึงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.3.1 เครื่องมือทดสอบ

การทดสอบสมบัติความเค้นของชิ้นงาน และความเครียดของวัสดุนั้นสามารถที่จะทำได้ด้วยการทดสอบแรงดึง โดยการให้ภาระแก่ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามมาตรฐาน และทำการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถจะใช้เครื่องมืออย่างง่าย ๆ เช่น การนำชิ้นงานมาถ่วงด้วยคีม น้ำหนัก ไปจนถึงเครื่องทดสอบอัตโนมัติที่ใช้ระบบไฟฟ้าหรือแรงดันน้ำมัน ในการขับเคลื่อน รวมทั้งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม และจัดเก็บข้อมูล ปัจจุบันเครื่องทดสอบอัตโนมัติประเภทนี้รู้จักกันดีในชื่อของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) เนื่องจากเครื่องทดสอบสามารถมีรูปแบบการให้แรงกระทำที่หลากหลายแบบแก่ชิ้นทดสอบ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์จึงถือได้ว่าเป็นเครื่องทดสอบพื้นฐานสำหรับงานทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยเครื่องมือนี้จะทำหน้าที่ในการให้แรงตามที่กำหนดไว้แก่ชิ้นงานทดสอบหรือ วัสดุ ได้อย่างถูกต้อง และสามารถที่จะตรวจวัดแรงที่ให้แก่วัสดุนั้น ได้อีกด้วย โดยในการให้แรงแก่ชิ้นงานนั้นสามารถที่จะทำได้หลายประเภท และหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการใช้อุปกรณ์ประกอบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงดึง (Tension) แรงอัด (Compression) แรงดัด (Bending) แรงบิด (Torsion) หรือแรงเฉือน (Shear) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>6</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1 ข้อกำหนดพื้นฐานของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์

เครื่องทดสอบจะต้องสามารถให้แรงแก่ชิ้นงานทดสอบได้อย่างถูกต้องตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปแล้วควรที่จะสามารถอยู่ในระดับของความผิดพลาดที่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ของค่าที่อ่านได้แต่ค่าความผิดพลาด 0.5 เปอร์เซ็นต์ หรือน้อยกว่าเป็นสิ่งที่ต้องการ และโดยทั่วไปนั้นสามารถที่จะทำได้สำหรับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ในปัจจุบัน

- เครื่องทดสอบจะต้องมีความไวต่อการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ให้ แม้ในระดับต่ำ
- อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานหรือแนวของการให้แรงแก่ชิ้นงานจะต้องได้ศูนย์ (Alignment) ไม่มีการเอียงศูนย์ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายของแรงและสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการวัดอยู่
- ในการทดสอบนั้น การเคลื่อนที่ของครอสเฮด (Crosshead) จะต้องไม่เกิดการสั่นสะเทือน (Rocking) การบิด (Twisting) หรือการเลื่อนตำแหน่งในแนวนอน (Shifting)
- การให้แรงแก่ชิ้นงานทดสอบจะต้องมีความสม่ำเสมอ และสามารถที่จะควบคุมได้
- การติดตั้งชิ้นงานทดสอบหรืออุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เข้าสู่เครื่องทดสอบจะต้องสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว

### 2.3.1.2 ประเภทของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์

โดยทั่วไป เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่นิยมใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ตามหลักการของการให้แรงของเครื่องทดสอบ ได้แก่ เครื่องทดสอบแบบไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical machine) ที่ขับเคลื่อนด้วยสกรู (Crew driven) และเครื่องทดสอบที่ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก หรือแรงดันน้ำมัน (Hydraulic machine) อย่างไรก็ตาม ในบางครั้งสามารถแบ่งประเภทเครื่องมือได้เป็นแบบประเภทสถิต (Static-type machine) หรือ แบบประเภทพลวัต (Dynamic machine) นอกจากนี้ในแต่ละประเภทก็ยังแบ่งออกเป็นรุ่นต่างๆ ตามความสามารถในการให้แรงได้สูงสุดของเครื่องทดสอบนั้นๆ

#### 1) เครื่องทดสอบที่ขับเคลื่อนด้วยการเคลื่อนที่ของสกรู

เครื่องทดสอบประเภทนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนครอสเฮดให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งผ่านระบบสกรูเพื่อก่อให้เกิดแรงขึ้นในชิ้นงานทดสอบ เหมาะสำหรับการทดสอบที่มีระดับของการให้แรงที่ไม่สูงมาก และการเปลี่ยนแปลงระดับการให้แรงที่ไม่เร็วมาก จึงเหมาะกับการทดสอบแบบสถิต (Static test) แต่จะไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic test) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำไปมาอย่างรวดเร็ว เครื่องทดสอบประเภทนี้สามารถที่จะมีสกรูขับเคลื่อนได้ตั้งแต่ 1-4 ชุด ขึ้นอยู่กับระดับของแรงสูงสุดที่เครื่องมือจะสามารถสร้างขึ้นได้ ซึ่งสกรูนี้จะทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนครอสเฮดและสร้างความมั่นคงให้แก่เครื่องทดสอบ

#### 2) เครื่องทดสอบที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันน้ำมัน

เครื่องทดสอบประเภทนี้จะใช้แรงดันน้ำมันในการขับเคลื่อนครอสเฮดให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งและก่อให้เกิดแรงขึ้นในชิ้นงานทดสอบ ที่ขนาดของเครื่องเท่ากัน เครื่องทดสอบแบบแรงดันน้ำมันส่วนใหญ่มีราคาสูงกว่าแบบสกรู โดยส่วนใหญ่จึงเหมาะสำหรับการทดสอบชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ในระดับของการให้แรงที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงระดับการให้แรงที่รวดเร็วดังเช่น ในการทดสอบประเภทพลวัต ระดับแรงดันน้ำมันของเครื่องทดสอบจะทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนครอสเฮดหรือ แอคชูเอเตอร์ (Actuator) เครื่องทดสอบประเภทนี้จะต้องมีเสาข้าง (Column) เช่นเดียวกับเครื่องที่ขับเคลื่อนด้วยสกรูเพื่อสร้างความมั่นคงให้แก่เครื่องทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถที่จะมีได้ตั้งแต่ 2-4 เสาขึ้นอยู่กับระดับของแรงสูงสุดที่เครื่องทดสอบจะสามารถสร้างขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากเครื่องทดสอบสองระบบนี้แล้ว เครื่องทดสอบในระบบอื่นที่มีการใช้งานและจำหน่ายทางการค้า ได้แก่เครื่องทดสอบระบบลมอัด (Pneumatic) และเครื่องทดสอบระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic) ซึ่งทั้งสองประเภทนี้ จะได้รับความนิยมน้อยกว่าสองประเภทแรก และเหมาะต่อการทดสอบแรงกระทำระดับต่ำ

### 2.3.1.3 ส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์

เครื่องทดสอบเอนกประสงค์นั้นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนต่างๆมากมาย หากแต่สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ที่ทำหน้าที่หลักแตกต่างกันดังนี้

#### 1) โครงเครื่องทดสอบ (Machine frame)

โครงเครื่องทดสอบทำหน้าที่ในการให้ความมั่นคง และความแข็งแรงแก่เครื่องทดสอบ เนื่องจากในการทดสอบต่างๆ นั้นจะต้องมีการให้แรงแก่ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งแรงดังกล่าวย่อมที่จะต้องมีการส่งผ่านถึงเครื่องทดสอบเช่นกัน ดังนั้น ถ้าเครื่องทดสอบไม่มีความมั่นคงแล้ว หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดการสั่นสะเทือน ไม่ว่าจะเป็นการยุบตัวหรือยืดตัวหรือบิดตัวของเครื่องทดสอบในระหว่างการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำลดลง เนื่องจากแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั้นจะมีส่วนมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเครื่องทดสอบด้วย โดยทั่วไปแล้วโครงเครื่องทดสอบจะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ ฐานเครื่อง (Machine base) และเสาข้าง (Column) โครงของเครื่องโดยทั่วไปแล้วจะมีขนาด และจำนวนเสาข้างขึ้นอยู่กับระดับของแรงทดสอบสูงสุดของเครื่องทดสอบที่สามารถให้แก่ชิ้นงานทดสอบ ได้ เช่น การทดสอบชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่มีความแข็งแรงหรือความแกร่งต่ำ ก็จะมีขนาดเล็กและสามารถที่จะมีเสาข้างได้แค่ 1 เสา และมักเป็นเครื่องทดสอบ ขับเคลื่อนด้วยสกรู เช่น เครื่องทดสอบสำหรับทดสอบเส้นด้าย เส้นใย เส้นลวด หรือถูงมือ เป็นต้น เมื่อชิ้นงานทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือมีความแข็งแรงหรือความแกร่งเพิ่มมากขึ้น ขนาดของเครื่องก็จะเพิ่มขึ้นและจำนวนเสาข้างก็จะมีจำนวนมากขึ้นเช่นกัน โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะมีจำนวนเสาข้างสูงสุดไม่เกิน 4 เสา

#### 2) คרוสเฮดและแอกชูเอเตอร์ (Crosshead and Actuator)

คרוสเฮดเป็นส่วนประกอบของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่มักจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดระดับแรงที่เกิดขึ้นของเครื่องทดสอบ และอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน คרוสเฮดมีลักษณะเป็นคานขวางสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตามระบบการขับเคลื่อนของเครื่องทดสอบนั้นๆ เพื่อสร้างแรงขึ้นในชิ้นงานทดสอบ การเคลื่อนที่ของคרוสเฮดดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมได้ตามอัตราเร็ว (Crosshead speed) ที่กำหนดหรือตามอัตราความเค้น (Stress rate) หรืออัตราความเครียด (Strain rate) ที่เกิดขึ้นได้ ในกรณีของเครื่องทดสอบที่ขับเคลื่อนด้วยแรงดันน้ำมัน โดยส่วนใหญ่คרוสเฮด จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามการควบคุมของเครื่องทดสอบในการดำเนินการทดสอบ หากแต่จะใช้การเคลื่อนที่ของแอกชูเอเตอร์ในการสร้างแรงให้เกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบตามการควบคุมของเครื่องทดสอบแทน บริเวณคרוสเฮดจะติดตั้งเฉพาะอุปกรณ์วัดแรงที่เกิดขึ้นเท่านั้น แต่คרוสเฮดจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในบางขณะเมื่อเครื่องทดสอบไม่ได้ถูกใช้งานในการทดสอบเพื่อจุดประสงค์ในการปรับเพิ่มลดพื้นที่ใช้งานของเครื่องทดสอบ ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นแล้วจะต้องถูกล็อกให้อยู่กับที่ เพื่อป้องกันการขยับตัวซึ่งจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบได้

#### 3) อุปกรณ์วัดแรง (Load indicator)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดแรงที่สร้างขึ้นจากเครื่องทดสอบและถูกส่งผ่านให้ชิ้นงานทดสอบเพื่อการบันทึก ตรวจสอบ หรือเป็นข้อมูลในการป้อนกลับไปยังส่วนขับเคลื่อนเพื่อสร้างแรง ส่วนใหญ่ในปัจจุบันอุปกรณ์ประเภทนี้จะเป็นเซลล์วัดแรง (Load cell) ซึ่งภายในมักจะเป็นเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่ต่อกันเป็นวงจร อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นวงจรภายใน ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นจะสร้างสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้เข้าเป็นเอกสารการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นวงจรถึงได้ก็จะถูกเทียบค่าเป็นระดับของแรงที่เกิดขึ้นได้ เซลล์วัดแรงจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นตัวเซลล์ (Body) ซึ่งภายในบรรจุวงจรรีเล็กทรอนิกส์ และมีส่วนอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector) เพื่อติดตั้งหรือยึดติดกับอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อเป็นการถ่ายเทแรงมาสู่เซลล์วัดแรง เซลล์วัดแรงนี้จะต้องติดตั้งอย่างมั่นคง และได้แนวเส้นอยู่ที่ครอสเสดทางขวามือ

ข้อควรระวังในการใช้เซลล์วัดแรง

- อย่าใช้แรงบิดกับเซลล์วัดแรงที่ไม่ได้รับการออกแบบมาสำหรับการวัดแรงบิด
- ห้ามใช้เซลล์วัดแรงในการทดสอบที่ใช้แรงทดสอบเกินค่าสูงสุดของเซลล์วัดแรง
- ควรตั้งค่าพิคคสูงสุดของการใช้งานเซลล์วัดแรงไว้ในโปรแกรมการทดสอบทุกครั้งเพื่อป้องกันการใช้แรงเกินพิคคสูงสุดของเซลล์วัดแรงซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

#### 4) อุปกรณ์วัดระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

อุปกรณ์ประเภทนี้จะทำหน้าที่ในการวัดระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานระหว่างการทดสอบซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญข้อมูลหนึ่งในการทดสอบ โดยค่าที่ได้นี้อาจจะนำไปเป็นข้อมูลใช้ในการควบคุมการดำเนินการทดสอบของเครื่องทดสอบ เช่น ในกรณีของการควบคุมการเคลื่อนที่ของครอสเสดด้วยอัตราความเร็ว หรือใช้ประกอบการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ได้แก่ การนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อคำนวณค่าทางกลอื่นๆ ต่อไป โดยทั่วไปแล้ว การวัดระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสามารถทำได้หลายวิธี แต่โดยทั่วไปแล้วแบ่งได้เป็น 3 วิธีหลักได้แก่

- การใช้ระยะห่างระหว่างปากจับ (Grip separation)

วิธีการนี้จะใช้ระยะการเคลื่อนที่ของปากจับเป็นระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้จะมีความถูกต้องน้อยกว่าวิธีอื่น เนื่องจากเทคนิคนี้จะใช้ได้ดีในกรณีที่ชิ้นงานตัวอย่างมีลักษณะที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดชิ้นงานเท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเท่ากันโดยตลอดทั้งชิ้น เช่น ในกรณีการทดสอบแผ่นฟิล์ม แต่ไม่เหมาะในกรณีของชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากัน เช่น ชิ้นงานรูปคัมเบลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในส่วนต่างๆ ของชิ้นงานก็จะมีค่าที่ไม่เท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน นอกจากนี้ สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกข้อ ได้แก่ ระยะการเคลื่อนที่ของปากจับนั้นจะเป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงระยะของปากจับเองและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่าง นอกจากนี้อาจเกิดการลื่นหลุดของชิ้นงาน หรือการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานที่บริเวณปากจับยึด จึงทำให้การใช้ระยะการเคลื่อนที่ของปากจับในการวัดระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานที่ถูกต้องอย่างแท้จริงนั้นไม่เหมาะสม แต่อาจจะสามารถใช้ในการเปรียบเทียบได้ในบางกรณี

- การใช้อุปกรณ์ติดตามระยะ (Extensometer)

วิธีการนี้ ได้แก่ การกำหนดระยะของการวัดเริ่มต้น (Gauge length) ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานแล้วใช้อุปกรณ์ในการติดตามระยะที่เปลี่ยนไปของบริเวณที่กำหนดนั้นๆ โดยใช้อุปกรณ์ดังกล่าวอาจจะเป็นประเภทสัมผัส (Contact type) หรือแบบไม่สัมผัส (Non-contacting type) ก็ได้ การใช้อุปกรณ์ประเภทนี้จะสามารถทำการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบได้ละเอียดกว่าวิธีการใช้ระยะห่างระหว่างปากจับ เนื่องจากสามารถติดตั้งอุปกรณ์ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบซึ่งจะสามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการจับยึดชิ้นงานได้ อุปกรณ์แบบสัมผัสนั้นจะใช้งานโดยการนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวซึ่งถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบาไปยึดติดอยู่บนชิ้นงานทดสอบโดยใช้แรงกด ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในกรณีที่วัสดุมีคุณสมบัติสูงพอสมควรที่ชิ้นงานทดสอบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ติดตั้ง นอกจากนี้จะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดการติดตั้งอุปกรณ์ประเภทนี้ทำให้เกิดแรงกดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนเกินไปเนื่องจากจะทำให้เกิดความเข้มความเค้นในชิ้นงานมีผลต่อการเกิดการแตกหักในบริเวณจุดสัมผัสได้ โดยอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีระยะในการวัดที่แบ่งออกได้เป็นหลายช่วงทั้งระยะสั้นเพียงไม่กี่มิลลิเมตร หรืออาจจะมากถึงหลายสิบเซนติเมตรขึ้นอยู่กับารออกแบบของอุปกรณ์ ส่วนระบบในการวัดระยะนั้นก็อาจจะเป็นประเภทที่ใช้เกจวัดความเครียดหรือ LVDT (Linear Variable Differential Transducer) หรือระบบอื่นๆ แต่เป็นระบบใดก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม

สำหรับอุปกรณ์แบบไม่สัมผัสนั้น ในการใช้งานจะไม่มีส่วนใดที่สัมผัสกับชิ้นงาน ทำให้มีผลดีในแง่ของการที่ไม่เป็นการรบกวนชิ้นงาน ไม่สร้างความเค้นหรือความเครียดลงบนชิ้นงานทดสอบ เหมาะสมต่อการทดสอบชิ้นงานที่มีค่ามอดูลัสหรือความแข็งแรงต่ำหรือมีความบาง รวมทั้งมีประโยชน์ในการทดสอบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนจนไม่สามารถใช้อุปกรณ์ชนิดสัมผัสได้สะดวก ตัวอย่างของอุปกรณ์วัดความเครียดประเภทนี้ เช่น อุปกรณ์ติดตามระยะแบบเลเซอร์ (Laser extensometer) ซึ่งจะใช้เลเซอร์ในการกวาดไปบนชิ้นงานซึ่งมีแถบสะท้อนแสงติดอยู่ในบริเวณที่ต้องการวัดและใช้การตรวจสอบระยะเวลาการสะท้อนแสงเลเซอร์กลับมายาที่เปลี่ยนแปลงไปกับระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ นอกจากนี้ก็ยังมีอุปกรณ์ติดตามระยะแบบกล้องวิดีโอ (Video extensometer) ซึ่งใช้หลักการเก็บภาพของชิ้นงานทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกล้อง CCD แล้วใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพเข้ามาประยุกต์ใช้งานในการวัดระยะที่เปลี่ยนแปลงไป อุปกรณ์ติดตามระยะนี้สามารถใช้งานได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง แต่ในการใช้งานจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกินระยะสูงสุดหรือเกิดความเสียหายจากแรงกระทำในการทำการทดสอบระหว่างชิ้นงานทดสอบเกิดการแตกหักเสียหาย

#### - การใช้เกจวัดความเครียด (Strain gauges)

เกจวัดความเครียดมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มวงจรขนาดเล็กรูปสี่เหลี่ยมที่ใช้สำหรับติดบนผิวชิ้นงานในบริเวณที่จะทำการวัดความเครียดของวัตถุ โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในบริเวณนั้นจะทำให้วงจรในแผ่นฟิล์มนั้นเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าตามระยะการเคลื่อนที่ ในการใช้งานจะติดแผ่นฟิล์มนี้ลงบนบริเวณที่ต้องการจะวัดด้วยสารยึดติดแล้วทำการต่อสายไฟเพื่อนำสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งคือความต้านทานที่เปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขดลวดลวดดัดงอซึ่งเป็นผลโดยตรงมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานทดสอบไปยังอุปกรณ์ประมวลผล อุปกรณ์ประเภทนี้เหมาะกับการใช้วัดความเครียดในระดับจุลภาค หรือต้องการความละเอียดในการวัดที่บริเวณต่างๆ เนื่องจากขนาดเล็ก สามารถที่จะวัดได้เป็นบริเวณกว้าง อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ประเภทของเกจวัดความเครียดเป็นสิ่งที่ต้องระมัดระวังเนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสต่ำ การใช้แผ่นอุปกรณ์นี้ติดลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบอาจมีผลในการเสริมแรงชิ้นทดสอบในบริเวณนั้นๆ ได้ นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์ประเภทนี้ค่อนข้างมีความยุ่งยากในการเตรียมเนื่องจากต้องมีการติดอุปกรณ์นี้ลงบนชิ้นงานทดสอบล่วงหน้า ในการติดจะต้องระมัดระวังให้แผ่นฟิล์มขนานกับทิศทางของการวัด และสารยึดติดที่ใช้ในการติดจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติก นอกจากนี้ประเด็นของการขยายตัวทางความร้อนหรือการขยายตัวเนื่องจากความชื้นของพลาสติกบางประเภทอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในผลการทดสอบได้ ทำให้ใช้เวลามากกว่าสำหรับการทดสอบแต่ละครั้งเมื่อเทียบกับการใช้อุปกรณ์ติดตามระยะ และไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกด้วย แต่เมื่อเทียบราคาต่อหน่วยแล้วจะต่ำกว่ามากและมีความยืดหยุ่นในการใช้งานในลักษณะต่างๆมากกว่า

#### 5) อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน

ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบเนกประสงค์นี้ทำหน้าที่ในการยึดจับชิ้นงานทดสอบให้อยู่ในลักษณะของการทดสอบที่กำหนดไว้ตลอดการดำเนินการทดสอบ โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายก่อนการทดสอบ หรือแม้ในระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้อุปกรณ์ยึดจับชิ้นงานยังทำหน้าที่ในการกำหนดให้ลักษณะของแนวแรงเกิดขึ้นในเอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นำมาใช้เป็นแบบอย่างในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

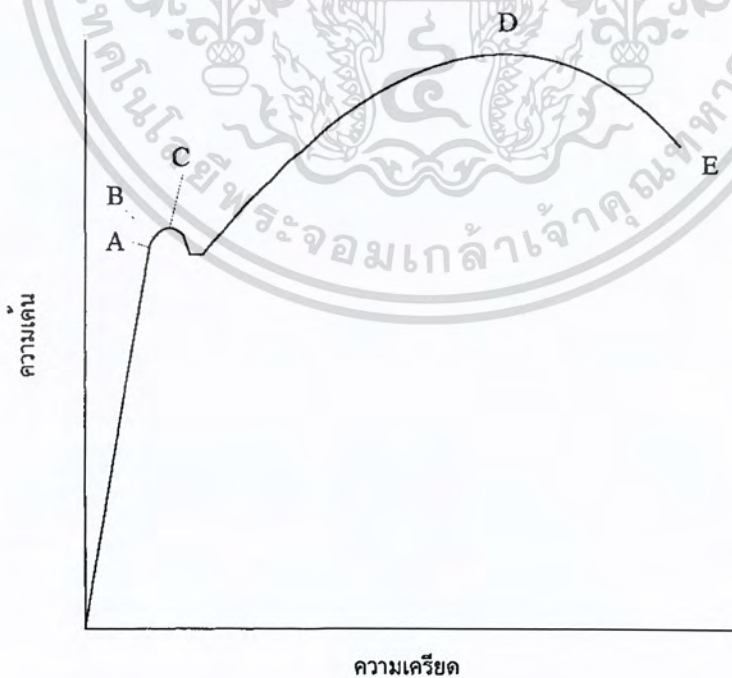
ชิ้นงานตามลักษณะของการทดสอบที่กำหนดไว้อีกด้วย อุปกรณ์ยึดจับนี้จะถูกติดตั้งเข้ากับ โครงเครื่องและครอสเฮด เพื่อทำหน้าที่ถ่ายทอดแรงกระทำจากเครื่องทดสอบสู่ชิ้นงาน โดยในการติดตั้งอุปกรณ์ยึดจับนี้ต้องมีความมั่นคง และได้ ศูนย์กับศูนย์กลางของเครื่องทดสอบ เพื่อป้องกันการเอียงศูนย์กลางของการส่งผ่านของแรงกระทำ ต้องมีความแข็งแรงเพียง พอที่จะ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในระหว่างการทดสอบอีกด้วย อุปกรณ์ยึดจับนั้นมีหลายประเภทให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับ ประเภทของการทดสอบ และประเภทของวัสดุ การเลือกใช้ อุปกรณ์ยึดจับที่ไม่เหมาะสมย่อมส่งผลถึงความถูกต้อง ของผลการทดสอบที่ได้

6) ระบบควบคุมและคอมพิวเตอร์ (Controller and Computer)

ในการดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องเอนกประสงค์นี้ จะต้องมีการควบคุมและตรวจวัดหลายประการ สิ่งที่เรา จะต้องควบคุมได้แก่ อัตราการให้แรงกระทำต่อวัสดุหรือชิ้นงานตัวอย่างและต้องมีการตรวจวัดผลการให้แรงกระทำ ที่ได้และการตอบสนองของวัสดุในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างออกมา เพื่อทำการจัดเก็บและนำไปวิเคราะห์ต่อไป ปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างสูงต่อการใช้งานทางด้าน การทดสอบต่างๆ โดยทั้งทำหน้าที่ควบคุมและ จัดเก็บข้อมูล ทั้งนี้เนื่องจากความสะดวกในการใช้งาน และราคาที่ไม่สูง ดังนั้น โดยทั่วไปแล้วระบบควบคุมและจัดเก็บ ข้อมูลของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์จึงจะเป็นการใช้งานผ่านระบบคอมพิวเตอร์แทบทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นเครื่อง คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือจอคอมพิวเตอร์ของเครื่องมือ โดยเฉพาะ

2.3.2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบ

โดยพื้นฐานแล้ว สิ่งที่ได้จากการทดสอบแรงดึง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสามารถเปลี่ยนให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบที่เกิดขึ้น จากข้อมูลดิบที่ ได้นี้ สามารถนำมาแสดงเป็นเส้นโค้ง ได้ดังรูปที่ 2.1



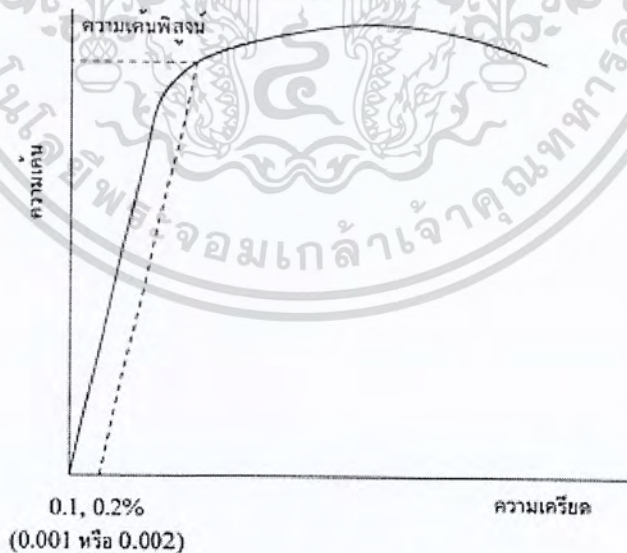
รูปที่ 2.1 เส้น โด้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>11</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) คือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ว วัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุ โลหะหลายชนิด เช่น พวกลเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่ก็มีวิธียุติได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.2 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.2

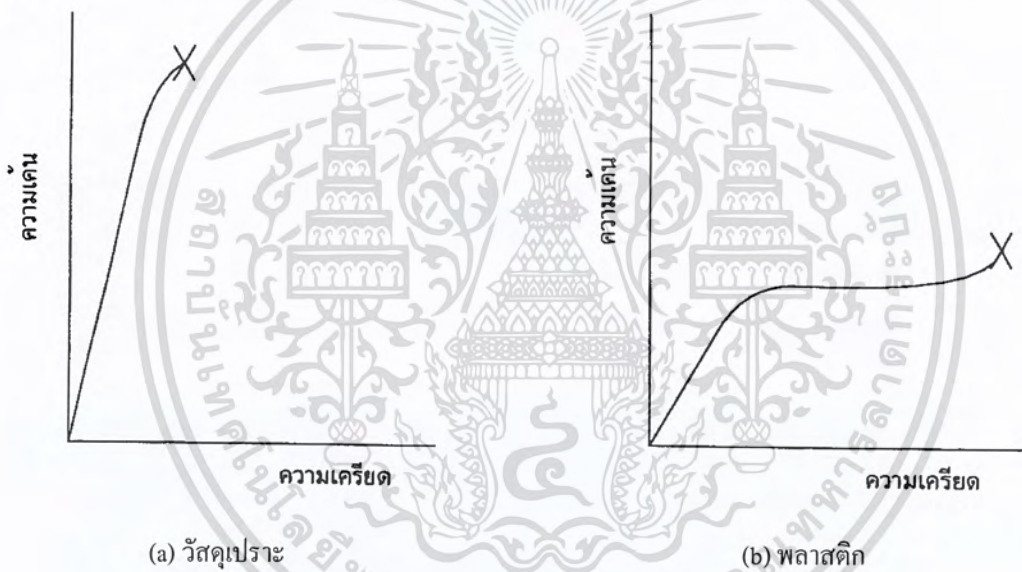


รูปที่ 2.2 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [3]

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว จะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.3 a เช่นเดียวกับวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มี การเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.3 b



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและพลาสติก [3]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่างๆ ได้อีก คือ

1) ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ได้บอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

2) Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบ

#### 2.3.3.1 ขนาดของเครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบต้องมีกำลังเพียงพอต่อการทดสอบ ในการทดสอบควรเลือกใช้ขนาดของเครื่องทดสอบให้เหมาะกับวัสดุประเภทต่างๆ ซึ่งมีความแข็งแรงหรือมีค่ามอดูลัสที่สูงหรือต่ำไม่เท่ากัน เครื่องทดสอบขนาดใหญ่จะมีผลต่อค่าแรงเสียดทานที่ย่อมจะมีได้มากกว่าในบริเวณจุดต่อต่างๆ รวมทั้งแรงเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนขนาดใหญ่ย่อมมีค่ามากกว่าเครื่องเล็ก จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ขนาดของเครื่องทดสอบให้เหมาะสมกับประเภทและขนาดของวัสดุที่จะทำการทดสอบ

#### 2.3.3.2 เทคนิคในการทดสอบ

การตั้งศูนย์ของชิ้นทดสอบในเครื่องทดสอบเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการทดสอบเป็นสิ่งที่จำเป็นแต่ไม่ง่ายในทางปฏิบัติ เนื่องจากการผิดศูนย์เกิดขึ้นได้ง่ายทั้งจากตัวชิ้นงานเองและระบบการยึดจับของเครื่องทดสอบ ในส่วนของชิ้นงานทดสอบนั้น การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะต้องมีความสมมาตรในแนวแกนของการทดสอบ ทั้งแนวยาวและแนวกว้างของชิ้นงาน ชิ้นงานทดสอบต้องปราศจากจุดบกพร่อง

การติดตั้งหรือจัดวางชิ้นงานทดสอบเข้าสู่ปากจับนั้นจะต้องกระทำอย่างระมัดระวังเพื่อให้ชิ้นงานถูกจับยึดอย่างได้ศูนย์และไม่เอียงเพื่อที่แรงจะสามารถถ่ายเทผ่านตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานอย่างเท่าเทียมกัน ไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนขึ้นในชิ้นงานทดสอบ โดยส่วนใหญ่แล้วการเยื้องศูนย์มักเกิดจากผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นการฝึกฝนการจัดวางชิ้นงานเข้าสู่ปากจับให้อยู่ในแนวเส้นตรงและได้ศูนย์จึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

#### 2.3.3.3 การเลือกใช้อุปกรณ์ยึด

การจับยึดชิ้นงานสำหรับงานทดสอบแรงดึงนั้นถือว่ามีสำคัญเป็นอย่างสูงต่อการทดสอบประเภทนี้ โดยหน้าที่หลักของของอุปกรณ์ยึด

- จับชิ้นงานอย่างมั่นคง ป้องกันการลื่นหลุดของชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ
- ไม่ทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณที่ถูกจับยึดนั้นๆ ซึ่งเราสามารถควบคุมได้จากแรงดันของปากจับที่จับชิ้นงานและลักษณะพื้นผิวของปากจับ
- ทำให้เกิดการตั้งศูนย์ของชิ้นงานเพื่อให้ได้รับแรงถึงอย่างสม่ำเสมอ ปราศจากแรงบิดหรือแรงเฉือนซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ของชิ้นงานทดสอบในหัวจับยึด

#### 2.3.3.4 จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ทดสอบ

ลักษณะของจุดเชื่อมต่อที่หลวมจะสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อเริ่มทดสอบ จะพบว่าลักษณะกราฟส่วนหนึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวนอน แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรง ซึ่งระยะความยาวของเส้นในแนวนอนนี้จะมีค่าเท่ากับระยะหรือขนาดของการหลวมของจุดต่อในอุปกรณ์ทดสอบ ในการแก้ไขการหลวมของจุดต่อนี้สามารถทำได้โดยการใส่สปริงไว้ด้านล่างของชุดต่อบริเวณฐาน เพื่อที่จะดันให้สลักชิดแน่นกับรูสวมของชุดปากจับ และมีการใช้แหวนล็อกสำหรับการหมุนเพื่อทำการล็อกจุดต่างๆ ให้แน่นทั้งด้านล่างและด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา <sup>14</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.5 การเก็บข้อมูล

ความสมบูรณ์ในการเก็บข้อมูลการทดสอบถือเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญต่อคุณภาพและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุไม่ว่าจะเป็นความผิดพลาดของผู้ทดสอบหรือจากเครื่องมือทดสอบ อิทธิพลที่มีผลกระทบ ได้แก่ การตั้งค่าอัตราเร็วในการเก็บข้อมูล การตั้งอัตราเร็วในการทดสอบ และความสามารถของเครื่องมือในการเก็บข้อมูล การทดสอบจะต้องเลือกอัตราเร็วในการเก็บข้อมูลให้สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการทดสอบไม่มากหรือน้อยจนเกินไป และต้องตรวจสอบด้วยว่าไม่เกินความสามารถของเครื่องเก็บข้อมูลด้วยอัตราเร็วดังกล่าว

### 2.3.3.6 อัตราเร็วในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงดึงจะต้องควบคุมอัตราความเร็วในการทดสอบ ซึ่งคืออัตราความเร็วของครอสเฮดนั่นเอง วัสดุแต่ละประเภทจะมีอัตราความเร็วที่เหมาะสม สามารถดูได้จากมาตรฐานที่นำมาอ้างอิงในการทดสอบ ทุกครั้งที่รายงานผลการทดสอบควรจะต้องมีการระบุถึงอัตราเร็วที่ใช้ในการทดสอบด้วย

### 2.3.3.7 อุณหภูมิในการทดสอบ

อุณหภูมิในการทดสอบสามารถส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังนั้นจะต้องควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบให้คงที่ ทุกครั้งที่รายงานผลการทดสอบควรจะต้องมีการระบุถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบด้วย และผลการทดสอบที่สามารถเปรียบเทียบกันได้ต้องทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกัน

## 2.4 การทดสอบแรงดึงของพลาสติก

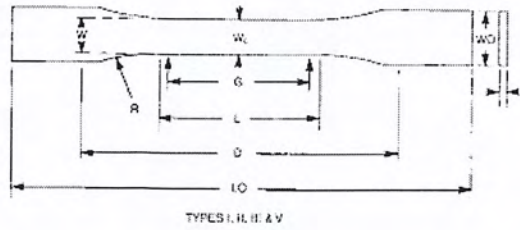
มาตรฐานการทดสอบแรงดึงของพลาสติก : ASTM D638-08 [4] เป็นมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงของพลาสติกใช้ทดสอบร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) โดยมีการเลือกประเภทและขนาดชิ้นทดสอบดังนี้

1) พลาสติกที่มีลักษณะเป็น แผ่น งาน และแม่พิมพ์พลาสติก

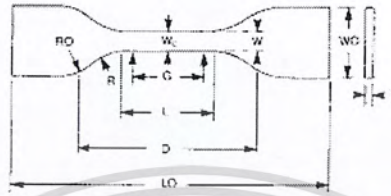
- พลาสติกแข็ง (Rigid) และกึ่งแข็ง (Semi rigid)

ลักษณะ และขนาดของชิ้นทดสอบแสดง ได้ดังรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ โดยเลือกใช้

- Type I เมื่อวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 มิลลิเมตร
- Type II เมื่อไม่สามารถดึงส่วนที่แคบที่สุด (Narrow Section) ขาดได้ตาม Type I
- Type III เมื่อวัสดุมีความหนามากกว่า 7 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 14 มิลลิเมตร
- Type IV เมื่อต้องการเปรียบเทียบการทดสอบกับพลาสติกจำพวก กึ่งแข็ง (Semirigid) และอ่อนตัว (Nonrigid)
- Type V ใช้กับวัสดุที่มีข้อจำกัด และมีความหนา 4 มิลลิเมตร



TYPES I, II, III & V



TYPE IV

รูปที่ 2.4 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08 [4]

ตารางที่ 2.2 ขนาดของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแข็งและกึ่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>a</sup>	Type V <sup>b,c</sup>		
W—Width of narrow section <sup>e,f</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)		±0.5 (±0.02) <sup>g,c</sup>
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)		±0.5 (±0.02) <sup>c</sup>
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...		+6.4 (+0.25)
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)		+3.18 (+0.125)
LO—Length overall, min <sup>h</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)		no max (no max)
G—Gage length <sup>i</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)		±0.25 (±0.010) <sup>c</sup>
G—Gage length <sup>i</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...		±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>i</sup>	25.4 (1.0)		±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)		±1 (±0.04) <sup>c</sup>
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...		±1 (±0.04)

- พลาสติกอ่อน (Nonrigid)

ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.1 โดยเลือกใช้

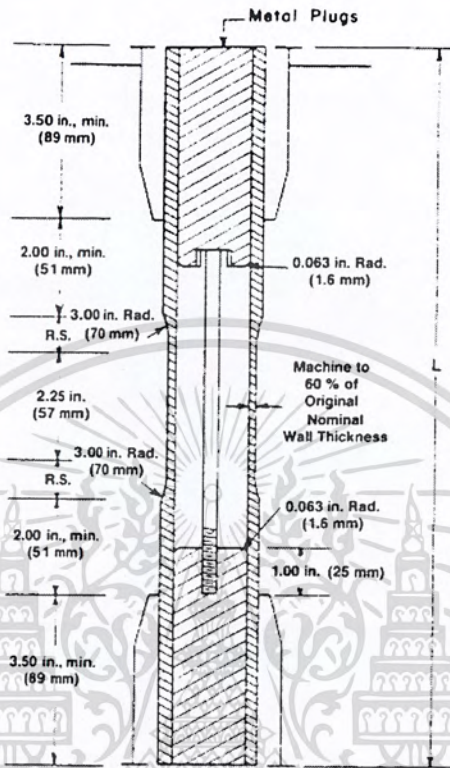
- Type III เมื่อวัสดุมีความหนามากกว่า 7 มิลลิเมตรแต่ไม่เกิน 14 มิลลิเมตร
- Type IV เมื่อวัสดุมีความหนาน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 มิลลิเมตร

- พลาสติกที่มีการเสริมความแข็งแรง (Reinforced Composites) ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 โดยเลือกใช้ Type I

- การเตรียมชิ้นทดสอบเตรียมชิ้นทดสอบโดยการตัดจากพลาสติกที่เป็นแผ่น วัสดุที่มีความหนามากกว่า 4 มิลลิเมตร ต้องผ่านกระบวนการทางกลเพื่อทำให้มีความหนา 14 มิลลิเมตร เพื่อใช้ทดสอบตาม Type I

2) พลาสติกที่มีลักษณะเป็นท่อแข็ง

ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.3



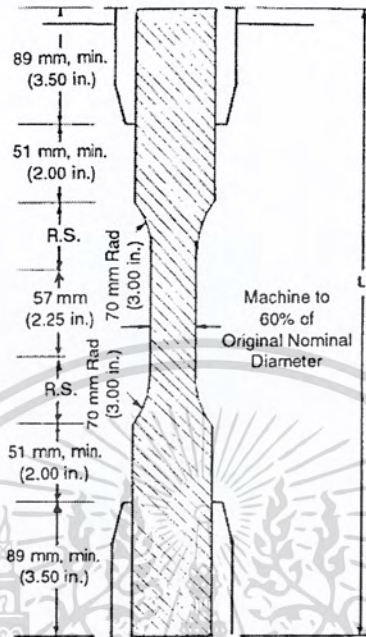
รูปที่ 2.5 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกท่อแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08 [4]

ตารางที่ 2.3 ขนาดของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกท่อแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2 R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L, of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws <sup>a</sup>
			mm (in.)
0.79 (1/32)	13.9 (0.547)	350 (13.80)	381 (15)
1.2 (3/64)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
1.6 (1/8)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
2.4 (3/32)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
3.2 (1/8)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
4.8 (3/16)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
6.4 (1/4)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
7.9 (5/16)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9.5 (3/8)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
11.1 (7/16)	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
12.7 (1/2)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)

3) พลาสติกที่มีลักษณะเป็นแท่งแข็ง (Rigid Rods)

ขนาดของชิ้นทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.6 รูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแท่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08 [4]

ตารางที่ 2.4 ขนาดของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกแท่งแข็งตามมาตรฐาน ASTM D638-08

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, <i>L</i> , of Specimen to Be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws <sup>a</sup>
		mm (in.)	
3.2 (1/8)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
4.7 (1/4)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
6.4 (1/4)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
9.5 (3/8)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
12.7 (1/2)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
15.9 (5/8)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
19.0 (3/4)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
22.2 (7/8)	51.5 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
25.4 (1)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)
31.8 (1¼)	60.9 (2.398)	398 (15.65)	419 (16.5)
38.1 (1½)	66.4 (2.615)	403 (15.87)	419 (16.5)
42.5 (1¾)	71.4 (2.812)	406 (16.06)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.993)	412 (16.24)	432 (17)

4) พื้นที่ผิวของชิ้นทดสอบ

พื้นที่ผิวของชิ้นทดสอบต้องปราศจากข้อบกพร่อง รอยขีดข่วน หรือไม่สมบูรณ์ รอยต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการทางกลจะถูกลบออกด้วยการขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายในทิศทางขนานกับแกนยาวของชิ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การทำเครื่องหมาย

หากมีความจำเป็นที่ต้องทำเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบ ให้ใช้ดินสอเทียนหรือหมึกอินเดียที่ไม่มีผลต่อวัสดุที่จะทำการทดสอบ

6) จำนวนชิ้นทดสอบ

- ทำการทดสอบชิ้นทดสอบพวกไอโซโทปอย่างน้อย 10 ชิ้น
- ทำการทดสอบชิ้นทดสอบพวกแอนไอโซโทปอย่างน้อย 15 ชิ้น
- หากชิ้นทดสอบขาดบริเวณส่วนอื่นที่ไม่ใช่บริเวณส่วนที่แคบที่สุดให้ทำการทดสอบใหม่
- ความเร็วในการทดสอบ

ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานสามารถเลือกได้จากตารางที่ 2.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08

Classification <sup>a</sup>	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain <sup>c</sup> Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in·min)	
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) = 25 %	0.1	
		50 (2) = 10 %	1	
	IV	500 (20) = 10 %	10	
		5 (0.2) = 25 %	0.15	
	V	50 (2) = 10 %	1.5	
		500 (20) = 10 %	15	
	Nonrigid	III	1 (0.05) = 25 %	0.1
			10 (0.5) = 25 %	1
		IV	100 (5) = 25 %	10
			50 (2) = 10 %	1
		500 (20) = 10 %	10	
		50 (2) = 10 %	1.5	
		500 (20) = 10 %	15	

### 2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) [5]

เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นอัลลอยด์ของเหล็ก (iron-base alloys) ที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไป จึงทำให้ไม่เป็นสนิม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายในชีวิตประจำวัน อาทิ วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์ทำครัว อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ เหล็กกล้าไร้สนิมทำมาจากเหล็ก (Fe) ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เนื่องจากเหล็กสามารถถูกกัดกร่อนและเป็นสนิมได้ง่าย จึงนำเหล็กผ่านกระบวนการเติมโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) หรือวานาเดียม (V) ลงไป ทำให้คุณสมบัติของเหล็กดีขึ้น และไม่เป็นสนิมง่าย โลหะที่มักเติมลงไปนี้ในปริมาณมากเพื่อทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี คือ โครเมียม โดยเติมลงไปนี้ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 30 เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มที่บางมากในรูปของโครมิกออกไซด์ (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งเราไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ถ้าแผ่นฟิล์มนี้ถูกขูดขีดหรือทำลาย ก็จะเกิดชั้นบางๆ ของโครมิกออกไซด์ขึ้นมาใหม่อย่างรวดเร็ว ชั้นบางๆ ของฟิล์มนี้จะกันไม่ให้น้ำหรืออากาศ ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก ซึ่งช่วยในการป้องกันเหล็กจากการเกิดสนิมได้ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถถูกกัดกร่อนได้เช่นกัน โดยเฉพาะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะที่ไม่มียุทโทเจนทำให้ไม่สามารถสร้างแผ่นฟิล์มของโครมิกออกไซด์ที่ช่วยป้องกันการเกิดสนิมได้ ทำนองเดียวกันถ้าอยู่ในสภาวะที่มีคลอไรด์ไอออนในปริมาณมาก จะทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นจุด (corrosion pit) และจะขยายวงกว้างขึ้นไปเรื่อยๆ การเชื่อมหรือการผ่านกระบวนการให้ความร้อนซึ่งทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากโครเมียมในเหล็กจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_3C_2$ ) แทนโครมิกออกไซด์ การยับยั้งการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์สามารถทำได้โดยการจุ่มในน้ำเย็นหลังจากให้ความร้อนทันที นอกจากนี้การใช้วิธีเติมโลหะบางชนิด เช่น แลนทานัม (La) ไททาเนียม (Ti) และนีโอเบียม (Nb) ลงไปในเนื้อเหล็ก จะทำให้คาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะเหล่านี้แทนการทำปฏิกิริยากับโครเมียม ซึ่งเป็นวิธียับยั้งการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้เช่นกัน โครงผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมการที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความแรงคราก การยึด ความแข็ง และความเหนียวที่แตกต่างกันเนื่องจากมีลักษณะของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนสำคัญที่ทำให้มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน คือ ลักษณะของแลตทิซ เฟสทรานซิชัน (phase transition) และองค์ประกอบทางเคมีในขบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม จะต้องควบคุมการเติมธาตุต่างๆ และการให้ความร้อน (heat treatment) เป็นอย่างดี เพื่อควบคุมให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมามีโครงสร้างผลึกและเฟสทรานซิชันตามที่ต้องการ เหล็กและอัลลอยของเหล็กมีแลตทิซหลายรูปแบบ ที่รู้จักกันทั่วไปเป็นแบบ บอดี-เซ็นเตอร์-คิวบิก (Body-center-cubic) เรียกคำย่อว่า บีซีซี (bcc) และเฟส-เซ็นเตอร์-คิวบิก (face-center-cubic) เรียกคำย่อว่า เอฟซีซี (fcc) สำหรับเหล็กที่บริสุทธิ์ แลตทิซแบบเอฟซีซีจะอยู่ที่อุณหภูมิ 910-1400 องศาเซลเซียส ส่วนแลตทิซแบบบีซีซีจะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 910 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียส จนถึงจุดหลอมเหลวที่ 1539 องศาเซลเซียส โลหะที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมให้ได้เฟสทรานซิชัน (phase transition) ตามต้องการคือโครเมียม และนิกเกิล โดยที่โครเมียมเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบ เฟอร์ไรต์ และนิกเกิลเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบ ออสติไนท์

เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมาขายในท้องตลาดมีประมาณ 150 เกรด ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 5 ประเภทคือ

1) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสติไนติก (austenitic stainless steel) เป็นประเภทที่นิยมใช้กันมากถึงร้อยละ 70 ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมาขายในท้องตลาด เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.15 และมีโครเมียมไม่น้อยกว่าร้อยละ 16 นอกจากนี้ยังมีการเติมนิกเกิลหรือโมลิบดีนัม (Mo) เพื่อให้สามารถคงรูปผลึกแบบออสติไนติกได้ ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้คือ เหล็กกล้าไร้สนิมซีรีส์ 300 ซึ่งนิยมใช้ในการทำบานพับ ประตู อ่างล้างมือ เข็มฉีดยา ฯลฯ ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304, 316, 317, 321 และ 347 ในบางครั้งจะมีตัวอักษร H อยู่ด้านหลังซึ่งเรียกกันว่าเกรดเอช (H Grade) ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304H แสดงว่าเป็นชนิดมีปริมาณคาร์บอนสูง ถ้ามีตัวอักษร L อยู่ด้านหลังเรียกว่าเกรดแอล (L Grades) ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 304 L แสดงว่าเป็นชนิดมีปริมาณคาร์บอนต่ำ ถ้ามีตัวอักษร M ตัวอย่าง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 317 LM แสดงว่ามีโมลิบดีนัมเป็นองค์ประกอบ และถ้ามีอักษร M และ N อยู่ด้วย เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 317 LMN แสดงว่ามีทั้งโมลิบดีนัม และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบ

2) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทมาร์เทนซิติก (martensitic stainless steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.1-1 โครเมียมร้อยละ 12-14 และโมลิบดีนัมร้อยละ 0.2-1 แต่ไม่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ จะทนการกัดกร่อนได้น้อยกว่าประเภทออสติไนติก แต่มีความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า จึงเหมาะที่จะใช้ในการทำมีดหรืออุปกรณ์สำหรับการตัด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 414, 416, 420, 431 และ 440

3) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก (ferritic stainless steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียมร้อยละ 10.5-27 มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยกว่าประเภทออสติไนติก แต่สูงกว่าประเภทมาร์เทนซิติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมใช้ทำเครื่องประดับ อ่างล้างมือ อุปกรณ์สำหรับรถยนต์ โดยเฉพาะทำท่อไอเสียรถยนต์ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 403, 405, 409, 434, 436, 442 และ 446

4) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทพรีซิพิตีเทตฮาร์ดเดน (precipitate harden stainless steel) เป็นการนำเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก หรือมาร์เทนสติกไปผ่านกระบวนการให้ความร้อน และทำให้เย็น แล้วทิ้งให้ตกตะกอน จะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้มีคุณสมบัติ เหนียว แข็ง ทนการกัดกร่อนสูง จึงนิยมนำไปใช้ทำสปริง ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 17-7PH ซึ่งประกอบด้วย โครเมียมร้อยละ 17 และนิกเกิลร้อยละ 7

5) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทดูเพล็กซ์ (duplex stainless steel) เป็นประเภทที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างเฟอร์ริติก และออสเทนนิติก ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความแข็งแรงตึง (tensile strength) ที่สูงกว่า และต้านทานต่อการกัดกร่อน ได้ดีกว่าประเภทออสเทนนิติก จึงนิยมนำไปใช้ทำอุปกรณ์ที่ทนต่อความดัน รวมทั้งท่อ และถังสำหรับย่อยเยื่อกระดาษ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 2205

## 2.6 การทำความร้อนและควบคุมความร้อน

### 2.6.1 ฮีตเตอร์ (Heater)

#### 2.6.1.1 หลักการของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในงานอุตสาหกรรม โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์ จะมีคุณสมบัติเหนียว และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ สำหรับลวดฮีตเตอร์ของ TIC เป็นลวด Kanthal (นิกเกิล: โครเมียม / 80: 20) ทนอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1,250 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบอื่น ๆ ในการผลิตฮีตเตอร์ มีดังนี้

- ฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำแต่ค่าความร้อนดีมากทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดฮีตเตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสรั่ว (Leak Current) จากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือ ห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตา

- ท่อสแตนเลส 304 และ 316

- Insulation Tester เป็นเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของฮีตเตอร์เพื่อให้แน่ใจว่าในการใช้งานจริง

จะไม่มีกระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์สู่ผิวโลหะ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้โดยมาตรฐานของ TIC ได้กำหนดการทดสอบแรงดันที่ 1,500 โวลต์ กระแสสลับ และค่าความเป็นฉนวนต้องมากกว่า 500 เมกะโอห์ม

#### 2.6.1.2 ชนิดของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนี้

1) ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater)

- คุณลักษณะ

- ให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยการนำความร้อน
- มีขนาด และรูปแบบหลากหลายที่เหมาะสมกับงาน
- เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>21</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณภาพดี ราคาประหยัด

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้ให้ความร้อนกับแม่พิมพ์โลหะ เช่น เหล็ก สแตนเลส ทองเหลือง อลูมิเนียม ฯลฯ

- ลักษณะการใช้งานทั่วไป

ใส่ไว้ในช่องบนวัตถุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน

ตัวอย่างงาน เช่น ให้ความร้อนแม่พิมพ์ของเครื่องบรรจุหีบห่อ

- หลักการทำ Cartridge Heater

- ชนิด High Density ต้องรีดท่อ โลหะที่มีตัวนำและฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ภายในฉนวน ภายในจะถูกอัดแน่น ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูง และมีกำลังวัตต์ต่อพื้นที่ (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) สูงขึ้น
- ชนิด Low Density ร้อยลวดตัวนำในฉนวน Ceramic แล้วใส่ไว้ในท่อโลหะ ช่องว่างระหว่างท่อกับโลหะกับลวดอัดผงแมกนีเซียมออกไซด์

## 2) ฮีตเตอร์ครีบบแบบรูปตัว U (U-Shape Finned Heater)

- คุณลักษณะ

- ให้ความร้อนโดยการนำพาของลม
- เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ
- มีขนาดและรูปแบบให้เลือกตามที่ต้องการ
- คุณภาพดี ราคาประหยัด ติดตั้งง่าย

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้ในงานตู้อบ หรืองานที่ต้องการความร้อนในห้อง เช่น อบสี อบผ้า อบชิ้นงานอุตสาหกรรมรถยนต์ ฯลฯ
- ใช้ติดตั้งในห้องควบคุมความชื้น หรือระบบห้องเย็น
- ใช้ทำเป็น โหลดสำหรับงานทดลอง หรือใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เตารีด หม้อหุงข้าว

## 3) ฮีตเตอร์ครีบบแบบรูปตัว I (I-Shape Finned Heater)

- คุณลักษณะ

- ให้ความร้อนโดยการนำพาของลม
- เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ
- เป็นฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนเร็ว
- มีขนาดและรูปแบบให้เลือกตามต้องการ
- คุณภาพดี ราคาประหยัด ติดตั้งง่าย

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้ในงานตู้อบ หรืองานที่ต้องการความร้อนในห้อง เช่น อบสี อบผ้า อบชิ้นงานอุตสาหกรรมทั่วไป
- ใช้ติดตั้งในห้องควบคุมความชื้นหรือระบบห้องเย็น
- ใช้ทำเป็น โหลดสำหรับงานทดลองหรือใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เตารีด หม้อหุงข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) ฮีตเตอร์จุ่ม (Immersion Heater)

##### - คุณลักษณะ

- เป็นฮีตเตอร์ต้มน้ำ น้ำมัน และงานที่เป็นของเหลวทั่วไป
- สามารถเลือกขนาดความยาวได้หลากหลายตามความเหมาะสมของงาน
- เป็นฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนเร็ว
- สามารถระบุ โวลต์ วัตต์ ตามความต้องการ หรือตามความเหมาะสมกับหน้างานของท่านได้ทุกรูปแบบ

##### - ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวได้เกือบทุกประเภท เช่น น้ำ น้ำมัน กาว ยางมะตอย เป็นต้น
- ใช้อุ่นสารเคมี (วัสดุต้องเป็น SUS 316 หรือเคลือบเทพล่อน)

#### 5) ฮีตเตอร์บอบบี้ (Bobbin Heater)

##### - คุณลักษณะ

- เป็นฮีตเตอร์ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวเกือบทุกประเภท
- มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลากหลายเลือกตามความเหมาะสมกับงานได้ทุกประเภท
- ท่อของฮีตเตอร์มี 2 ชนิด SUS 304, SUS 316
- เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ หรือโรงงานทั่วไป ที่มีการอุ่น หรือให้ความร้อนกับของเหลว หรือสารเคมี

##### - ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- แบบสแตนเลส (SUS 304) ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวทั่วไป
- แบบสแตนเลส (SUS 316) ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวที่มีสารเคมีหรือน้ำมัน ยางมะตอย เป็นต้น
- ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวที่ต้องการความสะอาดในกระบวนการผลิตอาหาร

#### 6) ฮีตเตอร์ควอทซ์ (Immersion Heater / Quartz)

##### - คุณลักษณะ

- ใช้อุ่น หรือต้มสารเคมี และของเหลวเกือบทุกชนิด
- เป็นฮีตเตอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีทุกประเภท
- ท่อฮีตเตอร์มีขนาดเดียว ควรเลือกให้เหมาะสมกับงาน

##### - ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้สำหรับอุ่น หรือต้มของเหลวที่เป็นสารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมทุกชนิด เช่น โซดาไฟ ฯลฯ
- Heater แบบควอทซ์ติดตั้งได้เฉพาะแนวตั้งเท่านั้น

#### 7) ฮีตเตอร์อินฟราเรด แบบหลอด (Infrared Heater)

##### - คุณลักษณะ

- เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี
- สูญเสียความร้อนน้อย และประหยัดไฟ 30-50 เปอร์เซ็นต์
- ทำความร้อนกับวัตถุโดยร้อนจากภายในก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การติดตั้ง และถอดเปลี่ยนสะดวก ง่ายต่อการใช้งาน
- มีความยาว และวัดคัทหลากหลายให้เลือกใช้งาน

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้ในการอบแห้งงานต่าง ๆ เช่น สี กาว แลกเกอร์ เมล็ดพันธุ์พืช
- ใช้ในงานอุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อให้พลาสติกอ่อนตัวก่อนนำไปใช้งาน
- ใช้ในงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยการอบ เช่น ขนมปังเบเกอรี่ เป็นต้น
- ใช้ในวงการแพทย์ เช่น เตอบฆ่าเชื้อ ห้องอบเด็กทารก

8) ฮีตเตอร์รัศมีท่อ (Band Heater)

- คุณลักษณะ

- เป็นฮีตเตอร์สำหรับใช้รัศมีท่อ หรือถึงทรงกระบอก
- การต่อสายใช้งานมีให้เลือกหลายแบบ เช่น ออกเป็นสาย หรือออกเป็นเทอร์มินอล ฯลฯ
- มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ถึง 500 มิลลิเมตร ให้เลือกใช้งานตามความต้องการ
- เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนภายในท่อ หรือกับถึงทรงกระบอก เป็นต้น

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการความร้อนในกระบวนการผลิต เช่น เครื่องฉีดพลาสติก ท่อส่งน้ำร้อน
- สามารถนำไปใช้งานสำหรับอุ่นของเหลวที่แข็งในท่อส่ง หรือถึงพัก เช่น ท่อส่งกาว ท่อส่งน้ำมัน ถังคัมน์น้ำ ถังอุ่นสารเคมี เป็นต้น

9) ฮีตเตอร์แบบแผ่น (Strip Heater)

- คุณลักษณะ

- ให้ความร้อนคงที่และสม่ำเสมอ
- ปลอกทำจากสแตนเลส โดยมีสายความร้อนรัดอยู่ในแกนแผ่นไมก้า
- ทนความร้อนได้สูง อายุการใช้งานยาวนาน
- มีขนาดวัดคัทให้เลือกหลากหลายตามความเหมาะสมกับงานของท่าน

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- เหมาะกับการให้ความร้อนกับแม่พิมพ์
- ใช้กับหม้อต้มน้ำโดยติดกับก้นของหม้อ
- ใช้กับมิดพลาสติก โดยยึดกับใบมีดตัด
- ใช้กับเครื่องบรรจุหีบห่อ

10) ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่นเซรามิก (Ceramic Infrared Heater)

- คุณลักษณะ

- ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่นเซรามิกคุณภาพสูง
- ทำความร้อนที่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเหมาะสำหรับงานอบแห้งเคลือบสี

- รุ่นพิเศษตัวฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม เมื่อฮีตเตอร์ทำความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และเมื่ออุณหภูมิทำงานปกติ สีของฮีตเตอร์จะกลับเป็นสีเหลืองเหมือนเดิมสะดวกต่อผู้ใช้งานสามารถรู้ว่าขณะนี้ฮีตเตอร์ทำงานอยู่หรือไม่

#### 11) ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบขั้วเกลียว (Ceramic Infrared Heater with Screw Cap)

##### - คุณลักษณะ

- ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่นเซรามิก คุณภาพสูงมาตรฐานยุโรป
- ทำความร้อนที่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวเหมาะสำหรับงานอบแห้งเคลือบสี
- รุ่นพิเศษตัวฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม เมื่อฮีตเตอร์ทำความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และเมื่ออุณหภูมิทำงานปกติ สีของฮีตเตอร์จะกลับเป็นสีเหลืองเหมือนเดิมสะดวกต่อผู้ใช้งานสามารถรู้ว่าขณะนี้ฮีตเตอร์ทำงานอยู่หรือไม่

#### 12) ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบควอทซ์ (Quartz Infrared Heater)

##### - คุณลักษณะ

- ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่นควอทซ์ คุณภาพสูงมาตรฐานยุโรป
- ทำความร้อนที่รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง 1.5-6 ไมโครเมตร
- ทำอุณหภูมิได้เร็วกว่าฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบทั่วไป
- การสูญเสียความร้อนต่ำ

#### 13) ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดแก้วควอทซ์ (Quartz Infrared Heater)

##### - คุณลักษณะ

- ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดแก้วควอทซ์ คุณภาพสูงมาตรฐานยุโรป
- ทำความร้อนที่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น 1.6 ไมโครเมตร
- ใส้หลอดทำจากทั้งสแตน สามารถทำอุณหภูมิได้ทันทีเมื่อจ่ายไฟ
- การสูญเสียทางความร้อนต่ำ

#### 14) ฮีตเตอร์เส้น (Cable Heater)

ฮีตเตอร์เส้นแบบ Self Regulating ทำงานด้วยหลักการพื้นฐาน โดยการปรับกำลังเอาต์พุตให้เหมาะสม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังเอาต์พุตจะลดลง ฮีตเตอร์เส้นแบบนี้จะไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนสูงได้ ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้งานเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นน้ำแข็ง ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ หรือนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมทำความเย็น ด้วยโครงสร้างของ Self Regulating จึงสามารถใช้กับท่อ และข้อต่อพลาสติก หรือ PVC ต่าง ๆ ได้อย่างปลอดภัย

##### - คุณสมบัติ

- ออกแบบพิเศษสำหรับติดตั้งบนรางน้ำหรือน้ำ
- สามารถควบคุมกำลังงานเอาต์พุตได้ด้วยตัวเอง และอัตราส่วนระหว่างกำลังงานต่อความยาวคงที่ จึงสามารถตัดเลือกความยาวสายได้ตามต้องการ
- ใช้ได้หลากหลาย การติดตั้ง และดูแลรักษาง่ายไม่ยุ่งยาก

##### - คุณสมบัติด้านอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

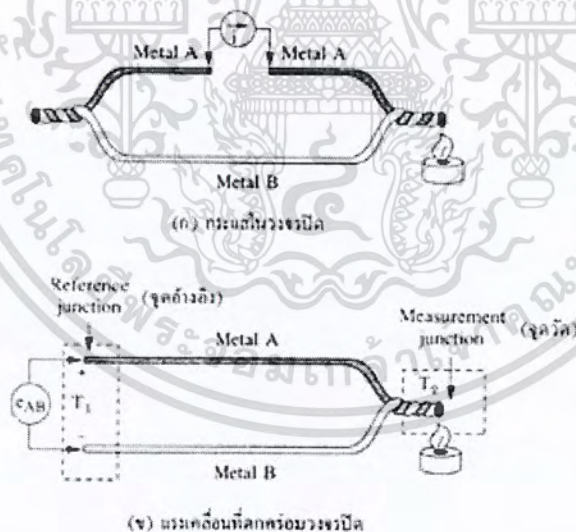
- เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กำลังเอาต์พุตจะลดลง ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิลดลงกำลังเอาต์พุตจะสูงขึ้น ตัวสวิตเตอร์จึงสามารถปรับกำลังเอาต์พุตได้เอง และผู้ใช้สามารถตัดเลือกใช้งานตามความยาวที่ต้องการได้ จึงสามารถใช้งานได้สะดวก และง่ายต่อการใช้งาน

- ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- Bare Type : ป้องกันรักษาอุณหภูมิ ไม่ให้จับตัวเป็นน้ำแข็งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะฉนวน จะไม่แตกหรือเปราะเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงเป็นชนิดธรรมดาไม่มีซิลิโคน
- Shield Type : ป้องกันรักษาอุณหภูมิ ไม่ให้จับตัวเป็นน้ำแข็งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะฉนวนจะไม่แตกหรือเปราะเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมีซิลิโคนภายนอกป้องกันสัญญาณรบกวน

## 2.6.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) [6] เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.7 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลของซีเบ็คดังกล่าว



รูปที่ 2.7 ผลของซีเบ็ค [6]

### 2.6.2.1 ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Termoelectric Effect)

ทฤษฎีพื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้าและทางความร้อนของโลหะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตลอดที่โลหะนั้น ความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของโลหะจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปหาปลายด้านเย็น ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า โลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกันอย่าง

1) ผลของซีเบ็ค (Seebeck Effect) โดยใช้ทฤษฎีโซลิตัสเตด สามารถวิเคราะห์ค่าได้จากสมการอินทิเกรตค่า จากย่านของอุณหภูมิดังกล่าว นั่นคือ

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad (2.1)$$

เมื่อ  $Q_A$  = อุณหภูมิที่โลหะตัวนำ A

$Q_B$  = อุณหภูมิที่โลหะตัวนำ B

สมการนี้จะอธิบายผลของซีเบ็ค ซึ่งพบว่า

- ค่า emf. ที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงเกิดความแตกต่างของ ค่าคงที่ในการส่งผ่านความร้อนของโลหะ

- ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันมาทำเทอร์โมคัปเปิลค่า emf. ที่ได้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์

- ถ้าอุณหภูมิทั้งสองจุดคือจุดวัดและจุดอ้างอิงเหมือนกันค่า emf. ก็จะเป็นศูนย์

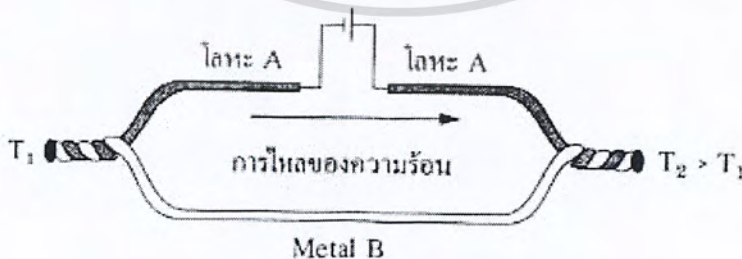
โดยสูตรที่ง่ายและสามารถนำมาคำนวณได้เช่นกันคือ

$$\varepsilon = \alpha(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ค่าคงที่หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (volts/K)

$T_1, T_2$  = อุณหภูมิที่จุดต่อ (K)

2) ผลของเพลเทียร์ (Peltier Effects) หากคิดย้อนกลับจากผลของซีเบ็ค นั่นคือใช้โลหะที่แตกต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 2.8 ก็จะเป็นเหตุให้เกิดกระแสไหลในวงจร เพราะจากคุณสมบัติในการส่งไฟฟ้าและความร้อนของโลหะ พบว่าขั้วหนึ่งจะเกิดความร้อน ( $T_2$ ) และอีกขั้วหนึ่งจะเกิดความเย็น ( $T_1$ ) ขึ้น โดยผลดังกล่าวเรียกว่า “ผลของเพลเทียร์” (Peltier effect) และถูกนำไปใช้งานพิเศษสำหรับการทำความเย็นกับส่วนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก



รูปที่ 2.8 ผลของเพลเทียร์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.2.2 ตารางแสดงแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Table)

ตารางเทอร์โมคัปเปิลจะให้แรงเคลื่อนสำหรับเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด เมื่ออ้างอิงกับจุดอ้างอิงที่กำหนด (0 องศาเซลเซียส) ณ อุณหภูมิที่จุดวัดต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิลชนิด  $j$  เมื่ออ้างอิงที่ 0 องศาเซลเซียส จะมีแรงเคลื่อนเป็น

$$V(210^\circ\text{C}) = 11.3 \text{ mV (ชนิด } j, 0^\circ\text{C ref.)}$$

ในทางกลับกัน ถ้าเราวัดแรงเคลื่อนได้ 4.768 มิลลิโวลต์ กับชนิด  $s$  และอุณหภูมิอ้างอิงที่ 0 องศาเซลเซียส เราพบว่า

$$T(4.768 \text{ mV}) = 555^\circ\text{C (ชนิด } s, 0^\circ\text{C ref.)}$$

แต่บางกรณี แรงเคลื่อนที่วัดได้จะไม่ตรงกับค่าในตาราง จึงจำเป็นต้องมีการแบ่งสเกล (Interpole) ระหว่างค่าในตาราง ซึ่งหาได้จากสมการการแบ่งสเกลดังนี้

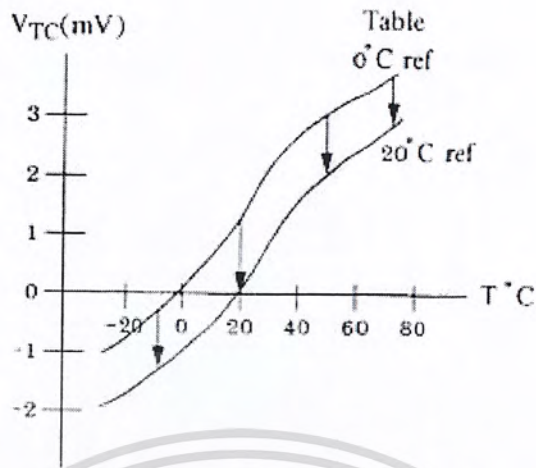
$$T_M = T_L + \left[ \frac{T_H - T_L}{V_H - V_L} \right] (V_M - V_L) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $V_M$  = แรงเคลื่อนที่วัดได้จากมิเตอร์  
 $V_H$  และ  $V_L$  = ค่าแรงเคลื่อนของ  $T_H$  และ  $T_L$  อ่านได้จากตาราง โดย  $V_H$  อยู่สูงกว่า  $V_M$  และ  $V_L$  ต่ำกว่า  $V_M$   
 $T_H$  และ  $T_L$  = ค่าอุณหภูมิที่ตรงกับค่าแรงเคลื่อน  $V_H$  และ  $V_L$  ตามลำดับ

### 2.6.2.3 การเปลี่ยนจุดอ้างอิงของตาราง (Change of Table Reference)

หากอุณหภูมิอ้างอิงแตกต่างจากตารางเทอร์โมคัปเปิลที่กำหนดไว้ สามารถใช้ค่าจากตารางนี้เป็นฐานในการคำนวณได้ ข้อควรจำคือเมื่อวัดอุณหภูมิเดียวกันแต่เปลี่ยนไปใช้จุดอ้างอิงที่สูงกว่าจะทำให้แรงเคลื่อนทางเอาท์พุทถูกกดให้ต่ำลง ดังรูปที่ 2.9

เช่นนำเทอร์โมคัปเปิลชนิด  $j$  ซึ่งมีจุดอ้างอิงที่ 30 องศาเซลเซียส ไปวัดที่ 400 องศาเซลเซียส วิธีการหาแรงเคลื่อนใหม่ที่ได้คือ ขั้นแรกหาแรงเคลื่อน ณ อุณหภูมิที่ต้องการอ้างอิงใหม่จากตาราง ในที่นี้คือ 30 องศาเซลเซียส ณ จุดอ้างอิง 0 องศาเซลเซียส พบว่ามีแรงเคลื่อน 1.54 มิลลิโวลต์ (เรียกค่าที่หาได้นี้ว่าตัวประกอบ) หลังจากนั้นก็นำค่านี้ไปลบออกจากแรงเคลื่อนที่จุดวัดที่ 400 องศาเซลเซียส เมื่อจุดอ้างอิงเป็น 0 องศาเซลเซียส หรือเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนจุดอ้างอิงจาก 0 ถึง 20°C ซึ่งจะสอดคล้องกับการเลื่อนลงของเส้น โคง้แรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิล [6]

$V(30^{\circ}\text{C}) = 1.54 \text{ mV}$  (ชนิด J, 0°C ref.) ชั้นแรก

และ  $V(400^{\circ}\text{C}) = 21.85 \text{ mV}$  (ชนิด J, 0°C ref.) ชั้นที่สอง

นำค่า (ตัวประกอบ) ที่ได้จากชั้นที่สองมาลบออกจากชั้นแรก ทำให้ได้แรงเคลื่อนซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างนี้เป็น

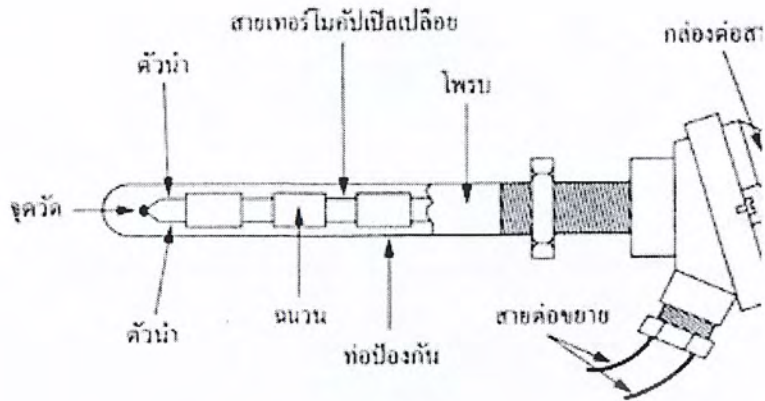
$V(400^{\circ}\text{C}) = 20.31 \text{ mV}$  (ชนิด J, 30°C ref.)

เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนของจุดอ้างอิงจะเขียนในแบบใหม่ เช่น  $V_{j_0}$  จะหมายถึงแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลชนิด J อ้างอิงที่ 0 องศาเซลเซียส และ  $V_{j_{30}}$  หมายถึงของชนิด J อ้างอิงที่ 30 องศาเซลเซียส

#### 2.6.2.4 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

1) ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่าย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิโวลต์ แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานจริงปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง

2) โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะดังรูปที่ 2.10 โดยต้องมีลักษณะดังนี้ คือ มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ด้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสแตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกันทั้งเยอรมันเนียมและซิลิคอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริกจึงใช้กันมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (Peltier element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล [6]

ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่าง และมีขนาดจาก 10 ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาด 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (Microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา

3) ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งาน และความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัว จะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

4) เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสาย และวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

5) การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้โอปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

#### 2.6.2.5 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่

1) เทอร์โมคัปเปิลแบบ S ประดิษฐ์โดยนาย Le Chatelier ในปี 1886

ข้อดีของแบบ S

- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง(oxidizing)
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะงานเฉื่อย (inert) คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆ ได้ง่าย ๆ
- นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ -50 ถึงประมาณ 1700 องศาเซลเซียส
- หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ในการสอบเทียบ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74 องศาเซลเซียส) จนถึงจุดแข็งตัวของทองแดง (1064.43 องศาเซลเซียส) ตามมาตรฐาน IPTS 68

ข้อเสียของแบบ S

- ต้องใช้ท่อป้องกันในทุกสภาวะบรรยากาศ
- ไม่เหมาะกับงานที่มีปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง (Reducing)
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็นสุญญากาศ (Vacuum)
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอโลหะ เช่น สังกะสี ตะกั่ว
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะ เช่น กำพวด อาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส เพราะจะมีอายุการใช้งานสั้นลง

2) เทอร์โมคัปเปิลแบบ R เป็นแบบที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิสูง ๆ

ข้อดีของแบบ R

- ให้แรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุตสูงกว่าแบบ S
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600 องศาเซลเซียส
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง -50 ถึงประมาณ 1700 องศาเซลเซียส
- เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
- ทนทานต่อการกัดกร่อน และให้เสถียรภาพของอุณหภูมิที่ดี

ส่วนลักษณะข้อเสียเช่นเดียวกับแบบ S แต่ส่วนที่เพิ่มเติมคือ ให้ความเป็นเชิงเส้นต่ำเพิ่ม อุณหภูมิต่ำกว่า 540 องศาเซลเซียส

3) เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ผิดครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมัน

ข้อดีของแบบ B

- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600 องศาเซลเซียส
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1750 องศาเซลเซียส
- แข็งแรงกว่าแบบ S และแบบ R
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสภาวะเฉื่อย ให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (linearity) ดี

ข้อเสียของแบบ B

- ให้แรงเคลื่อนของไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่น ๆ เมื่อวัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขเดียวกัน
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่เป็นสุญญากาศ
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่มีไอของโลหะและไอโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และ S
- ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองค่า (double value region) จากอุณหภูมิในช่วง 0-42 องศาเซลเซียส ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นมี อุณหภูมิเป็นเท่าใด เช่นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 42 องศาเซลเซียส
- ให้ความชัน(การเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิ) ของสัญญาณต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา<sup>31</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เทอร์โมคัปเปิลแบบ J พบว่าหากใช้แพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิลความคุ้มทุนก็ลดลงไป ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลราคาถูกลง จึงใช้วัสดุราคาถูกอื่นที่มีราคาถูกกว่ามาทดแทนแพลทินัม โดยรหัสไปตามมาตรฐาน BS มีดังนี้ ถ้าขั้วบวก จะเป็นสีดำ ขั้วลบจะเป็นสีขาว ทั้งตัวจะเป็นสีดำ

ความแน่นอนตามมาตรฐาน BS 1797 Part 30, 1993 ได้แก่

- Class 1 = -40 องศาเซลเซียส ถึง +750 องศาเซลเซียส  $\pm 0.004 \times t$  หรือ  $\pm 1.5$  องศาเซลเซียส

- Class 2 = -40 องศาเซลเซียส ถึง +750 องศาเซลเซียส  $\pm 0.0075 \times t$  หรือ  $\pm 2.5$  องศาเซลเซียส

เมื่อ  $t$  คือ อุณหภูมิจริง

ข้อดีของแบบ J

- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี
- มีราคาถูกกว่าแบบที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์
- ตามมาตรฐาน BS 7937 Part 30 สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ -210 ถึง 1200 องศาเซลเซียส
- เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760 องศาเซลเซียส
- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก
- เป็นแบบที่นิยมใช้ ราคาไม่แพง

ข้อเสียของแบบ J

- วัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบบ T
- ไม่เหมาะสมมากนักกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส หากวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง
- หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

5) เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียมส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะว่าในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่าง ๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวังส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ

ด้วยเหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

- ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรีของมัน (Curie point คืออุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก) อยู่ในเวลาที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่ไม่ทราบค่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่อุณหภูมิสูง ๆ (ช่วง 200 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮิสเตอร์รีซิสเกิดขึ้นขณะที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดการณ์เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

- ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

- การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์หรือในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูง ๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านแอคทีฟ

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น -270 องศาเซลเซียส ถึง +1,370 องศาเซลเซียส โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (ตารางอ้างอิงสำหรับเทอร์โมคัปเปิลนานาชาติ) เป็นดังนี้

1. Class 1 =  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+1,000^{\circ}\text{C} \pm 0.004 \times t$  หรือ  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
2. Class 2 =  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+1,200^{\circ}\text{C} \pm 0.0075 \times t$  หรือ  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$
3. Class 1 =  $-200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+40^{\circ}\text{C} \pm 0.015 \times t$  หรือ  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$

เมื่อ  $t$  คือ อุณหภูมิจริงที่ทำกรวัด

รหัสสีสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนด โดยมาตรฐาน BS 4937 part 30, 1993 (รหัสสีตามมาตรฐานอังกฤษสำหรับสายชดเชยแบบคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) สำหรับชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว ถ้าตลอดทั้งตัวจะเป็นสีเขียว ส่วนสายชดเชยสัญญาณ (ชนิด vx) ก็เหมือนกับสีด้านบนที่กล่าวมา โดยสรุป

ข้อดีของแบบ K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก  $-180$  องศาเซลเซียส ถึงประมาณ  $1,350$  องศาเซลเซียส
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย (inert) ได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบ K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับการงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับการสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้น ๆ)
- หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

6) เทอร์โมคัปเปิลแบบ T

ข้อดีของแบบ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 33 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดีกว่าแบบ K ตรงที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า นั่นคือเหมาะกับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่น ในห้องเย็น ตู้แช่แข็ง
- ให้ความแม่นยำในการวัดดีกว่าแบบ K (ช่วงที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ความแม่นยำจะเป็น  $\pm 1\%$ )
- มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิดี
- การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงรีดิวซิงและงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี
- วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง  $-185$  ถึง  $300$  องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง  $-250$  ถึง  $400$  องศาเซลเซียส
- ทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้ดี

#### ข้อเสียของแบบ T

- เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่นๆ
- หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า  $370$  องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดออกไซด์มาก
- ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อน โดยตรง(ทำให้ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำเปลี่ยนไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย)
- เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ในช่วง  $20$  ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสี จะเพิ่มประมาณ  $10$  เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน
- คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (แต่ก็ปรับปรุงได้จากวงจรปรับสภาพสัญญาณ)

#### 7) เทอร์โมคัปเปิลชนิด E

##### ข้อดีของแบบ E

- ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับแบบอื่น ๆ ในสถานะเดียวกัน
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง  $0$  ถึง  $800$  องศาเซลเซียส
- คุณสมบัติอื่น ๆ คล้ายกับแบบ K

การแก้ไขให้ระบบวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลให้ทำงานได้ดีขึ้น ต้องปฏิบัติดังนี้

1) ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่ที่สุดที่จะเป็นไปได้ เพราะมันจะไม่พ่วงเอาความร้อนออกจากพื้นที่การวัด

เข้ามา

2) ถ้าต้องการใช้สายขนาดเล็ก ๆ ให้ใช้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการวัด และใช้สายขยาย (Extention wire) ในขอบเขตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสาย

3) หลีกเลี่ยงความเค้นทางกลและการสั่นสะเทือนที่มีผลให้เกิดความเครียดในสาย

4) เมื่อใช้สายเทอร์โมคัปเปิลยาว ๆ ให้ต่อชิลด์ที่สายไปยังขั้วต่อสายของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ และใช้สายขยาย

สัญญาณแบบบิตเกลียว

5) หลีกเลี่ยงบริเวณที่เต็มไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลางสาย

6) พยายามเลือกสายเทอร์โมคัปเปิลในพิกัดอุณหภูมิของมัน

7) ป้องกันวงจรแปลง integrate A/D จากการรบกวน

8) ใช้สายขยายเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสายน้อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>34</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) ทดสอบและเก็บค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก่า ๆ ไว้ พร้อมกับวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก็บไว้เป็นช่วง ๆ

## 2.7 พื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับกระจก [7]

กระจก เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง ททรายแก้ว หินปูน หินฟีนมา หินโคลโลไมด์ และเศษกระจก ประมาณ 98.8 เปอร์เซ็นต์ และ โซดาแอช 1.2 เปอร์เซ็นต์ และนำมาเข้าเตาหลอม ด้วยความร้อนประมาณ 1,500 - 1,600 องศาเซลเซียส จนส่วนผสมหลอมละลายเป็น น้ำแก้ว และไปผ่านกรรมวิธีเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูป จนเป็นกระจกแผ่นที่สามารถใช้งานได้ หรือจะนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มเติมเพื่อให้ได้กระจกชนิดพิเศษที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานต่อไป สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ตามลักษณะการผลิตได้ 6 กลุ่ม ได้แก่

1) กระจกแผ่น (Sheet Glass) คือ กลุ่มกระจกพื้นฐานที่มีการผลิตที่ไม่ซับซ้อน โดยหลอมกระจกผ่านรางรีด ส่งผลให้ผิวกระจกไม่เรียบมีลักษณะเป็นคลื่นและให้ภาพสะท้อนมีลักษณะบิดเบี้ยว ความแข็งแรงต่ำผิวกระจกเป็นรอยขีดขูดได้ง่าย มีราคาถูก แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ กระจกใสกระจกสี และกระจกฝ้าการนำไปใช้งานเนื่องจากกระจกแผ่นมีพื้นผิวที่ไม่เรียบส่งผลให้ภาพที่สะท้อนบิดเบี้ยว ไม่สวยงาม การนำไปใช้งานจึงมักนำไปใช้ในงานที่ไม่เน้นความสวยงามมากนัก เช่น งานหน้าต่างบ้านอยู่อาศัย เครื่องเรือน กรอบรูป ผนังกระจก

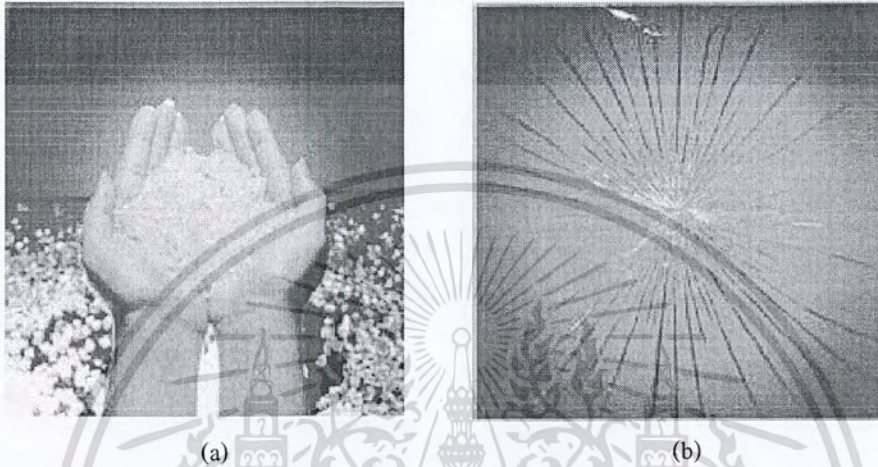
2) กระจกโฟลต (Float Glass) คือ กลุ่มของกระจกพื้นฐานก่อนมีการดัดแปลงเป็นกระจกประเภทอื่น ๆ การผลิตเกิดจากการหล่อโดยให้น้ำกระจกไหลลงบนผิวดีบุก จึงทำให้การผลิตและการควบคุมคุณภาพค่อนข้างยาก แต่กระจกที่ได้มีความโปร่งแสงสูง พองอากาศน้อยกว่าประเภทแรก ทนทานต่อรอยขีดขูด และพื้นผิวเรียบสนิททำให้ได้ภาพสะท้อนที่สมบูรณ์ ซึ่งในประเทศไทยมีผู้ผลิตกระจกประเภทนี้ไม่มาก โดยกระจกในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยกระจก 2 ชนิดซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3) กระจกอบความร้อน (Heat Treated Glass) คือ กลุ่มของกระจกที่มีวิธีการผลิตโดยนำเอากระจก Clear Float Glass มาผ่านกรรมวิธีการอบและทำให้เย็นอีกครั้ง เพื่อให้เกิดคุณสมบัติในการรับแรงและความแข็งแรงของผิวกระจกมากขึ้นกว่ากระจกธรรมดาที่มีความหนาที่เท่ากัน โดยกระจกในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยกระจก 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

- กระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) คือกระจกที่มีการผลิตโดยนำกระจก Clear Float Glass มาอบความร้อนอีกครั้ง เมื่อกระจกอ่อนตัว แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วโดยการเป่าลมเย็นทั้ง 2 ด้าน ซึ่งทำให้กระจกประเภทนี้สามารถรับแรงได้มากกว่ากระจก Clear Float Glass ที่ความหนาเท่ากันได้ 5-10 เท่า และสามารถรับแรงดึงและดัดงอได้มากกว่ากระจก Clear Float Glass ประมาณ 3 เท่า แต่ทนแรงกระทำแบบ Point Load ได้น้อย จึงไม่สามารถทำการตัดหรือเจาะได้ เมื่อแตกจะเป็นเม็ดเล็กไม่คม (ลักษณะคล้ายเม็ดข้าวโพด) ร่วงหล่นออกมาจากรอบทั้งหมด การนำไปใช้งานเนื่องจากกระจกประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถรับแรงที่กระทำเป็นพื้นที่ได้สูง การใช้งานจึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงมาก เช่น Skylight ประตูกระจกหรือผนังที่ไม่ต้องการกรอบกระจก ผนังกันอาบน้ำ (Shower Box) ผนังภายนอกอาคารที่มีความสูงมาก ๆ เนื่องจากสามารถรับแรงอัดของลมได้ดี แต่เนื่องจากกระจกชนิดนี้เมื่อแตกจะแตกลักษณะเป็นเม็ดข้าวโพดดังรูปที่ 2.11 และร่วงหล่นทั้งบานจึงนิยมติดฟิล์มนิรภัย หรือนำไปเป็นส่วนประกอบของการทำกระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass) เพื่อให้แผ่นฟิล์มยึดกระจกที่แตกไว้

- กระจกกึ่งนิรภัย (Heat Strengthened Glass) นำกระจก Clear Float Glass มาอบความร้อนอีกครั้ง เมื่อกระจกเริ่มอ่อนตัว ก็จะลดอุณหภูมิเพื่อทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จากกรรมวิธีการผลิตลักษณะนี้ส่งผลให้กระจกประเภทนี้สามารถรับแรงได้มากกว่ากระจก Clear Float Glass ถึง 2-3 เท่า ในกระจกที่มีความหนาที่เท่ากัน ผิวของกระจกจะแข็งขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>35</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ เมื่อแตกจะมีลักษณะเป็นปากกลามยึดติดอยู่กับกรอบ ไม่ร่วงหล่นเหมือนกระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) การนำไปใช้งาน เนื่องจากกระจกประเภทนี้มีความแข็งแรงที่มากกว่ากระจกธรรมดา ถึงแม้ว่าจะแข็งแรงน้อยกว่ากระจกนิรภัยเทมเปอร์ แต่จุดเด่นของกระจกประเภทนี้คือสามารถทนความร้อนได้มากกว่า และเมื่อกระจกแตกจะไม่ร่วงหล่นเหมือนกระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Tempered Safety Glass) จึงนิยมใช้ในการทำผนังภายนอก โดยเฉพาะในผนังกระจกระบบแขวน (Glass Curtain Wall)



(a) ลักษณะการแตกของกระจกนิรภัยเทมเปอร์ (Temper Safety Glass)  
 (b) ลักษณะการแตกของกระจกนิรภัย (Heat Strengthened Glass)

รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการแตกของกระจกนิรภัยเทมเปอร์กับกระจกนิรภัย [7]

4) กระจกเคลือบผิว หรือกระจกสะท้อนแสง (Surface coated glass) คือ การนำกระจก Clear Float Glass ไปปรับปรุงผิว โดยเคลือบออกไซด์ของโลหะ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้กระจกประเภทนี้จึงมีความเงามันวาว ซึ่งสามารถแบ่งการเคลือบผิวออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- Hard coat คือการเคลือบโลหะที่ผิวกระจก Clear Float Glass ให้เป็นเนื้อเดียวกับกระจก โดยการอบกระจกด้วยความร้อนเมื่อกระจกเริ่มอ่อนตัวจะ ไรผงออกไซด์ของโลหะลงบนผิวของกระจกที่อ่อนตัว เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกับผิวของกระจก ซึ่งข้อเสียของกระจกที่เกิดจากการผลิต คือ สีและการสะท้อนแสงของกระจกที่ถูกเคลือบจะไม่สม่ำเสมอ ทั่วตลอดทั้งแผ่น

- Soft coat คือการนำกระจก Clear Float Glass ไปเคลือบสารโลหะเพื่อแต่งผิว โดยการพ่นผงออกไซด์ของโลหะเคลือบทับลงบนพื้นผิวของกระจกเท่านั้น ซึ่งข้อเสียของกระจกที่เกิดจากกระบวนการผลิตคือ สารที่เคลือบกระจกจะไม่ทนทานต่อการขูดขีด มักนิยมนำไปประกอบเป็น Laminated Glass หรือ Insulated Glass การเคลือบผิวทำให้สามารถสะท้อนแสงและคลื่นความร้อนบางส่วนของแสงแดดได้ดี ในขณะที่กระจกยังคงความใสอยู่ ด้วยเหตุนี้จึงมักใช้กระจกประเภทนี้ในงานที่เน้นการประหยัดพลังงานเป็นหลัก ในการติดตั้งจะต้องมีการพิจารณาการติดตั้งด้านให้ถูกต้อง โดยการหันด้านที่มีการเคลือบเข้าภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 36 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการเคลือบผิวด้วยออกไซด์ของโลหะ ส่งผลให้กระจกด้านที่เคลือบมีการเก็บความร้อนสูง ดังนั้นในการออกแบบจึงควรพิจารณาถึงการสะสมความร้อน การระบายความร้อน และหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เพราะอาจทำให้กระจกเกิดการแตกร้าวได้

5) กระจกตัดแปลง (Processed Glass) คือ กลุ่มของกระจกที่นำเอากระจกชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นมาประกอบกัน โดยนำเอากระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปนำมาประกอบกันเพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่ผู้ใช้งานต้องการ ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของกระจกแต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกัน ในทางกลับกันอาจเป็นการลดข้อเสียของกระจกบางประเภทได้อีกด้วย โดยกระจกในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยกระจก 2 ชนิด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กระจกฉนวน (Insulation Glass) คือ กระจกที่ประกอบด้วยกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไปมาประกอบกัน โดยมีอลูมิเนียมสเปซเซอร์ (Aluminum Spacer) ซึ่งบรรจุสารดูดความชื้น (Desiccant) แล้วใส่ฉนวน เช่น อากาศแห้ง (Dried Air) หรือ ก๊าซเฉื่อย ไว้ภายในเพื่อให้มีคุณสมบัติในการเก็บรักษาอุณหภูมิภายในได้ดีมาก(สามารถสะท้อนความร้อนได้ประมาณ 95-98 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งแผ่นกระจกที่จะนำมาซ้อนกันได้สามารถเลือกชนิดของกระจกเพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่ต้องการ ดังนั้นในการติดตั้งจึงควรพิจารณาการติดตั้งให้ถูกด้านตามชนิดของกระจกที่ได้ออกแบบไว้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกันความร้อนสูงสุด และจากคุณสมบัติที่กล่าวข้างต้นแล้วว่ากระจกชนิดนี้มีจุดเด่นที่การบรรจุอากาศแห้ง หรือก๊าซเฉื่อยไว้ภายใน ดังนั้นกระจกประเภทนี้จึงไม่สามารถปรับแต่งรูปทรงกระจกในภายหลังได้

- กระจกนิรภัยหลายชั้น (Laminated Safety Glass) คือ กระจกที่ประกอบด้วยกระจกตั้งแต่ 2 แผ่นขึ้นไป มาประกบหรือติดด้วย PVB (Poly Vinyl Butyral) ซึ่งมักจะนำเอากระจกชนิดต่าง ๆ จากที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น นำมาประกอบกันเพื่อให้ได้กระจกที่มีคุณสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยสาเหตุที่เรียกกระจกชนิดนี้ว่ากระจกนิรภัยด้วยอันเนื่องมาจากเมื่อกระจกประเภทนี้เมื่อแตกกระจกจะติดกับ PVB ไม่ร่วงหล่นจากกรอบการนำไปใช้งาน-เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตที่กล่าวแล้วข้างต้น กระจกนิรภัยหลายชั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยเป็นพิเศษ เช่น ผงงภายนอกอาคารที่เป็นอาคารสูง ราวบันได คู่ปลานขนาดใหญ่ เป็นต้น เนื่องจากเมื่อกระจกแตกจะไม่ร่วงหล่นอันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้อาคาร ที่อยู่ด้านล่าง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานในการออกแบบเชิงประหยัดพลังงานได้ดีอีกด้วย เนื่องจากออกแบบสามารถเลือกชนิดของกระจกที่จะนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติในการลดความร้อนจากภายนอกอาคารที่จะเข้าสู่ภายในอาคารได้ตามต้องการนอกจากนี้ฟิล์ม โพลีไวนิลบิวทีรอลชนิดยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนช่วยลดความร้อน ได้อีกทางหนึ่งด้วย

6) กระจกเพื่อการใช้งานเฉพาะทาง (Application glass) คือ กระจกที่ตัดแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่าง หรือเพื่อก่อให้เกิดความสวยงาม โดยการผลิตกระจกประเภทนี้จะเป็นการรวมเอากระจกและวิธีการต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้แล้วมาผสม หรือตัดแปลงเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการ เช่น กระจกทนไฟ กระจกเสริมลวด (Wired Glass) หรือกระจกลาย (Pattern Glass) เป็นต้น

กระจกทนไฟ (Fire Resistance Glass) เป็นกระจกนิรภัยชนิดหนึ่ง ผลิตขึ้นจากกระจกนิรภัยชนิดพิเศษ และนำไปประกบกับกระจกนิรภัยหลาย ๆ ชั้น โดยมี Sodium Silicate มาทำลามีเนตกัน จนมีคุณสมบัติสามารถทนไฟได้นานสุด 2 ชั่วโมงโดยไม่เสียรูป ป้องกัน ไฟ ควัน และลดความร้อนที่จะเข้ามาสู่ภายในการนำไปใช้งานในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย รวมถึงพื้นที่ปลอดภัยภายในอาคาร เช่น โถงลิฟต์ดับเพลิง บันไดหนีไฟ เป็นต้น

## 2.8 ฉนวนกันความร้อน [8]

ฉนวน คือ วัสดุที่ต้านทานหรือป้องกันมิให้พลังงานความร้อนส่งผ่านจากด้านหนึ่ง ไปยังอีกด้านหนึ่ง ได้สะดวก ฉนวนกันความร้อนที่ดีจะเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งประกอบไปด้วยฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมาก ฟองอากาศดังกล่าว มีคุณสมบัติในการต้านทานกันความร้อน โดยสกัดกั้นความร้อนให้อยู่ในบริเวณฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมากนี้ จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการพาความร้อนด้วย ยังมีวัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีคุณสมบัติต้านทานการแผ่รังสีความร้อน หรือสะท้อนรังสีร้อนกลับ ที่ใช้กันส่วนมากได้แก่ แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ โดยคุณสมบัติแล้ว ไม่ถือว่าเป็นฉนวน แต่ถือว่าเป็นวัสดุลดความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนฉนวนที่ผลิตออกจำหน่ายมีทั้งชนิดที่ไม่บุ่อลูมิเนียมฟอยล์ และบุ่อลูมิเนียมฟอยล์

ฉนวนแต่ละชนิดจะมีการต้านทานความร้อนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องต้านทานความร้อนที่ผ่านจากด้านหนึ่ง ไปอีกด้านหนึ่งให้ลดลงเหลือน้อยที่สุด ทั้งนี้ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนยิ่งน้อย แสดงว่าเป็นฉนวนที่สามารถต้านทานความร้อนน้อยกว่า โฟมแผ่น ฉนวนใยแก้ว ไม้อัด แผ่นยิปซัม และกระเบื้องแผ่นเรียบ หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่า โฟมฉนวนมีการต้านทานความร้อนได้ดีกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ค่า $k =$ วัตต์ต่อตารางเมตร
โฟมฉนวน	0.023
โฟมแผ่น	0.031
ฉนวน ใยแก้ว	0.035
ไม้อัด	0.123
แผ่นยิปซัม	0.191
กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.288

### 2.8.1 องค์ประกอบที่ต้องพิจารณาในการเลือกฉนวน

- 1) ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่ฉนวนใช้ได้โดยไม่เสียหายหรือเสื่อมคุณภาพ
- 2) ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ค่าที่ต่ำกว่าจะลดการสูญเสียพลังงานได้ดีกว่า
- 3) กำลังการอัดบีบ (Compressive Strength) ควรเลือกที่ฉนวนไม่เสียรูปทรงมาก โดยเทียบจากปริมาณการเสียรูปทรงของฉนวนต่าง ๆ ที่ค่าเดียวกันว่ารับกำลังการอัดบีบได้เท่าไร
- 4) การทนต่อการติดไฟ
- 5) โครงสร้างเซลล์ซึ่งจะเป็นสิ่งกำหนดว่าฉนวนจะดูดซับความชื้นอย่างง่ายเพียงไร
- 6) รูปแบบของฉนวน กล่าวคือ ความหมายและรูปทรง ซึ่งจะเป็สิ่งกำหนดว่าฉนวนมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เพียงไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 38 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.2 คุณสมบัติของฉนวนความร้อนที่ดี

ฉนวนความร้อนจะต้องเลือกใช้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ใช้งาน และตามชนิดของฉนวนซึ่งคุณสมบัติที่ที่นั้พิจารณาได้ดังนี้

- 1) ควรมีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อย
- 2) มีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำกล่าวคือยอมให้ความร้อนผ่านตัวฉนวนได้น้อยมาก
- 3) ในบางชนิดจะต้องมีความคงทนต่อแรงดึงและแรงอัดได้ดี
- 4) มีอัตราการดูดซับความชื้นที่ต่ำมากหรือไม่มีเลยจะดีมาก
- 5) สามารถด้านการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะทางเคมี
- 6) มีความคงตัวสูง เปลี่ยนรูปได้ยาก
- 7) ต้องทนต่อการติดไฟได้ดี
- 8) ใช้กับระดับอุณหภูมิที่กว้าง
- 9) ติดตั้งเพื่อใช้งานได้สะดวกมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย

## 2.8.3 ชนิดของฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้

1) โยแก้ว (Glass Fiber) ทำมาจากแก้วหรือเศษแก้วมาหลอมและปั่นจนเป็นเส้นใยละเอียด แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นฉนวนความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ฉนวนแบบคลุมท่อ ฉนวนแบบแผ่น และฉนวนแบบหุ้มท่อ ฉนวนประเภทนี้เป็นฉนวนเส้นใยแบบเซลล์เปิด มีโครงสร้างภายในเป็นเส้นใยและช่องว่างอากาศ จัดเป็นวัสดุประเภทไม่ลามไฟ มีทั้งชนิดที่มีวัสดุปิดผิว และไม่มีวัสดุปิดผิวขึ้นอยู่กับการใช้งาน วัสดุปิดผิวส่วนใหญ่จะเป็นแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ เพื่อใช้ป้องกันไอน้ำและความชื้น (Vapor Barrier) โดยทั่วไปจะกันไฟไม่ได้มีอุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 700 องศาเซลเซียส ไม่ทนต่อความเปียกชื้น และการควมแน่นเป็นหยดน้ำโดยจะสูญเสียคุณสมบัติในการกันความร้อนไปเมื่อเปียกชื้น

2) โยแร่ (Mineral fiber) อาจเรียกว่า หินแร่ หรือฟอยล์โลหะ หรือโยหิน มีกรรมวิธีการผลิตคล้ายกับฉนวนโยแก้ว โดยการนำวัสดุประเภทแร่ เช่น ซิลิกาจากการผลิตเหล็กกล้า ทองแดง หรือตะกั่วมาใช้เป็นวัสดุหลักแทนฉนวนโยแร่จะมีรูปแบบและข้อจำกัดในการใช้งานทั่วไปเหมือนฉนวนโยแก้ว เช่น ปัญหาการติดไฟของตัวประสาน และการลุกไหม้ของผิวหน้า ฉนวนประเภทนี้เป็นประเภทที่ไม่มีสารประกอบของแร่ใยหิน (Asbestos) ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ มีคุณสมบัติในการกันความร้อนได้เทียบเท่ากับฉนวนโยแก้ว แต่สามารถทนไฟได้ดีกว่า จึงนำมาใช้เป็นฉนวนที่กันไฟได้ด้วย สามารถทนความร้อนสูงถึง 800 องศาเซลเซียส คุณสมบัติอีกประการหนึ่งคือมีความสามารถดูดซับเสียง แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่ทนทานต่อความเปียกชื้น ดังนั้นจึงควรห่อหุ้มด้วยวัสดุป้องกันความชื้น

3) โยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นฉนวนความร้อนที่ผลิตขึ้นจากการนำไม้ หรือกระดาษที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยแปะและดัดให้กระจายออกทำการย่อยจนละเอียด จากนั้นทำการประสานเข้าด้วยกันด้วยบอแรกซ์ ส่วนผสมทั้งสองจะช่วยให้มีสภาพต้านทานการลุกไหม้และการดูดซับความชื้น การใช้งานอาจใช้ในลักษณะการเทพรรจุในช่องผนังหรือเพดานของอาคาร ใช้ในลักษณะของฉนวนแบบแผ่น แบบคลุม ห่ม หรือเป็นโพนัดสำหรับเป็นฉนวนความร้อนใต้คานฟ้าหรือหลังคา โดยทั่วไปแล้วฉนวนโยเซลลูโลสที่ผลิตจำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบัน มักทำขึ้นจากเยื่อกระดาษที่ใส่สารกันไม่ให้ไฟลาม ทำให้ป้องกันไฟไหม้ได้ระดับหนึ่ง ถ้าเยื่อกระดาษนี้มีสารเคมีผสมอย่างถูกต้อง ก็สามารถใช้เป็นวัสดุกันไฟได้ สำหรับคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกันกับโยแร่และโยแก้ว

4) โยหิน (Rockwool) ผลิตจากหิน แต่มีรูปลักษณะและการใช้งานเหมือน ขนสัตว์ ซึ่งเป็น ฉนวนธรรมชาติ

วัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ร็อควูล คือ หินปูน และบาชอลท์ โดยวัตถุดิบจะถูกหลอมในเตาเผาที่ใช้ ถ่านโค้ก เป็น

ไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส วัสดุคืบที่หลอมเหลวจะถูกทำให้เป็น เส้นใย โดยใช้ส้อมหมุนที่ลด อุณหภูมิด้วยน้ำ เส้นใยเหล่านี้จะถูกเคลือบด้วยสารฉนวนที่เป็นเทอร์ โมเซตติ้ง ซึ่งเมื่ออบด้วยความร้อนแล้วจะเชื่อมเส้น ใยเข้าด้วยกันเป็นผืน หลังจากนั้นจะถูกตัดเป็นชิ้นส่วนขนาดต่าง ๆ ทั้งชนิดแผ่นที่มีขนาดเล็กและแข็ง หรือชนิดม้วนที่มี ขนาดใหญ่กว่า

รีอควูล ชนิดแผ่น และม้วนจะมีความหนาแน่น และความหนาต่างกัน ได้หลายขนาด ความหนาแน่นปกติอยู่ใน ช่วง 40-200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาปกติอยู่ในช่วง 50-200 มิลลิเมตร ฉนวนแบบทอที่ขึ้นรูปไว้ ล่วงหน้า สามารถนำมาใช้ผลิตท่อขนาดต่าง ๆ และสามารถจะเคลือบผิวได้หลายแบบ รวมทั้งพอยล์อลูมิเนียม และผ้าใย แก้ว ชนิดแผ่น และม้วนก็เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฉนวนรีอควูล [8]

รีอควูล มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยมในช่วงอุณหภูมิ -240 ถึง +820 องศาเซลเซียส ประโยชน์ใช้งานรวมถึง การกันความร้อนและเก็บเสียงทุกประเภทที่จำเป็นในกิจการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมต่าง ๆ อาคาร ระบบปรับ อากาศ และระบบกันไฟ ตั้งแต่หลังคาจนถึงท่อไอน้ำ ตลอดจนผนังห้อง โดยช่วยให้ลดเสียงลงได้ถึง 50% และช่วยลด ค่าไฟได้ถึง 70%

5) แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) เป็นฉนวนกันความร้อนแบบเป็น โพรงหรือช่องกลวงประกอบด้วย ไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกตโดยระหว่างกรรมวิธีการผลิตไอน้ำจะเปลี่ยนรูปหินปูน และซิลิกาไปเป็นไฮดรอกไซด์แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน นิยมไปใช้ในการหุ้มท่อ และภาชนะในขบวนการทางอุตสาหกรรม ที่มีอุณหภูมิสูง และจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความทนต่อแรงอัดสูงอีกด้วย

6) โฟม (Foam) เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนชนิดอื่นโดยทั่วไปโฟมจะไม่ดูดซับความชื้นแต่เนื่องจากโฟมมีจุดหลอมเหลว ต่ำเมื่อโดนความร้อน สูงเป็นเวลานาน ๆ โฟมจะเสียรูปและไหม้ไปน ที่สุด

7) พอยล์ (Foil) หรือฉนวนรีเฟลคตีฟ จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการกันความร้อนให้กับอาคาร จาก การศึกษาพบว่าการใช้พอยล์เพียงชั้นเดียวไม่พอ สำหรับกันความร้อนจากหลังคา จะต้องมีไม่น้อยกว่า 3-4 ชั้น โดยแต่ละ ชั้นต้องมีช่องว่างอากาศไม่น้อยกว่า 1 นิ้วและต้องป้องกันการรั่วซึมได้ดีด้วย แต่มีข้อแม้ว่าผิวของแผ่นพอยล์ต้อง ผนังงา อยู่ตลอดเวลาถ้าผิวสกรปรกจะสูญเสียค่าการสะท้อนรังสีและจะ ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 40 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

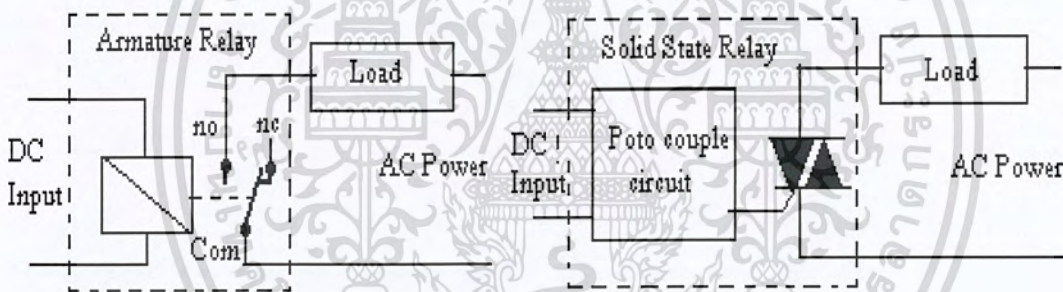
8) เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ทำจากแร่ไมกา ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ด ๆ คล้ายกระจกมีน้ำเป็นส่วนประกอบ การใช้งานจะเป็นลักษณะของฉนวนกัน ความร้อนแบบเทอร์รจูเข้าไปในบล็อกรหรือโพรงผนัง ถ้านำไปผสมกับปูนซิเมนต์หรือทรายจะได้เป็นคอนกรีตเวอร์มิคูไลต์ที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึง 10 เท่า โดยทั่วไปจะผสมสารเคมีบางชนิดเพื่อใช้สำหรับทนกันไฟให้กับ โครงสร้างเหล็ก นิยมใช้ในยุโรปและสหรัฐอเมริกา

9) ยาง (Elastomer) เป็นฉนวนที่ใช้เพื่อหุ้มห่อฉนวนเป็นฉนวนที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบ Closed cell เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิ -40 ถึง 104 องศาเซลเซียส

## 2.9 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state Relay) [9]

โซลิดสเตตรีเลย์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างภาคควบคุม (Control) ซึ่งเป็นส่วนวงจร อิเล็กทรอนิกส์ กับวงจรภาคไฟฟ้ากำลัง (Power) โดยที่ภาคทั้งสองจะมีระบบกราวด์ (Ground) ที่แยกออกจากกันทำให้สามารถป้องกันการลัดวงจร (Short circuit) และการรบกวนซึ่งกันและกันได้ วงจรการต่อใช้งานแบบพื้นฐานของอาร์เมเจอร์รีเลย์ และโซลิดสเตตรีเลย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

โซลิดสเตตรีเลย์ อาจถือได้ว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้แทนอาร์เมเจอร์รีเลย์ (Armature Relay) แต่มีข้อดีกว่า คือ มีขนาดเล็กกว่า มีความไวในการทำงานที่สูงกว่า มีอายุการทำงานนานกว่า เป็นต้น

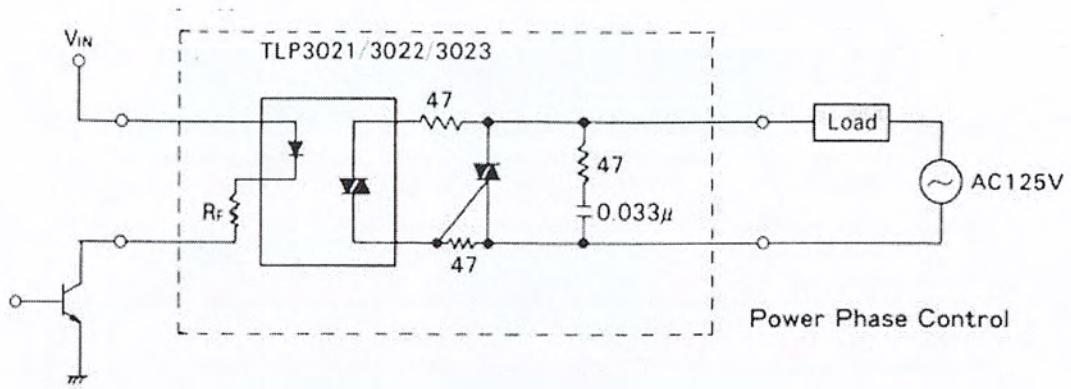


รูปที่ 2.13 วงจรการต่อใช้งานแบบพื้นฐานของอาร์เมเจอร์รีเลย์ และ โซลิดสเตตรีเลย์ [9]

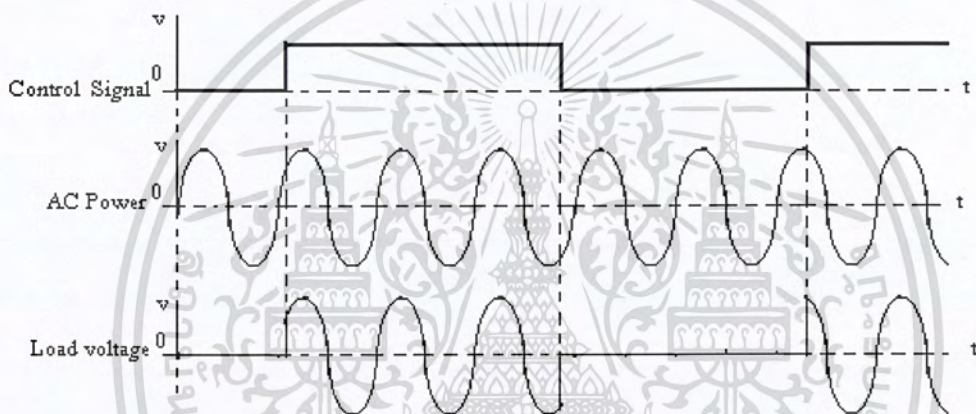
องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ โซลิดสเตตรีเลย์

### 1) แบบ Non Zero Crossing Type

โซลิดสเตตรีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ Photo Couple, Main Triac, Snuber circuit ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จาก กราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรตามรูปที่ 2.15 ซึ่งกระแสไฟและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดจะปรากฏทันที ที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวก



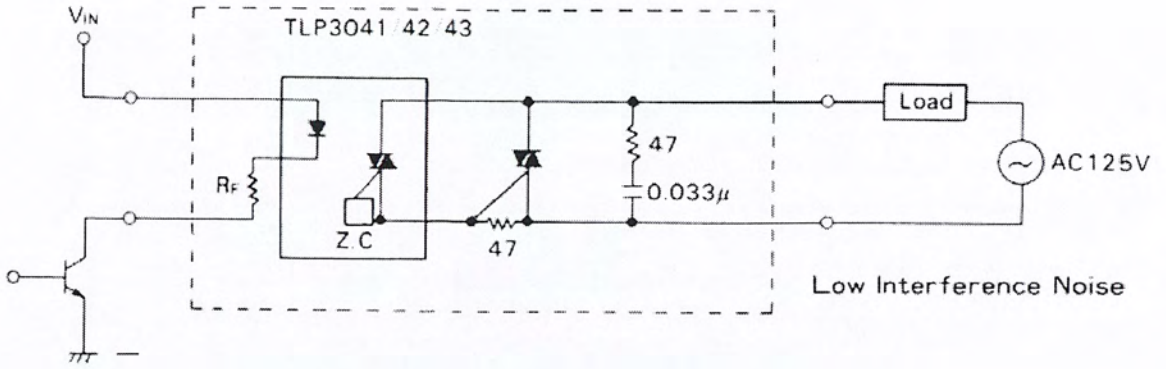
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบและวงจรพื้นฐานของ ไชลิสต์เดครีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type [9]



รูปที่ 2.15 คลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจร ไชลิสต์เดครีเลย์ แบบ Non Zero Crossing Type [9]

## 2) แบบ Zero Crossing Type

ไชลิสต์เดครีเลย์แบบ Zero Crossing Type มีองค์ประกอบ ที่สำคัญคือ Photo Couple ที่เป็นแบบ Zero Crossing Circuit , Main Triac และ Snubber circuit มีวงจรพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.16 องค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.7 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้จาก กราฟรูปคลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในวงจรตามรูปที่ 2.17 ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะไม่ปรากฏทันที ที่สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นบวกแต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะให้กระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โหลด ( ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing On ) และเมื่อสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าเป็นศูนย์ก็จะไม่ตัดกระแสไฟฟ้าในวงจร โหลดทันทีแต่จะหน่วงไปจนถึงจุดที่แรงดัน AC power เป็นศูนย์จึงจะตัดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โหลด(ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Zero Crossing Off)

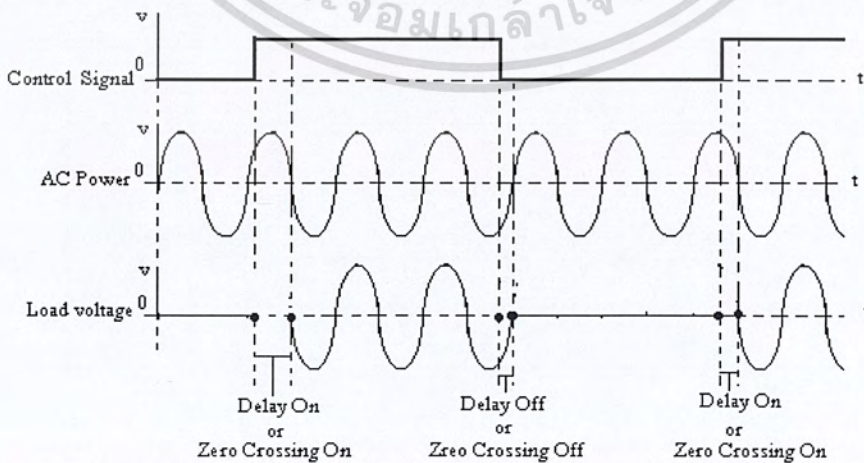


รูปที่ 2.16 วงจรพื้นฐานของ โซลิดสเตตรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type [9]

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของ โซลิดสเตตรีเลย์ แบบ Zero Crossing Type

Recommended  $R_F$  Value

Type	Recommended $R_F$ [Power Rating (W)]		
	$\alpha V_{IN} = 5V$	$\alpha V_{IN} = 12V$	$\alpha V_{IN} = 32V$
TLP3021 TLP3041	120 $\Omega$ [1/2]	390 $\Omega$ [1/2]	1.2K $\Omega$ [2]
TLP3022 TLP3042	180 $\Omega$ [1/4]	560 $\Omega$ [1/2]	1.8K $\Omega$ [1]
TLP3023 TLP3043	360 $\Omega$ [1/8]	1.2K $\Omega$ [1/4]	3.6K $\Omega$ [1/2]



รูปที่ 2.17คลื่นสัญญาณและแรงดันไฟฟ้าแสดงการทำงานของวงจร Solid State Relay แบบ Zero Crossing Type [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การรับแรงของคาน [10]

คานเป็นส่วนหนึ่งที่ทำหน้าที่รับ โมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากแรงภายนอกที่กระทำหรือน้ำหนักบรรทุกบนคานนั้น เมื่อคานได้รับน้ำหนักหรือแรงภายนอกกระทำ คานก็จะเกิดการแอ่นลงหรือโก่งงอทำให้คานไม่อยู่ในแนวตรงเหมือนตอนแรกที่ยังไม่ได้รับน้ำหนัก ฉะนั้นในการคำนวณและออกแบบคานที่รับน้ำหนัก จะต้องคำนวณถึงการโก่งของคานด้วย มิฉะนั้นแล้วคานหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจะไม่สามารถทำงานได้ดีตามที่ต้องการ หรืออาจเกิดการเสียหายก่อนกำหนดได้

การคำนวณการ โก่งของคานด้วยวิธี Double-integration

วิธี Double-integration เป็นวิธีการหาระยะการ โก่งและค่าความลาดเอียง ตลอดจนหาเส้น โค้งอีลาสติกตลอดความยาวของคานนั้น เป็นวิธีการที่ใช้การอินทิเกรต 2 ครั้ง

พิจารณาเส้น โค้งอีลาสติกของคานซึ่งถูกแรงภายนอกกระทำให้เกิดการ โก่งงอแสดงในรูปที่ 2.18 โดยให้  $ds$  เป็นความยาวส่วนหนึ่งของเส้น โค้งอีลาสติกนี้ จุด C คือจุดศูนย์กลางของความโค้ง และ  $\rho$  เป็นรัศมีของความโค้งของเส้น โค้งอีลาสติก ณ พื้นที่หน้าตัด  $x$  ใด ๆ หาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.18 จะได้ความสัมพันธ์  $ds = \rho d\theta$

หรือ

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds}$$

แต่

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

เพราะฉะนั้น

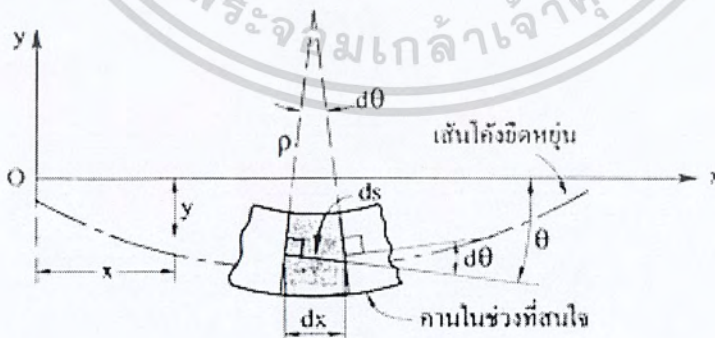
$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{EI}$$

เนื่องจาก  $ds \approx dx$  และ  $\theta = \frac{dy}{dx}$

ดังนั้น

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \pm \frac{M}{EI}$$

(2.4)



รูปที่ 2.18 เส้น โค้งอีลาสติก [10]

ข้อตกลงเรื่องเครื่องหมาย จากสมการข้างต้นจะมีเครื่องหมาย (+) หรือลบ (-) ซึ่งขึ้นอยู่กับกำหนัด

เครื่องหมายของโมเมนต์ดัด  $M$  และจุดโคออร์ดิเนต  $x, y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามเครื่องหมาย M, x และ y ที่กำหนดมาตั้งแต่ต้น จะเห็นว่า

- เมื่อเส้นโค้งอีลาสติคหงายขึ้น ซึ่งตรงกับค่า M เป็นบวก (+) ค่าความลาด  $\frac{dy}{dx}$  จะลดลงเมื่อ x เพิ่มขึ้น ดังนั้น

$\frac{d^2y}{dx^2}$  เป็นลบ (-)

- เมื่อเส้นโค้งอีลาสติคคว่ำลง ซึ่งตรงกับค่า M เป็นลบ (-) ค่าความลาด  $\frac{dy}{dx}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อ x

เพิ่มขึ้น ดังนั้น  $\frac{d^2y}{dx^2}$  เป็นลบ (+)

จากข้อความข้างต้น พอสรุปได้ว่าค่า  $\frac{d^2y}{dx^2}$  และ M จะมีเครื่องหมายตรงกันข้ามเสมอไป

เขียนสมการใหม่เพื่อให้สอดคล้องตามเครื่องหมายจะได้

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -M$$

$$EI \frac{d^3y}{dx^3} = -V$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -\frac{dV}{dx} = w$$

(2.5)

เมื่อ	M	= โมเมนต์คดที่เกิดขึ้นในคาน
	I	= โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดคาน
	E	= โมดูลัสของการยืดหยุ่นของวัสดุที่กระทำกับคาน
	V	= แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานนั้น
	W	= น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับคาน
	x, y	= โคออร์ดิเนตของจุดบนเส้นโค้งอีลาสติค

ขั้นตอนการหาค่าความลาดเอียงและระยะโค้ง โดยวิธี Double-integration

- 1) เขียนรูปแสดงการสมดุลของส่วนของคานที่รับน้ำหนัก แล้วคุณลักษณะการโค้งของคานก่อน
- 2) เลือกจุดเริ่มต้น และแกนตั้ง x, y แล้วกำหนดเครื่องหมายให้ถูกต้อง
- 3) เขียนสมการของโมเมนต์คด M อยู่ในเทอมของระยะ x และแรงหรือน้ำหนักที่กระทำ
- 4) แทนค่าของโมเมนต์คด M ลงในสมการเส้นโค้งอีลาสติค

5) แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการเส้นโค้งอีลาสติค โดยการอินทิเกรต ในการอินทิเกรตครั้งแรกจะได้สมการของความลาดเอียงและตัวคงที่หนึ่งตัว เมื่ออินทิเกรตครั้งที่สองจะได้สมการของการโค้งและมีตัวคงที่เพิ่มขึ้นอีกตัว

- 6) หาค่าของตัวคงที่เหล่านี้โดยอาศัยเงื่อนไขต่างๆ

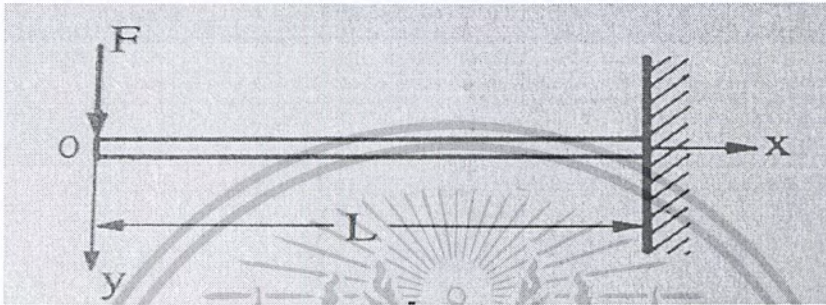
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) แทนค่าตัวคงที่ที่หาได้ลงในสมการของความลาดเอียง และการโก่งในขั้นตอนที่ 5 ก็จะได้สมการที่ต้องการ ค่าความลาดเอียงและการโก่งที่จุดใดๆ จะหาได้โดยแทนค่าของระยะ  $x$  ลงไปในสมการของความลาดเอียงและการโก่ง

เงื่อนไขสำหรับการหาค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรต

1) คานแบบยื่น (Cantilever beam)

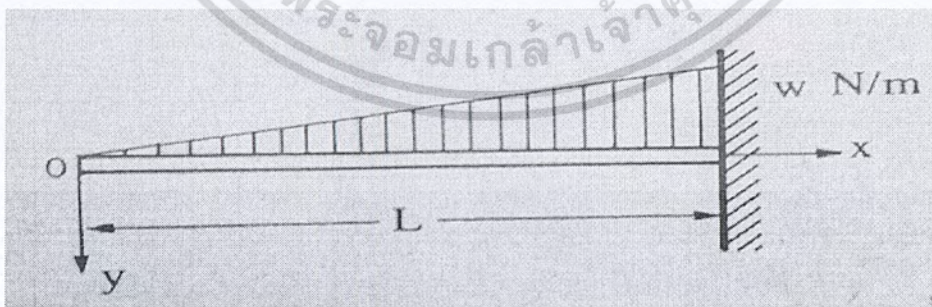
ก. เมื่อแรงกระทำเป็นแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานยื่น [10]

เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าความลาดเอียงเท่ากับศูนย์  $\left[ \frac{dy}{dx} = 0 \right]$   
 (2) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าระยะ โกงเท่ากับศูนย์  $(y = 0)$

ข. เมื่อแรงกระทำเป็นแบบกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.20



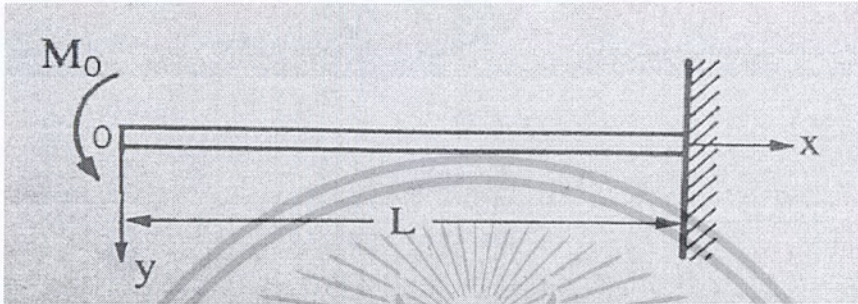
รูปที่ 2.20 แรงกระทำเป็นแบบกระจายในคานยื่น [10]

เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าความลาดเอียงเท่ากับศูนย์  $\left[ \frac{dy}{dx} = 0 \right]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าระยะ โกงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )
- (3) เมื่อ  $x = 0$  จะได้แรงเฉือนเท่ากับศูนย์ ( $V = 0$ )
- (4) เมื่อ  $x = 0$  จะได้โมเมนต์ดัดเท่ากับศูนย์ ( $M = 0$ )

ก. เมื่อแรงกระทำเป็นแรงคู่ควบหรือโมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

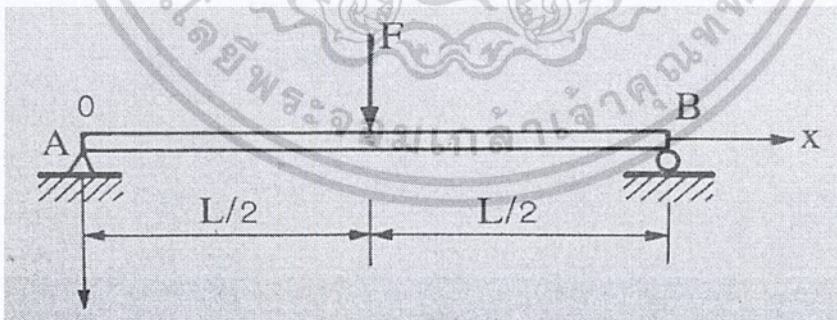


รูปที่ 2.21 แรงกระทำเป็นแรงคู่ควบหรือโมเมนต์ในคานยื่น [10]

- เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าความลาดเอียงเท่ากับศูนย์  $\left[ \frac{dy}{dx} = 0 \right]$   
 (2) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าระยะ โกงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )

2) คานช่วงเดียว (Simply supported beam)

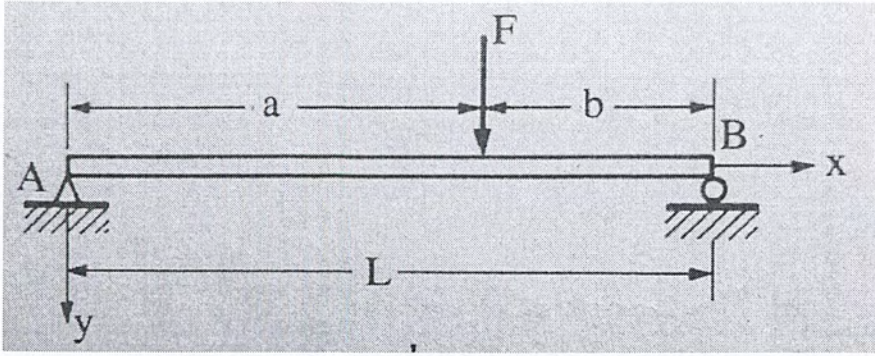
ก. เมื่อแรงกระทำเป็นแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23



รูปที่ 2.22 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานช่วงเดียวที่ตำแหน่งกึ่งกลาง [10]

- เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = 0$  จะได้ค่าระยะ โกงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )  
 (2) เมื่อ  $x = \frac{L}{2}$  จะได้ค่าความลาดเอียงเท่ากับศูนย์  $\left[ \frac{dy}{dx} = 0 \right]$

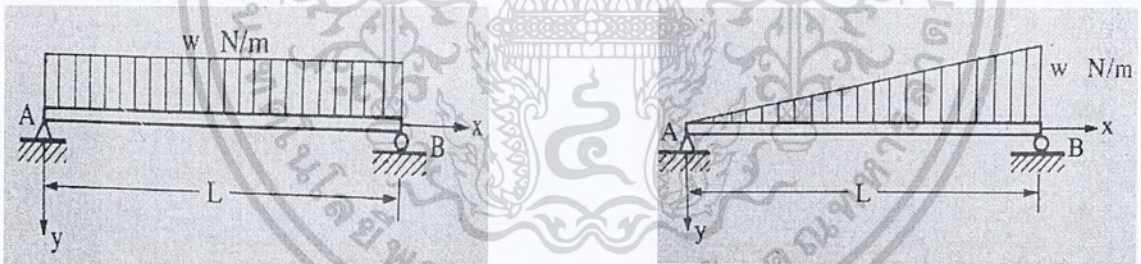
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 47 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แรงกระทำเป็นแบบจุดในคานช่วงเดียวที่ตำแหน่งไม่กึ่งกลาง [10]

- เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = 0$  จะได้ค่าระยะ โคงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )  
 (2) เมื่อ  $x = L$  จะได้ค่าระยะ โคงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )  
 (3) เมื่อ  $x = a$ ,  $\frac{dy_1}{dx} = \frac{dy_2}{dx}$  ที่  $x = a$   
 (4) เมื่อ  $x = a$ ,  $y_1 = y_2$  ที่  $x = a$

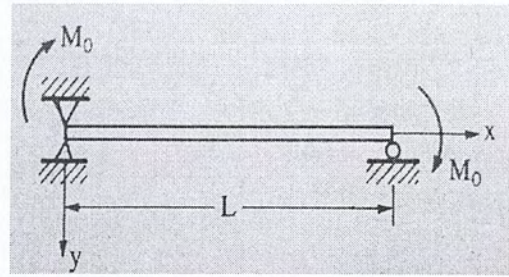
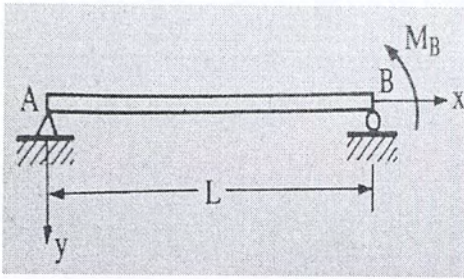
ข. เมื่อแรงกระทำเป็นแบบกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แรงกระทำเป็นแบบกระจายในคานช่วงเดียว [10]

- เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = 0$  จะได้แรงเฉือนเท่ากับแรงปฏิกิริยาที่จุด A ( $V = R_A$ )  
 (2) เมื่อ  $x = 0$  จะได้โมเมนต์ตัดเท่ากับศูนย์ ( $M = 0$ )  
 (3) เมื่อ  $x = 0$  จะได้ระยะ โคงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )  
 (4) เมื่อ  $x = L$  จะได้ระยะ โคงเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )

ค. เมื่อแรงกระทำเป็นแรงคู่ควบหรือ โมเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แรงกระทำเป็นแรงคู่ควบหรือโมเมนต์ในคานช่วงเดียว [10]

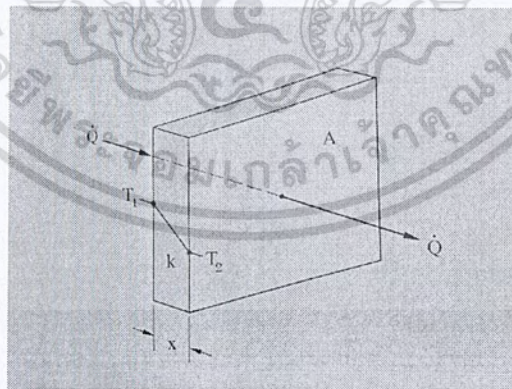
- เงื่อนไข (1) เมื่อ  $x = 0$  จะได้ระยะโค้งเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )  
 (2) เมื่อ  $x = L$  จะได้ระยะโค้งเท่ากับศูนย์ ( $y = 0$ )

## 2.11 การถ่ายเทความร้อน

### 2.11.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction heat transfer) ของตัวกลางใดๆจะเป็นไปตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) [11]

กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์กล่าวว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นตัวกลาง ( $\dot{Q}$ ) เป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ( $A$ ) และเป็นปฏิภาคโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทางในทิศการไหล  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$  ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การนำความร้อนตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ [11]

พิจารณาการนำความร้อนผ่านแผ่นตัวกลางหนา  $x$  พื้นที่หน้าตัด  $A$  โดยมีความร้อนไหลจากผนังด้านร้อนอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังผนังด้านเย็นอุณหภูมิ  $T_2$  ถ้าแผ่นตัวกลางมีสภาพนำความร้อน (thermal conductivity) เท่ากับ  $k$  (มีหน่วยเป็น  $W/m.K$ ) ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นตัวกลางนี้คำนวณจาก

$$\dot{Q} \propto \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right) \propto \frac{A(T_1 - T_2)}{x}$$

$$\dot{Q} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x} \quad (2.6)$$

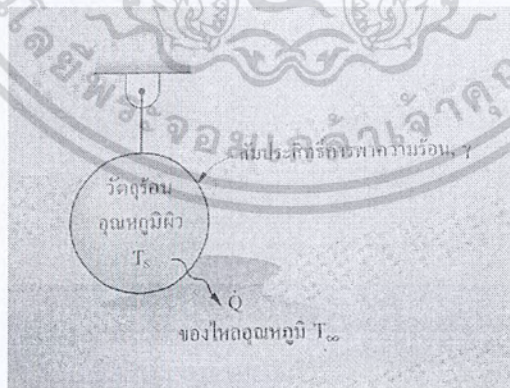
- โดยที่  $k$  = สกพนำความร้อนของตัวกลาง มีหน่วยเป็น W/m.K  
 $X$  = ความหนาของแผ่นตัวกลางในทิศการไหลของความร้อน มีหน่วยเป็น m  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศการไหลของความร้อน มีหน่วยเป็น  $m^2$   
 $(T_1 - T_2)$  = ผลต่างของอุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิต่ำ มีหน่วยเป็น C หรือ K  
 $\dot{Q}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นตัวกลาง โดยมีทิศการไหลจากอุณหภูมิสูง ( $T_1$ ) ไปยังอุณหภูมิต่ำ ( $T_2$ ) และมีหน่วยเป็น W

### 2.11.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน (Convection heat transfer) หมายถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล เมื่อผิวของแข็งและของไหลนั้นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน [11] การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- 1) การพาความร้อน โดยธรรมชาติ การพาความร้อน โดยธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้โดยมีการเคลื่อนไหวนวของมวลตัวกลางหรือของไหล ซึ่งมีผลมาจากของไหลสองบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จึงทำให้ความหนาแน่นของของไหลทั้งสองบริเวณแตกต่างกันและเกิดแรงลอยตัวของของไหล ทำให้เกิดการไหลขึ้นในขณะที่ถ่ายเทความร้อน
- 2) การพาความร้อน โดยบังคับ การพาความร้อน โดยบังคับจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ของไหลมีการเคลื่อนที่โดยใช้แหล่งพลังงานภายนอก เช่น เครื่องสูบลม หรือพัดลมเป่าให้ของไหลเคลื่อนที่ขณะถ่ายเทความร้อน ฯลฯ

ในปี คศ. 1700 เซอร์ไอแซก นิวตัน ได้ทำการทดลองโดยรั้งแรกนำวัตถุของแข็งไปเผาในเตาแล้วนำออกมาปล่อยให้เย็นลงในบริเวณภายนอกที่มีลมพัดผ่าน ดังรูปที่ 2.27 นิวตันพบว่า



รูปที่ 2.27 การระบายความร้อนออกจากวัตถุโดยการพาความร้อน [11]

อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุร้อนกับอากาศโดยรอบ (ของไหลโดยรอบ) นั่นคือ

$$\dot{Q} \propto (T_s - T_\infty)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 50 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากวัตถุจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพื้นที่ผิวของวัตถุซึ่งสัมผัสกับอากาศโดยรอบ (ของไหลโดยรอบ) นั่นคือ

$$\dot{Q} \propto A$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้จะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\dot{Q} \propto A(T_s - T_\infty)$$

ดังนั้น จะสามารถเขียนสมการกฎการระบายความร้อนของนิวตัน (Newton's law of cooling) ได้ว่า

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

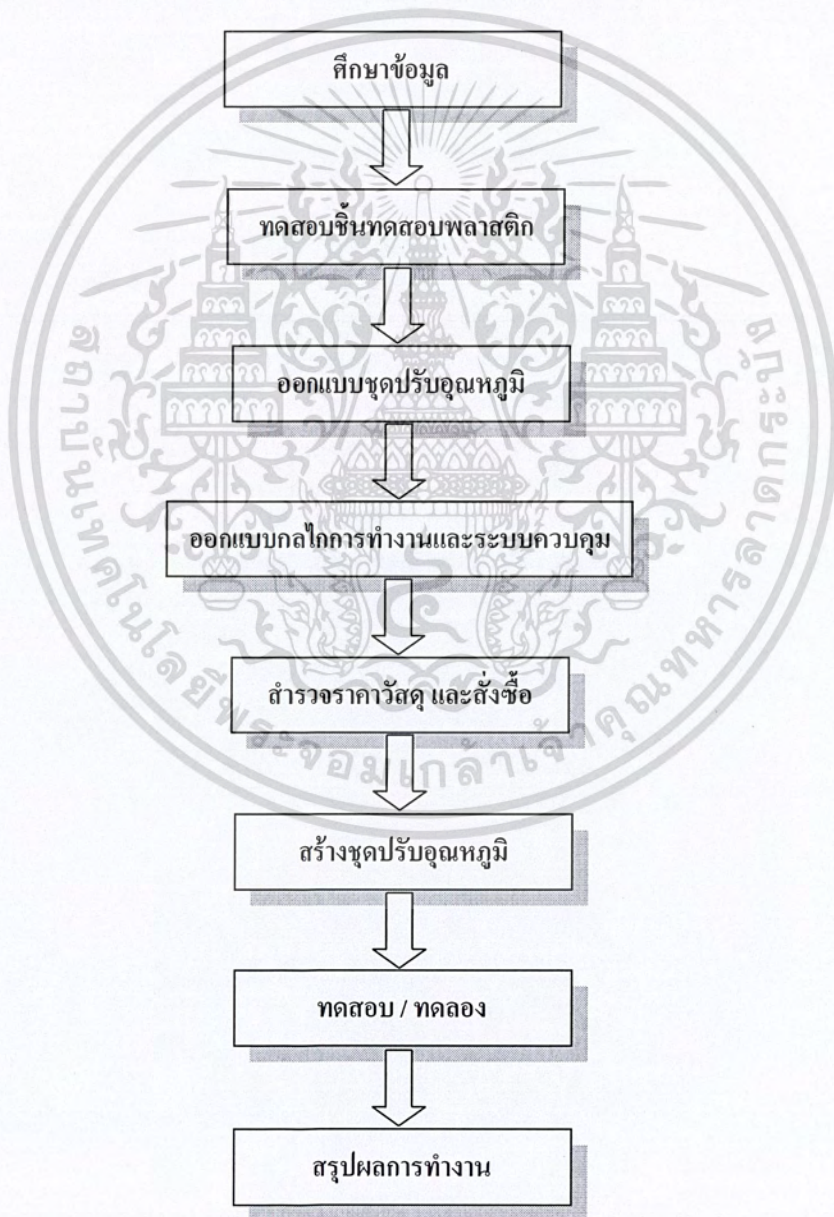
โดยที่	$\dot{Q}$	= อัตราการพาความร้อนระหว่างผิววัตถุกับของไหล มีหน่วยเป็น W
	$A$	= พื้นที่ผิวของวัตถุสัมผัสกับของไหล มีหน่วยเป็น $m^2$
	$T_s$	= อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของวัตถุ มีหน่วยเป็น K
	$T_\infty$	= อุณหภูมิของของไหล มีหน่วยเป็น K
	$h$	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวของวัตถุ มีหน่วยเป็น $W/m^2.K$

# บทที่ 3

## การดำเนินงาน

### 3.1 การวางแผนดำเนินงาน

ขั้นตอนการวางแผนและการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวางแผนและการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่ 1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine), การทดสอบแรงดึง, มาตรฐานการทดสอบแรงดึง, คุณสมบัติของพลาสติก, ชุดปรับอุณหภูมิที่ใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงที่มีอยู่แล้วเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบชุดปรับอุณหภูมิ

ระยะที่ 2 ทำการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08 กับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) 2 เครื่องเพื่อเปรียบเทียบหาค่าความคลาดเคลื่อนและความเป็นไปของโครงการ

ระยะที่ 3 ออกแบบชุดปรับอุณหภูมิเบื้องต้น ลักษณะตัวกล่องปรับอุณหภูมิ และปรับปรุงแบบ

ระยะที่ 4 ออกแบบกลไกการทำงานของชุดปรับอุณหภูมิ, คาบ, การให้ความร้อนภายในกล่อง, การควบคุมอุณหภูมิ และการคำนวณแรงต่างๆ

ระยะที่ 5 ดำเนินการทาสี สั่งทำวัสดุ และจัดซื้อวัสดุตามที่ได้ออกแบบไว้

ระยะที่ 6 สร้างชุดปรับอุณหภูมิตามที่ได้ออกแบบไว้

ระยะที่ 7 ศึกษาวงจรไฟฟ้าและดำเนินการต่อวงจรไฟฟ้า

ระยะที่ 8 ทำการทดสอบชุดปรับอุณหภูมิโดยการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08 และขึ้นทดสอบโลหะกับเครื่องทดสอบแรงดึงและเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับข้อมูลที่ใช้อ้างอิง และทำการแก้ไขข้อบกพร่องของชุดปรับอุณหภูมิให้ดียิ่งขึ้น

ระยะที่ 9 สรุปและวิจารณ์ผลการดำเนินงานทั้งหมด

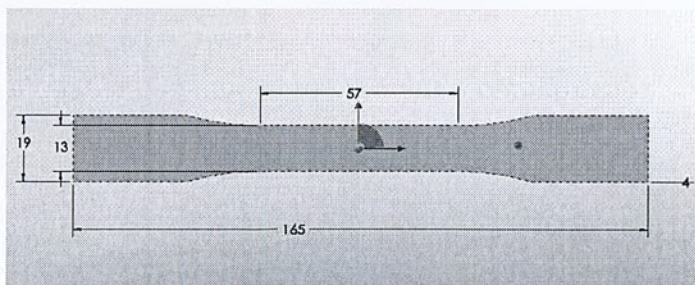
### 3.2 ทดสอบขึ้นทดสอบพลาสติก

ทำการทดสอบขึ้นทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08 วัสดุที่เลือกใช้ คือ อะคริลิกความหนา 4 มิลลิเมตร

#### 3.2.1 ขึ้นทดสอบ

##### 3.2.1.1 เลือก Type ของขึ้นทดสอบ

วัสดุที่ใช้ คือ อะคริลิก หนา 4 มิลลิเมตร จึงเลือกใช้ขนาดของขึ้นทดสอบตาม Type I ตามมาตรฐาน ASTM D638-08 มีขนาดรูปร่างดังรูปที่ 3.2



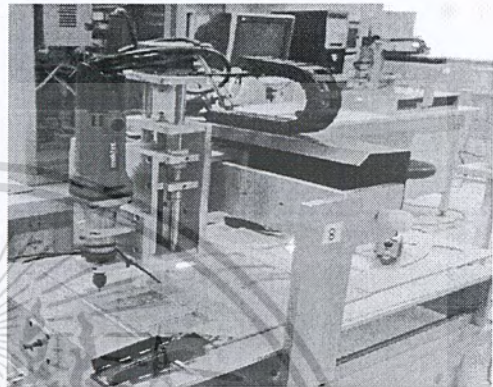
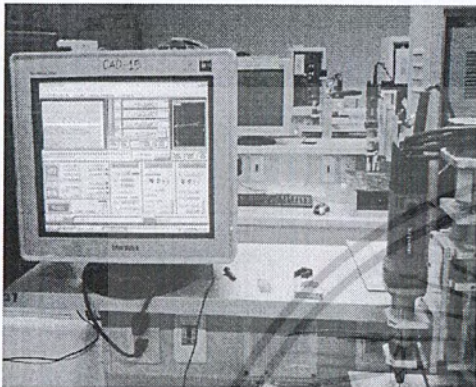
รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดขึ้นทดสอบพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 53 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.2 ดำเนินการตัดชิ้นทดสอบ

ดำเนินการตัดชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่อง CNC Controller ในการการตัดชิ้นทดสอบ ดังนี้

- 1) วาดชิ้นทดสอบ โดยใช้โปรแกรม Solid Works
- 2) แปลงเป็น G-Code โดยใช้โปรแกรม Cad-Cam แปลงจาก Solid Works ดังแสดงในภาคผนวก ข
- 3) ใช้โปรแกรม Mach3- Mill ในการควบคุมเครื่อง CNC Controller ตัดชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.3



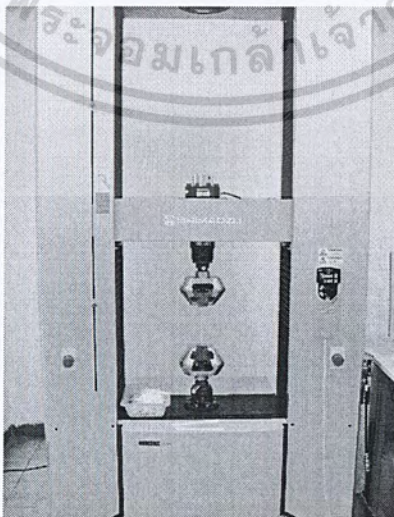
รูปที่ 3.3 การตัดชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง CNC Controller

### 3.2.2 ดำเนินการทดสอบแรงดึง

ดำเนินการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบอะคริลิก ดังนี้

- 1) ทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ดำเนินการทดสอบแรงดึงชิ้นทดสอบอะคริลิก โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X, 100 กิโลนิวตัน น้ำหนัก 800 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของ Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที



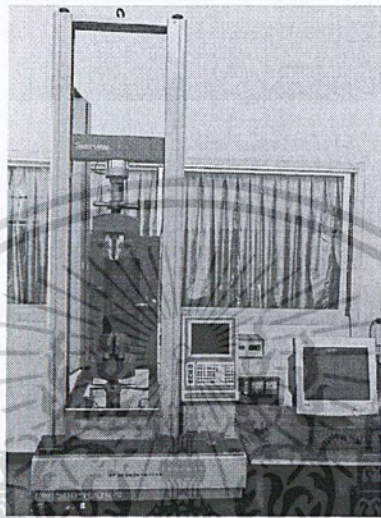
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Shimadzu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>54</sup>ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเค้น-เครียด ที่ได้จากการทดสอบ คือ 69.23 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

2) ทดสอบแรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบที่สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ดำเนินการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกโดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron, 100 กิโลนิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของ Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อ นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Instron

ค่าความเค้น-เครียด ที่ได้จากการทดสอบ คือ 63.79 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

### 3.3 การออกแบบชุดปรับอุณหภูมิ

การออกแบบชุดปรับอุณหภูมิได้ออกแบบและปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X, 100 กิโลนิวตัน โดยคำนึงถึงเครื่องทดสอบแรงดึงเป็นหลักเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้

#### 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดปรับอุณหภูมิ

##### 3.3.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI 304

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% มีคุณสมบัติต้านทานเกิดสนิมและการนำความร้อนต่ำกว่าเหล็ก

##### 3.3.1.2 ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater)

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมโดยมีหลักการพื้นฐาน คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงลวดตัวนำจะร้อน ลักษณะการใช้งานจะใส่ไว้ในช่องบนวัสดุความร้อนจะจากฮีตเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 55 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง

### 3.3.1.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Control Temperature)

เป็นอุปกรณ์ควบคุมและแสดงผลใช้ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล

### 3.3.1.5 ฉนวนใยหิน (Rockwool)

ฉนวนใยหินมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยมในช่วงอุณหภูมิ -240 ถึง +820 องศาเซลเซียส สามารถกันความร้อนได้อย่างดีเยี่ยม

### 3.3.1.6 กระจกเทมเปอร์

สามารถรับแรงได้มากกว่ากระจก Clear Float Glass ที่ความหนาเท่ากัน ได้ 5-10 เท่า และสามารถรับแรงดึงและดัดงอได้มากกว่ากระจก Clear Float Glass ประมาณ 3 เท่า เมื่อแตกจะเป็นเม็ดเล็ก ไม่คม

### 3.3.1.7 เกลียวเร่ง (Turn ductle)

ใช้สำหรับยกและแขวนวัตถุสามารถปรับระดับได้

### 3.3.1.8 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state Relay)

ใช้สำหรับเพิ่มกระแสของคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากฮีตเตอร์มีจำนวน 5 ตัว ใช้กระแส 10 แอมแปร์

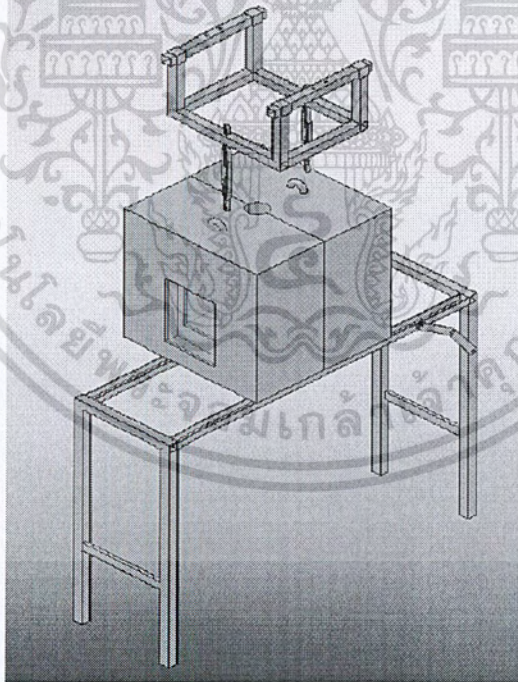
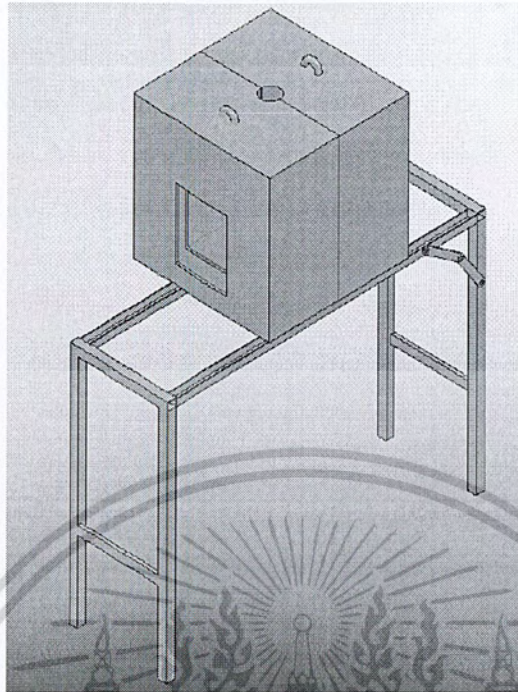
### 3.3.1.9 ล้อ

ล้อเป็นวัตถุรูปวงกลมถูกยึดไว้ด้วยเพลลาที่บริเวณจุดศูนย์กลาง ทำให้ล้อสามารถหมุนรอบเพลลาได้ ใช้ประกอบเพื่อให้วัตถุสามารถเคลื่อนที่ได้ ในที่นี้ใช้ประกอบกับกล่องของชุดปรับอุณหภูมิ

## 3.3.2 การออกแบบชุดปรับอุณหภูมิ

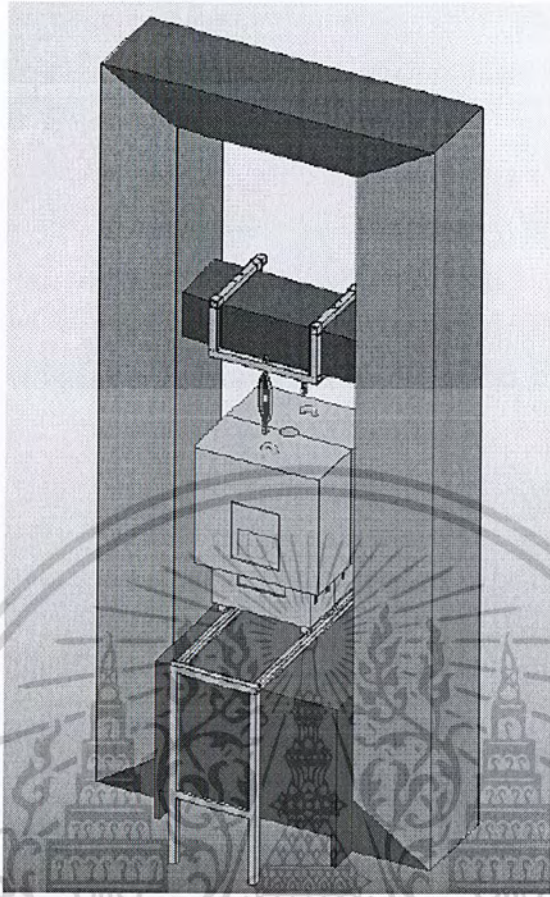
กล่องปรับอุณหภูมิมี่ทั้งหมด 2 ชั้น แบ่งเป็น ชั้นนอก และชั้นใน และแยกออกเป็น 2 ส่วนหน้า-หลัง ในผนังแต่ละด้านประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์และฉนวน เมื่อต้องการใช้งานจะนำตู้แต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันโดยเลื่อนตู้แต่ละด้านมาประกบกันครอบหุ้มไว้แล้วล็อกให้แน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 และแบบของชุดปรับอุณหภูมิแสดงในภาคผนวก ก บริเวณใต้กล่องปรับอุณหภูมิจะมี Thermocouple ซึ่งเป็นตัววัดอุณหภูมิภายในกล่องอ่านค่าแล้วแสดงผล บริเวณด้านบนของตู้จะยึดเข้ากับคานของเครื่อง Universal Testing Machine เมื่อทำการทดสอบแรงดึงกล่องชั้นนอกจะเคลื่อนที่ขึ้นตามคานของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยมีส่วนยึดกล่องด้านบนกับคานเพื่อเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>56</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ชุดกล่องปรับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>57</sup>และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

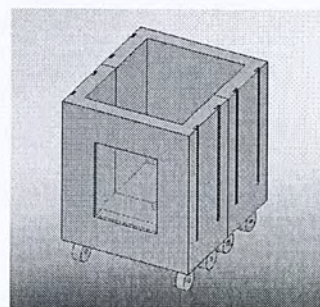
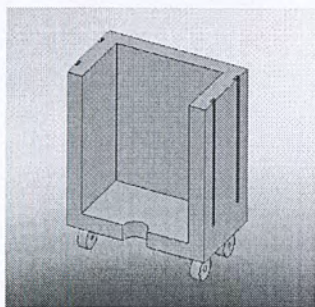
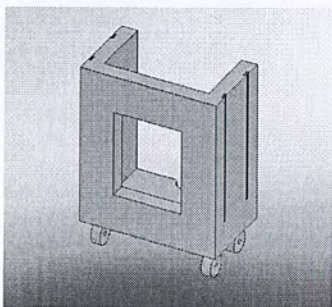


รูปที่ 3.7 ชุดกล่องปรับอุณหภูมิเมื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง

### 3.3.2.1 แบบของชุดปรับอุณหภูมิบริเวณส่วนที่เป็นกล่อง

กล่องปรับอุณหภูมิมียุคด้วยกันทั้งหมด 2 ชั้น แบ่งเป็น กล่องชั้นนอก และกล่องชั้นใน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ แยกออกเป็น 2 ส่วนหน้า-หลัง ครอบกัน โดยกล่องชั้นนอกครอบกล่องชั้นใน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในผนังแต่ละด้านประกอบไปด้วย ฮีตเตอร์ และฉนวน บริเวณด้านหน้าของกล่องมีกระจกเทมเปอร์อยู่ทั้งกล่องชั้นใน และกล่องชั้นนอก กล่องชั้นในติดล้อไว้ที่ใต้กล่องทั้งหมด 8 ล้อ

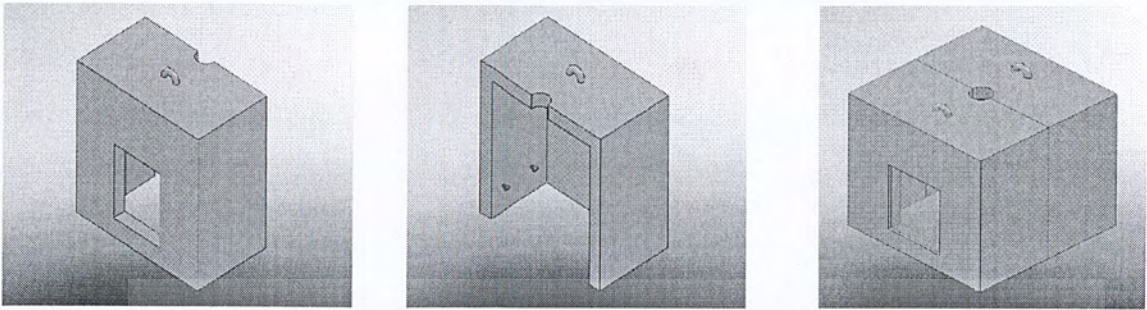
กล่องปรับอุณหภูมิชั้นใน แบบกล่องปรับอุณหภูมิชั้นในแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.8 กล่องปรับอุณหภูมิส่วนด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 58 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่องปรับอุณหภูมิชั้นนอก แบบกล่องปรับอุณหภูมิชั้นนอกแสดงในภาคผนวก ก



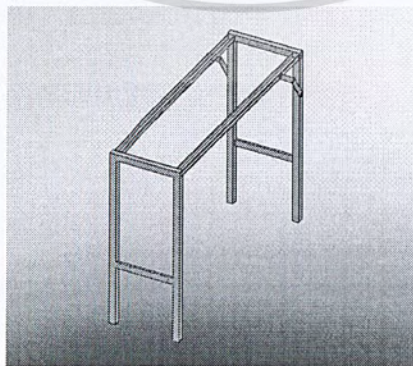
รูปที่ 3.9 กล่องปรับอุณหภูมิส่วนด้านนอก



รูปที่ 3.10 ชุดปรับอุณหภูมิส่วนที่เป็นกล่องขณะประกอบ

### 3.3.2.2 แบบของชุดปรับอุณหภูมิบริเวณส่วนที่เป็นชุดขาตั้งรางเลื่อน

รางเลื่อนเป็นส่วนที่ติดตั้งของกล่องปรับอุณหภูมิ มีไว้สำหรับติดตั้งกล่องปรับอุณหภูมิในเลื่อนเข้า-ออก จากกันได้โดยง่าย ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และแบบขาตั้งและรางเลื่อนแสดงในภาคผนวก ก

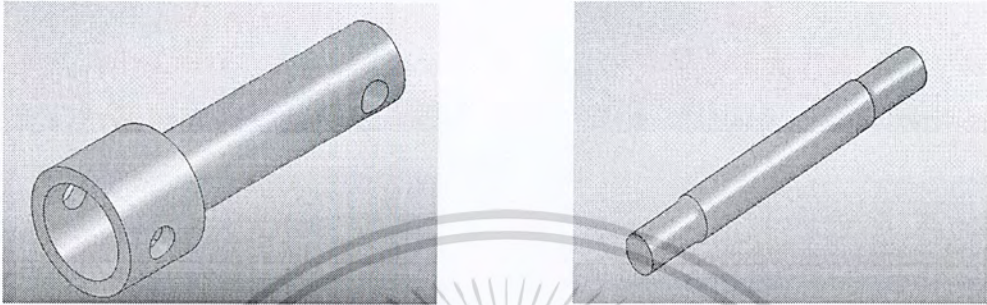


รูปที่ 3.11 ขาตั้งและรางเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 59 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.3 แบบของแกนปากยึดจับ (Grip)

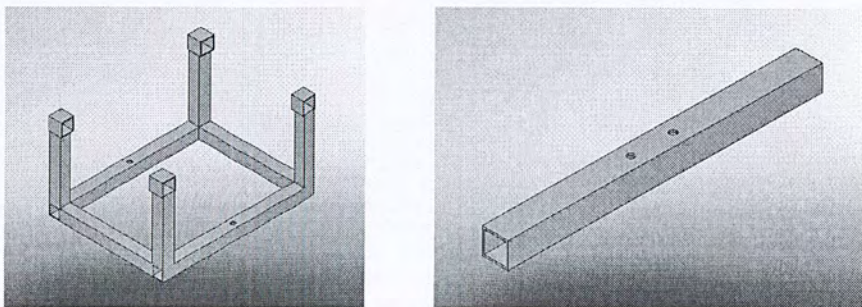
แกนของปากยึดจับเป็นส่วนที่ใช้ต่อกับปากยึดจับเพื่อป้องกัน โหลดเซลล์ (Lode cell) เสียหายจากความร้อนภายในกล่อง ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และแบบแกนปากยึดจับและสลักแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.12 แกนปากยึดจับ

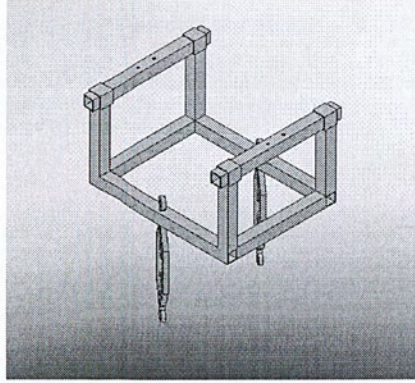
### 3.3.2.4 แบบของคานยก

คานยกใช้ประกอบกับคานของเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) เป็นส่วนที่ใช้ยกกล่องปรับอุณหภูมิ เกลียวเร่ง และห่วงอายุสกรู เป็นตัวยึดจับ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 และแบบคานยกแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.13 คานยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 คานยกขณะประกอบกับเก็ลยวเร่ง

### 3.3.2.5 ตารางวัสดุ

ส่วนประกอบของกล่องชั้นใน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในกล่องชั้นใน

ลำดับที่	วัสดุ	ขนาด(mm <sup>2</sup> )	จำนวน (ชิ้น)
1	แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม	-ด้านล่าง	125 x 250
			161 x 322
		-ด้านข้าง 2 ข้าง	125 x 330
			161 x 366
		-ด้านหน้าและหลัง	250 x 330
			322 x 366
2	ฉนวน	-ด้านล่าง	322 x 322
		-ด้านข้าง 2 ข้าง	161 x 366
		-ด้านหน้าและหลัง	322 x 366
3	สปีดเตอร์	-ด้านหลัง รูปร่างตัวคียบเบิลยู	Ø= 8 mm, 150 x 250
		-ด้านข้าง 2 ข้าง รูปร่างตัวยู	Ø= 8 mm, L=250
4	กระจกเทมเปอร์		
	-ด้านหน้า	160 x 197	1

ส่วนประกอบของกล่องชั้นนอก ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุที่ใช้ในกล่องชั้นนอก

ลำดับที่	วัสดุ	ขนาด(mm <sup>2</sup> )	จำนวน (ชิ้น)	
1	แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม	-ด้านบน	171 x 342	1
			207 x 414	1
	-ด้านข้าง 2 ข้าง		171 x 366	4
			207 x 402	4
	-ด้านหน้าและหลัง		342 x 366	2
			414 x 402	2
2	ฉนวน	-ด้านบน	207 x 414	1
		-ด้านข้าง 2 ข้าง	207 x 402	4
		-ด้านหน้าและหลัง	414 x 402	2
3	กระจกเทมเปอร์			
		-ด้านหน้า	160 x 197	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 62 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุและส่วนประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในกล่องปรับอุณหภูมิ

ลำดับที่	วัสดุ	ขนาด	จำนวน (ชิ้น)
1	Thermocouple	L = 1.5 m	1
2	Controller รุ่น FY 400	48 × 48	1
3	ท่อโลหะ	Ø = 25 mm	8
4	เกลียวเร่ง	size 10 mm, L = 177 mm	2
5	ชุดโครงร่างเลื่อน -เหล็กรางบาง -เหล็กฉาก ขาตั้ง แกนประกอบ	20 x 25, L = 800 mm t = 2 mm, 25 x 25 mm <sup>2</sup> L = 670 mm L = 294 mm	2 4 2
6	ชุดคานยก -เหล็กฉาก แกนประกอบ แกนสอด	t = 2 mm, 25 x 25 mm <sup>2</sup> L = 353 mm L = 220 mm L = 145 mm t = 2 mm, 25 x 25 mm <sup>2</sup> , L = 300 mm	2 2 4 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 63 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การคำนวณ

#### 3.4.1 การคำนวณน้ำหนักของกล่อง

เหล็กกล้าไร้สนิม

$$t = 1.5 \text{ mm}, \rho = 8.03 \text{ g/cm}^3$$

$$V = [[(322 \times 322 \times 2) + (322 \times 366 \times 8)] \times 1.5] + [[(414 \times 414 \times 2) + (414 \times 402 \times 8)] \times 1.5]$$

$$V = 1,725,276 + 2,511,324$$

$$V = 4,236,600 \text{ mm}^3$$

$$\text{จากสมการ } \rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho V$$

(3.1)

$$m = 4236.6 \text{ cm}^3 \times 8.03 \text{ g/cm}^3$$

$$m = 34019.9 \text{ g}$$

$$m = 34.020 \text{ kg}$$

ฉนวน

$$t = 25 \text{ mm}, \rho = 100 \text{ kg/m}^3$$

$$V = [[(322 \times 322 \times 1) + (322 \times 366 \times 4)] \times 25] + [[(414 \times 414 \times 1) + (414 \times 402 \times 4)] \times 25]$$

$$V = 14,377,300 + 20,927,700$$

$$V = 35,305,000 \text{ mm}^3$$

$$m = 0.0353 \text{ m}^3 \times 100 \text{ kg/m}^3 = 3.531 \text{ kg}$$

กระจกเทมเปอร์

$$t = 8 \text{ mm}, \rho = 2.5 \text{ g/cm}^3$$

$$V = 160 \times 197 \times 8 \times 2$$

$$V = 504,320 \text{ mm}^3$$

$$m = 504.32 \text{ cm}^3 \times 2.5 \text{ g/cm}^3$$

$$m = 1260.8 \text{ g} = 1.261 \text{ kg}$$

ฮีตเตอร์ 5 ชิ้น

$$m = 5 \times 0.5 = 2.5 \text{ kg}$$

$$\text{น้ำหนักรวมทั้งหมดของกล่อง} = 34.020 \text{ kg} + 3.531 \text{ kg} + 1.261 \text{ kg} + 2.5 \text{ kg}$$

สรุป น้ำหนักรวมทั้งหมดของกล่องเท่ากับ 41.312 กิโลกรัม

#### 3.4.2 การคำนวณการโค้งตัวของคาน

##### 3.4.2.1 น้ำหนักของกล่องชั้นนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 64 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็ก

$$m = 2511.324 \text{ cm}^3 \times 8.03 \text{ g/cm}^3 = 20165.931 \text{ g} = 20.166 \text{ kg}$$

ฉนวน

$$m = 0.0002093 \text{ m}^3 \times 100 \text{ kg/cm}^3 = 2.093 \text{ kg}$$

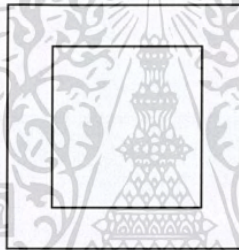
กระจกเทมเปอร์

$$m = 252.16 \text{ cm}^3 \times 2.5 \text{ g/cm}^3 = 630.4 \text{ g} = 0.630 \text{ kg}$$

$$\text{รวมกล่องชั้นนอกมีน้ำหนัก} = 20.166 \text{ kg} + 2.093 \text{ kg} + 0.630 \text{ kg} = 22.889 \text{ kg}$$

สรุป กล่องชั้นนอกมีน้ำหนักรวม 22.889 กิโลกรัม

### 3.4.2.2 คำนวณการโก่งตัวของคาน



25 x 25 mm

รูปที่ 3.15 ขนาดของคาน

$$I = \left( \frac{1}{12} \times 25 \times 25^3 \right) - \left( \frac{1}{12} \times 21 \times 21^3 \right)$$

$$I = 16345.33 \text{ cm}^4 = 0.16345 \text{ cm}^4$$

$$\text{จากสมการอีลาสติกของคาน} \quad Ely = -\frac{Px^3}{12} + \frac{PL^2x}{16} \quad (3.2)$$

หา  $\delta$  โดยแทนค่า  $x = \frac{L}{2}$  ลงในสมการ (3.2)

$$E\delta = -\frac{P}{12} \left[ \frac{L}{2} \right]^3 + \frac{PL^2}{16} \left[ \frac{L}{2} \right]$$

$$E\delta = -\frac{PL^3}{96} + \frac{PL^3}{32} = \frac{-PL^3 + 3PL^3}{96} = \frac{2PL^3}{96} = \frac{PL^3}{48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>65</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{(11.4445 \times 9.8 \text{ N})(353^3 \text{ mm}^3)}{48 \times (163.45 \text{ mm}^2) \times (200 \times 10^9 \text{ N/mm}^2)}$$

$$\delta = 3144.06 \times 10^{-6} \text{ mm} = 3.144 \text{ nm}$$

∴ คานเหล็กมีการโก่งตัวน้อยมากคือ 3.144 นาโนเมตร

### 3.4.3 การคำนวณแกนปากจับยึด

#### 3.4.3.1 คำนวณการรับแรงดึง

แกนปากยึดจับมีน้ำหนัก = 10.621 kg

กล่องชั้นนอกมีน้ำหนัก = 22.889 kg

ปากยึดจับมีน้ำหนัก = 10 kg

รวมแรงที่แกนปากยึดจับรับน้ำหนัก = 426.389 N

1) ความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับหน้าตัดกลม

$$\tau = \frac{4V}{3A} = \frac{4(F/2)}{3\pi 8.5^2} = \frac{2(426.389)}{3\pi 8.5^2} = 1.253 \text{ N/mm}^2$$

2) การรับแรงเฉือนที่เกิดจากขนาดสลัก

$$\tau_d = \frac{3V}{3A} = \frac{16F}{3\pi d^2} = \frac{16(426.389)}{3\pi 17^2} = 2.506 \text{ N/mm}^2$$

จากสมการ

$$\tau_d = \frac{0.6\tau_y}{N_y}$$

$$\tau_y = \frac{\tau_d N_y}{0.6} = \frac{2.506 \times 1.5}{0.6} = 6.265 \text{ N/mm}^2$$

3) การอัดกันระหว่างส่วนของสลักกับส่วนของก้านดึง (ส่วนบน)

$$\sigma_{cd} = \frac{F}{A} = \frac{F}{dl} = \frac{426.389}{17 \times 40} = 0.627 \text{ N/mm}^2$$

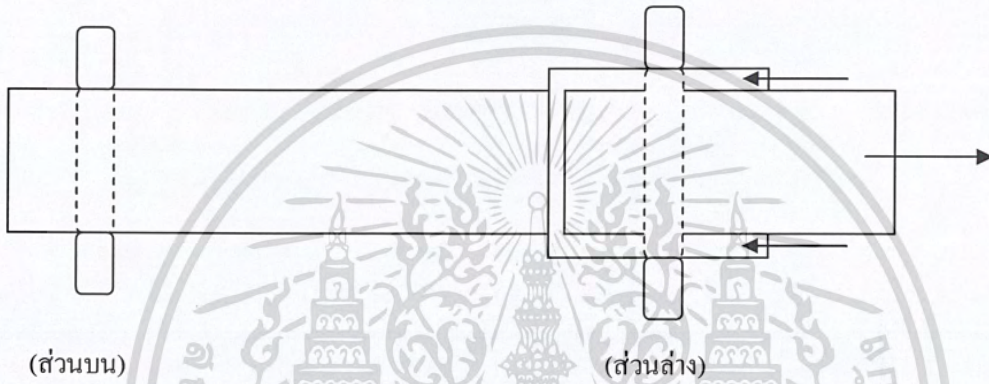
4) การอัดกันระหว่างส่วนของสลักกับส่วนของก้านดึง (ส่วนล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>66</sup>จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{cd} = \frac{F}{A} = \frac{F}{dl} = \frac{426.389}{17 \times (80 - 50)} = 0.863 \text{ N/mm}^2$$

Stainless steel type 304 มีค่า  $\sigma_c = 620 \text{ N/mm}^2$

∴ แสดงว่าแกนปากยึดจับสามารถรับแรงดึงได้



รูปที่ 3.16 แกนปากยึดจับพร้อมสลัก

### 3.4.4 การคำนวณพลังงานความร้อน

สมมติว่า อากาศในกล่องปรับอุณหภูมิมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึง  
แหล่งกำเนิดความร้อน (heater) วัตต์อุณหภูมิได้  $166 \text{ }^\circ\text{C}$   
จุดกึ่งกลางของอะคริลิก วัตต์อุณหภูมิได้  $99.4 \text{ }^\circ\text{C}$

จากสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \tag{3.3}$$

- เมื่อ  $k$  = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)
- $\rho$  = ค่าความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )
- $C_p$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

$$\alpha = \frac{0.20}{1400 \times 1465} \text{ m}^2/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 67 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = 9.751 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

จากสมการ 
$$\ln \frac{(T_c - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = - \left( \frac{hL}{k} \right) \left( \frac{\alpha t}{L^2} \right) \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $T_c$  = อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของอะคริลิก (K)  
 $T_\infty$  = อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอะคริลิก (K)  
 $T_i$  = อุณหภูมิที่แหล่งกำเนิดความร้อน (K)  
 $h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )  
 $L$  = ครึ่งหนึ่งของความหนาของอะคริลิก (m)  
 $t$  = เวลา (s)

จากสมการที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln \frac{(T_c - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} &= - \left( \frac{hL}{k} \right) \left( \frac{\alpha t}{L^2} \right) \\ t &= \ln \frac{(T_c - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} \times \left( - \frac{k}{hL} \right) \left( \frac{L^2}{\alpha} \right) \\ t &= \ln \frac{(99.4 - 25)}{(166 - 25)} \times \left( - \frac{0.2}{10} \right) \left( \frac{0.002}{9.751 \times 10^{-8}} \right) \\ t &= \frac{(-0.639)(-4 \times 10^{-5})}{9.751 \times 10^{-8}} \\ t &= 262 \text{ วินาที} \end{aligned}$$

∴ เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนกับอะคริลิกจนมีอุณหภูมิที่กึ่งกลาง 99.4 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4.37 นาที

### 3.4.5 คำนวณการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

จากสมการ 
$$\delta = L\alpha\Delta T \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอะคริลิก  $81 \times 10^{-6}$  ของโลหะ  $13 \times 10^{-6}$  ( $\text{m}/\text{m}/\text{K}$ )  
 $\Delta T$  = คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (K)

อะคริลิกที่อุณหภูมิ 50 °C

$$\delta = 0.165 \times 81 \times 10^{-6} \times (323 - 298)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา <sup>68</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = 334.125 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\delta = 0.334 \text{ mm}$$

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าอะคริลิกมีระยะการยืดตัว 0.334 มิลลิเมตร  
อะคริลิกที่อุณหภูมิ 75°C

$$\delta = 1.65 \times 6.8 \times 10^{-5} \times (75 - 25)$$

$$\delta = 0.165 \times 81 \times 10^{-6} \times (348 - 298)$$

$$\delta = 668.25 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\delta = 0.668 \text{ mm}$$

ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส พบว่าอะคริลิกมีระยะการยืดตัว 0.668 มิลลิเมตร  
โลหะที่อุณหภูมิ 50 °C

$$\delta = 0.150 \times 13 \times 10^{-6} \times (323 - 298)$$

$$\delta = 48.75 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\delta = 0.048 \text{ mm}$$

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าโลหะมีระยะการยืดตัว 0.048 มิลลิเมตร

โลหะที่อุณหภูมิ 100 °C

$$\delta = 0.150 \times 13 \times 10^{-6} \times (373 - 298)$$

$$\delta = 146.25 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\delta = 0.146 \text{ mm}$$

ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าโลหะมีระยะการยืดตัว 0.146 มิลลิเมตร

### 3.4.6 คำนวณความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ

จากสมการ

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

(3.6)

เมื่อ  $\sigma$  = ค่าความเค้นอัดที่เกิดจากอุณหภูมิเปลี่ยน ( $\text{N/mm}^2$ )

E คือค่ายัง โมดูลัส ( $\text{N/m}^2$ )

อะคริลิกที่อุณหภูมิ 50 °C

$$\sigma = 3.2 \times 10^9 \times 81 \times 10^{-6} \times (323 - 298)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา<sup>69</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = 6480 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 6.48 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าอะคริลิกมีความเค้น 6.48 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

อะคริลิกที่อุณหภูมิ 75 °C

$$\sigma = 3.2 \times 10^5 \times 81 \times 10^{-6} \times (348 - 298)$$

$$\sigma = 12960 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 1.296 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส พบว่าอะคริลิกมีความเค้น 12.96 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

โลหะที่อุณหภูมิ 50 °C

$$\sigma = 190 \times 10^3 \times 13 \times 10^{-6} \times (323 - 298)$$

$$\sigma = 61750 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 6.175 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าโลหะมีความเค้น 61.75 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

โลหะที่อุณหภูมิ 100 °C

$$\sigma = 190 \times 10^3 \times 13 \times 10^{-6} \times (348 - 298)$$

$$\sigma = 185250 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 1.853 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าโลหะมีความเค้น 185.3 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

### 3.5 ส่วนประกอบของชุดปรับอุณหภูมิ

#### 3.5.1 ก่อของชุดปรับอุณหภูมิ

##### 3.5.1.1 ตัวก่อก่อของชุดปรับอุณหภูมิ

ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI 304 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นเหล็กเป็นส่วนประกอบของก่อก่อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ชั้นใน

- แผ่นเหล็กด้านล่าง จำนวน 4 ชั้น ขนาด 125 x 250 และ 161 x 322 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านข้าง 2 ข้าง จำนวน 8 ชั้น ขนาด 125 x 330 และ 161 x 366 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านหน้าและหลัง จำนวน 4 ชั้น ขนาด 250 x 330 และ 322 x 366 ตารางมิลลิเมตร

### ชั้นนอก

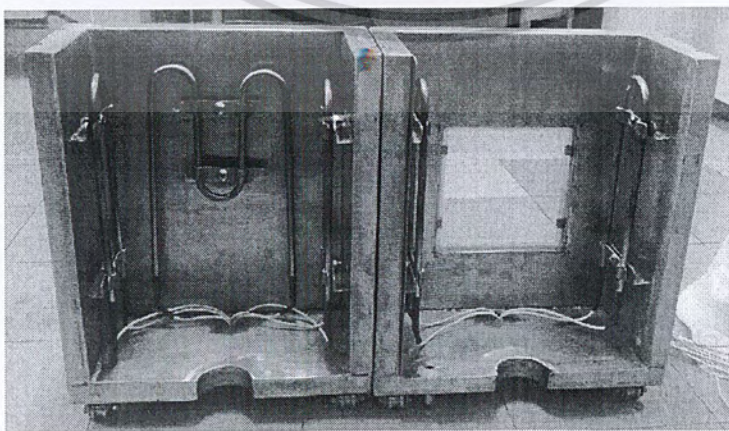
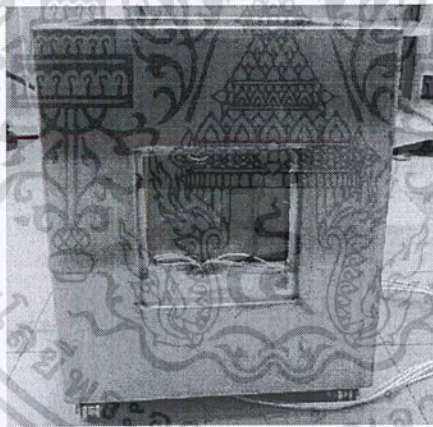
- แผ่นเหล็กด้านบน จำนวน 4 ชั้น ขนาด 171 x 342 และ 207 x 414 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านข้าง 2 ข้าง จำนวน 8 ชั้น ขนาด 171 x 366 และ 207 x 402 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านหน้า และหลัง จำนวน 4 ชั้น ขนาด 342 x 366 และ 414 x 402 ตารางมิลลิเมตร

### 3.5.1.2 กระจกเทมเปอร์

ใช้กระจกเทมเปอร์จำนวน 2 แผ่น ติดบริเวณหน้ากล่องด้านนอกและด้านใน ขนาด 160 x 197 ตารางมิลลิเมตร

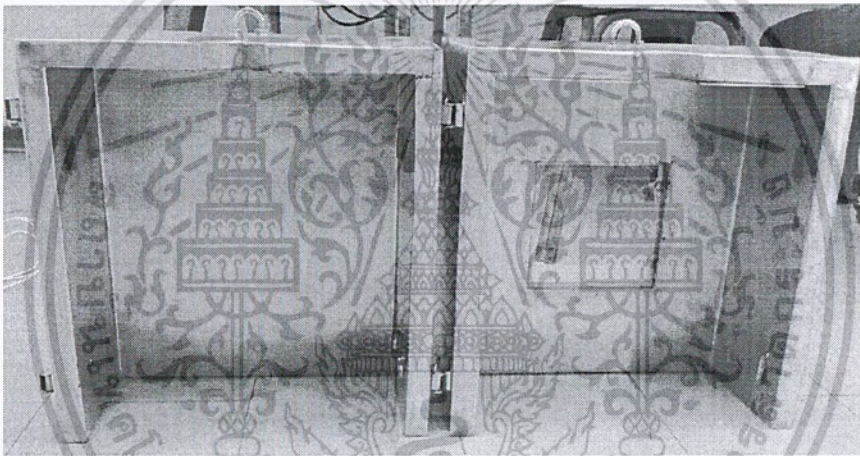
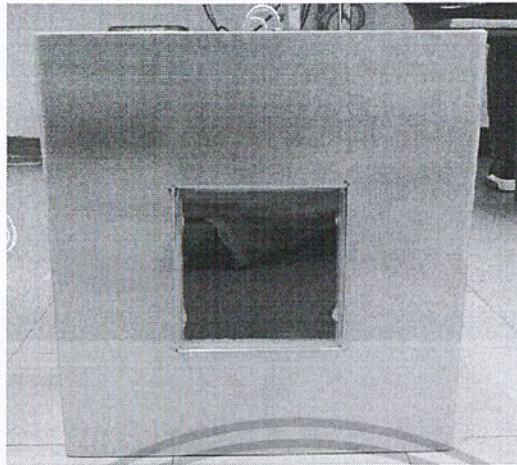
### 3.5.1.3 ล้อ

ล้อเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.2 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 25.5 มิลลิเมตร สามารถรับน้ำหนักได้ 33 กิโลกรัม จำนวน 8 ล้อ  
กล่องปรับอุณหภูมิชั้นใน ชั้นนอก และรวมชั้นในกับชั้นนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.17, 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ



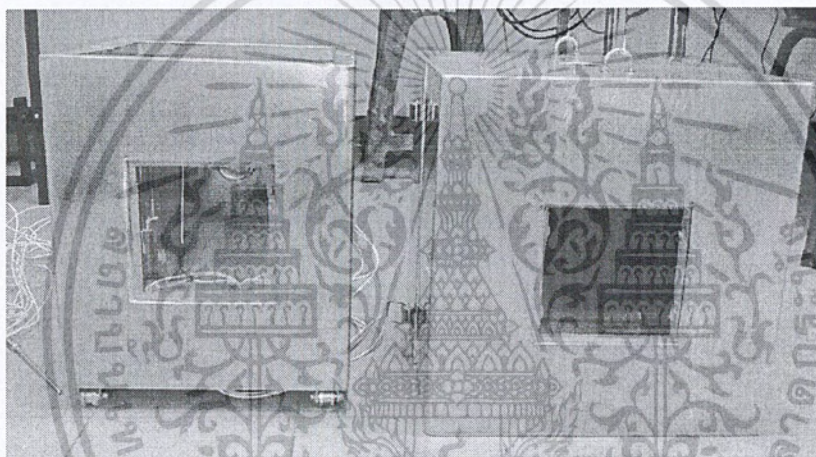
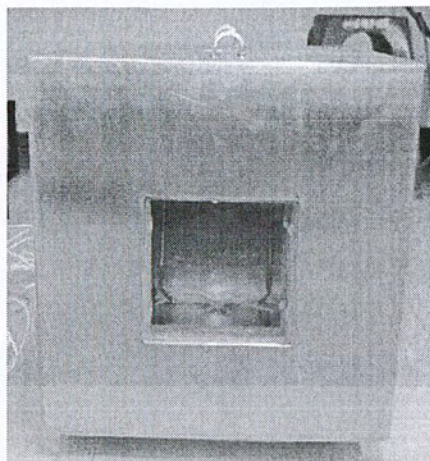
รูปที่ 3.17 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิชั้นนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิชั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา <sup>72</sup>และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



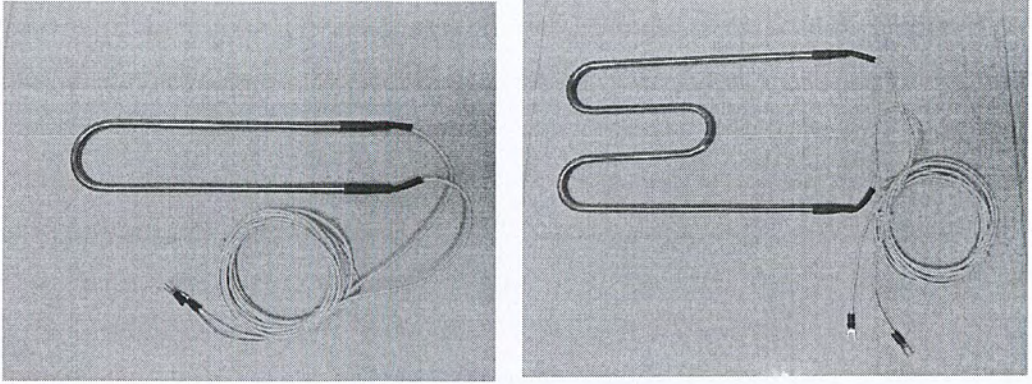
รูปที่ 3.19 ตัวกล่องปรับอุณหภูมิ

### 3.5.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิและแสดงผล

#### 3.5.2.1 ชุดให้ความร้อน

ฮีตเตอร์แท่งรูปตัวยู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 250 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว

ฮีตเตอร์แท่งรูปตัวดัดเบิ้ลยู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สูง 250 มิลลิเมตร ความกว้าง 50 มิลลิเมตร, 300 วัตต์ สายไฟยาว 2 เมตร จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ฮีตเตอร์แท่งรูปตัวยู และตัวค้ำเบ็ลยู

### 3.5.2.2 ชุดแสดงผล

ใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตรวจวัดอุณหภูมิในกล่องและแสดงผลด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Control temperature)

ใช้เทอร์โมคัปเปิล ความยาว 15 เซนติเมตร สายยาว 1 เมตร ติดภายในกล่องบริเวณใกล้กับหัวจับ ดังแสดงใน

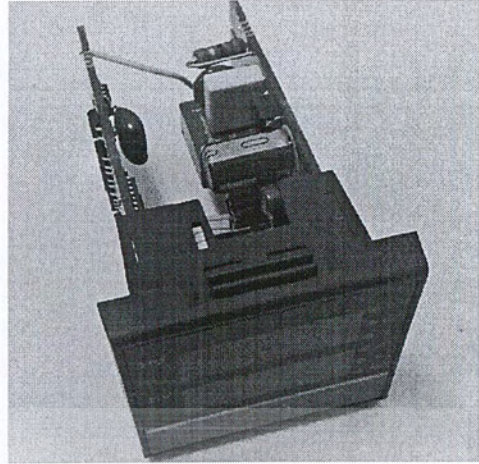
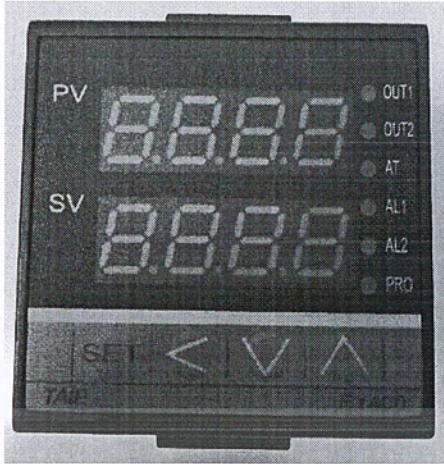
รูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เทอร์โมคัปเปิล

### 3.5.2.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Control temperature)

ใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิ รุ่น FY 400 ขนาด 48 x 48 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.22 ทำงานแบบ Output relay alarm ต่อกับ เทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผลของอุณหภูมิภายในกล่อง



รูปที่ 3.22 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

#### 3.5.2.4 ชุดควบคุมวงจรไฟฟ้า

ใช้สวิตช์ปิด-เปิด (Breaker) เป็นตัวควบคุมการปิด-เปิด ของวงจรไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องปรับอากาศสามารถทำงานได้ ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้า 240 โวลต์ 10 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สวิตช์ปิด-เปิด

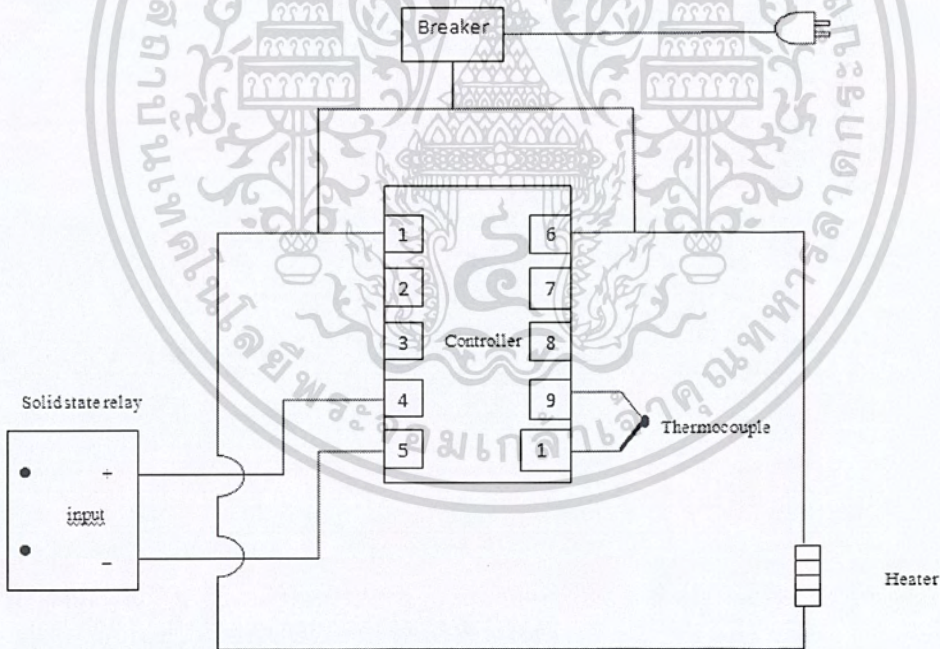
ใช้ไซคลิกสแตตรีเลย์ SD3NC-240B กระแสเข้า คือ กระแสตรง 3-32 โวลต์ กระแสออก คือ กระแสสลับ 30-240 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา <sup>75</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 โซลิตสเตตรีเลย์

วงจรไฟฟ้าสามารถต่อได้โดยมีลักษณะดังรูป 3.25



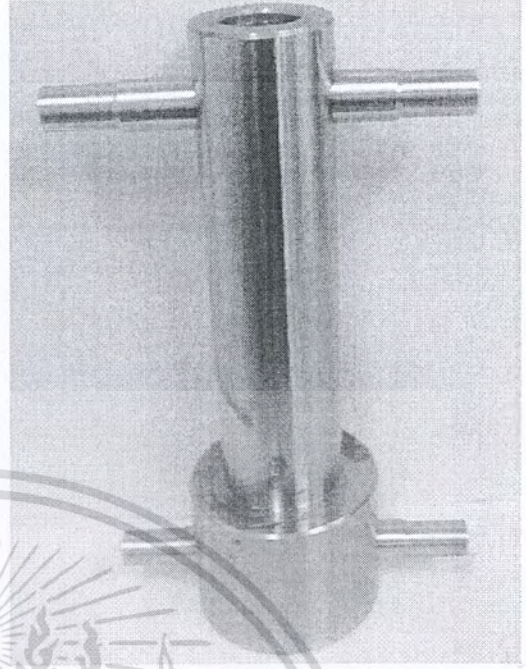
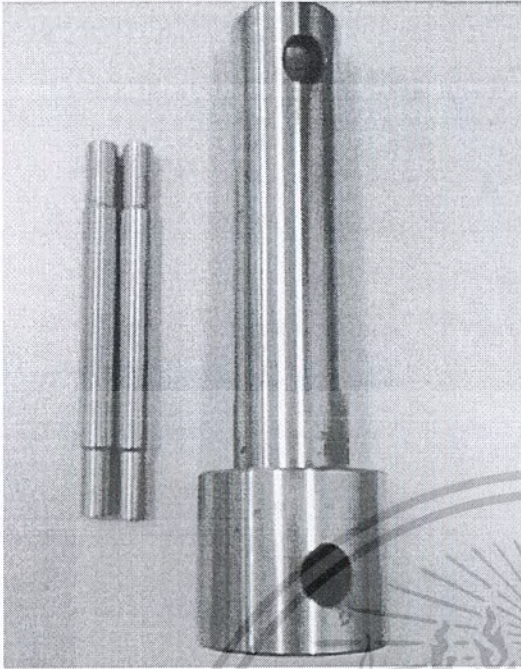
รูปที่ 3.25 วงจรไฟฟ้า

### 3.5.3 ชุดแขนปากยึดจับ

แขนปากยึดจับทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI 304 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ยาว 170 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

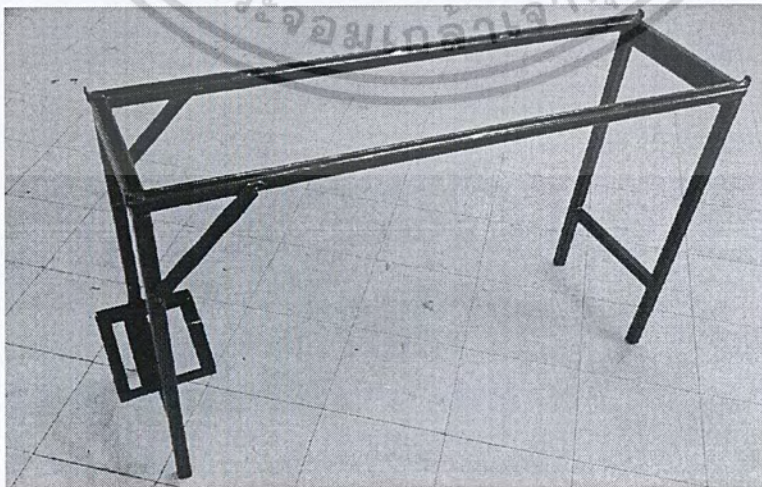


รูปที่ 3.26 ชุดแขนปากยึดจับ

### 3.5.4 รางเลื่อน

ตัวรางเลื่อนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) AISI 304 ความหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.27 โดยใช้เหล็กเป็นส่วนประกอบดังนี้

- เหล็กแกนบนรางเลื่อน จำนวน 2 ชิ้น ความยาว 900 มิลลิเมตร
- เหล็กแกนประกอบรางเลื่อน จำนวน 2 ชิ้น ความยาว 200 มิลลิเมตร
- เหล็กแกนขาตั้ง จำนวน 4 ชิ้น ความยาว 620 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.27 รางเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 77 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.5 ฉนวน

เลือกฉนวนใยหิน Rockwool ซึ่งเป็นฉนวนใยหิน Fibertex-650 หนา 25 มิลลิเมตร มีความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งทนอุณหภูมิได้ถึง 650 องศาเซลเซียส ติดกับส่วนประกอบต่างๆ ของกล่องดังนี้

ส่วนประกอบของกล่องชั้นใน

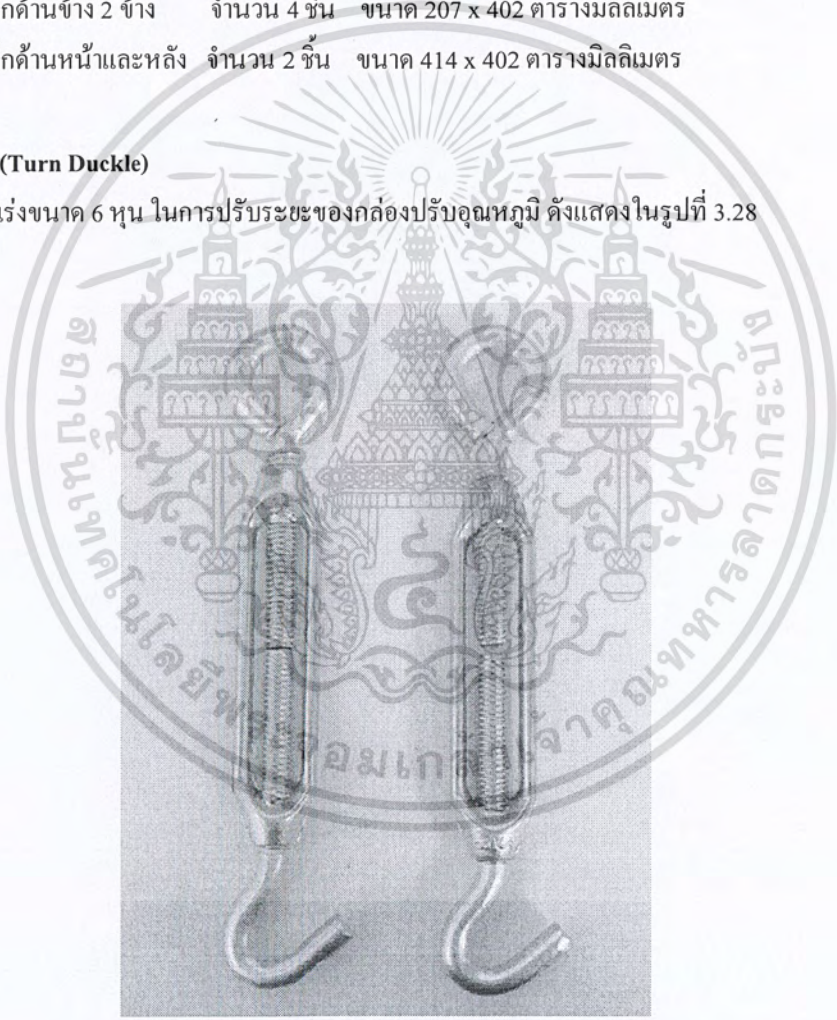
- แผ่นเหล็กด้านล่าง จำนวน 1 ชั้น ขนาด 322 x 322 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านข้าง 2 ข้าง จำนวน 4 ชั้น ขนาด 161 x 366 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านหน้าและหลัง จำนวน 2 ชั้น ขนาด 322 x 366 ตารางมิลลิเมตร

ส่วนประกอบของกล่องชั้นนอก

- แผ่นเหล็กด้านบน จำนวน 1 ชั้น ขนาด 207 x 414 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านข้าง 2 ข้าง จำนวน 4 ชั้น ขนาด 207 x 402 ตารางมิลลิเมตร
- แผ่นเหล็กด้านหน้าและหลัง จำนวน 2 ชั้น ขนาด 414 x 402 ตารางมิลลิเมตร

### 3.5.6 ชุดเกลียวเร่ง (Turn Duckle)

ใช้เกลียวเร่งขนาด 6 หุน ในการปรับระยะของกล่องปรับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 เกลียวเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 78 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.6 ชุดคานยก

ใช้สำหรับยกเครื่องทดสอบในส่วนที่เป็นกล่องชั้นนอก โดยประกอบติดกับเครื่องทดสอบแรงดึงบริเวณกรอบ  
เขต ดังแสดงในรูปที่ 3.29



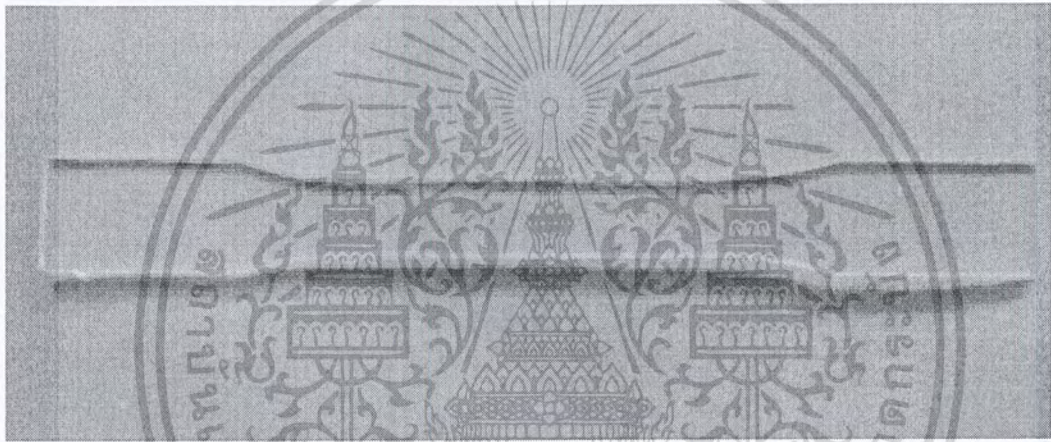
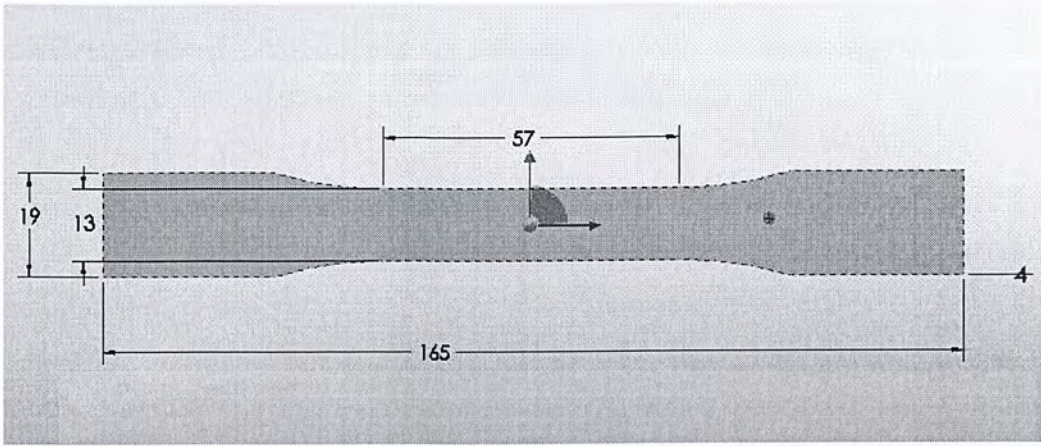
รูปที่ 3.29 ชุดคานยก

## 3.6 วิธีการดำเนินการทดลอง

### 3.6.1 ขนาดของชิ้นทดสอบ

#### 3.6.1.1 ชิ้นทดสอบพลาสติก

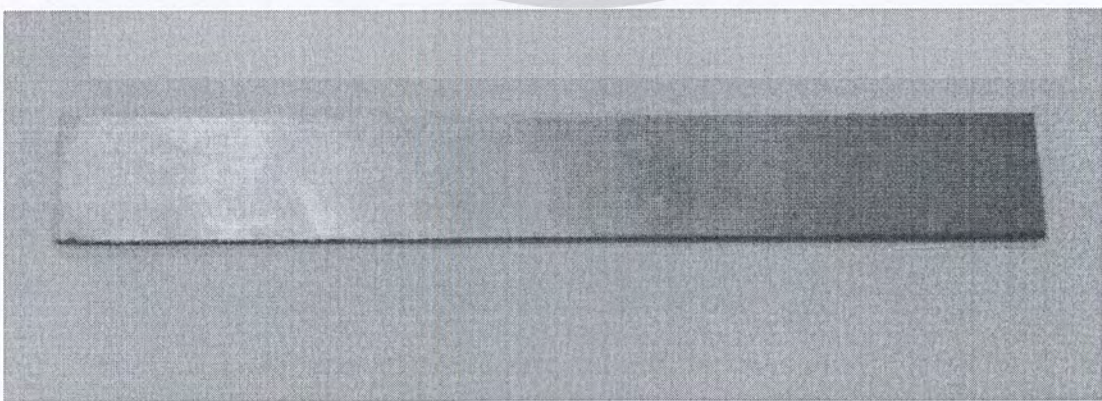
ใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-08 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบชิ้นงานพลาสติก โดยเลือก Type I  
ในการทดสอบ อะคริลิก หนา 4 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของ Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อ  
นาที มีขนาดของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 รูปร่างและขนาดของชั้นทดสอบอะคริลิก

### 3.6.1.2 ชั้นทดสอบโลหะ

ใช้ชั้นทดสอบโลหะมีขนาดและรูปร่าง ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 รูปร่างและขนาดของชั้นทดสอบแผ่นโลหะ

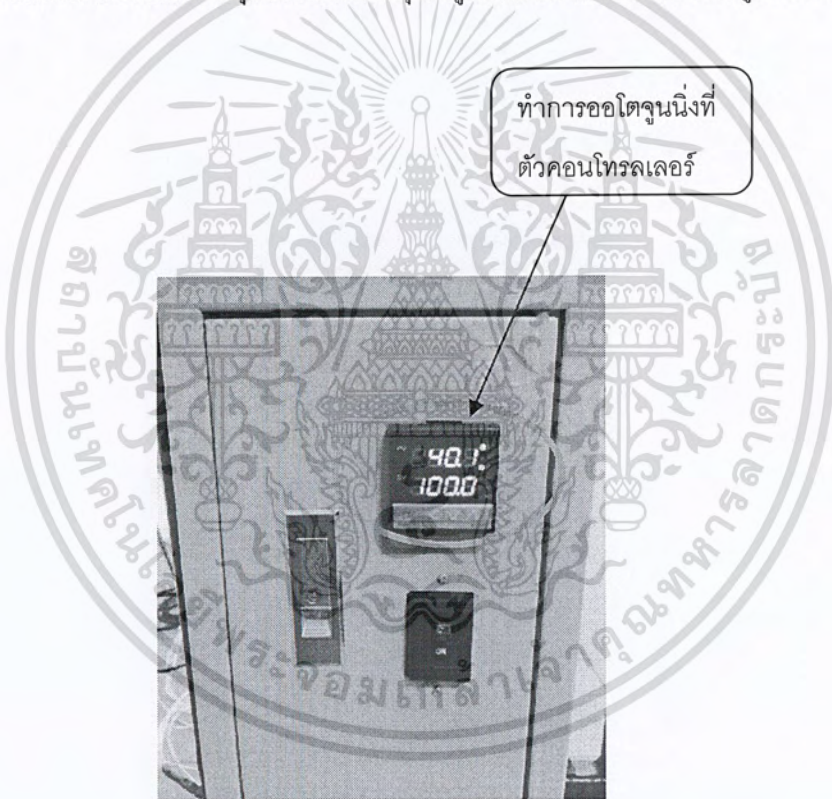
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 ออกแบบการทดสอบ

ทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้ชุดปรับอุณหภูมิร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Testing Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X, 100 กิโลนิวตัน ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ดังนี้

- 1) ทำการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบพลาสติกและโลหะเพื่อวัดค่าความเค้น-เครียด
- 2) ทำการทดสอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยยังไม่ต้องใช้ชุดปรับอุณหภูมิ
- 3) ทำการทดสอบขึ้นทดสอบที่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้งขึ้นทดสอบพลาสติกและโลหะ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้ 50, 100 และ 150 องศาเซลเซียส สำหรับขึ้นทดสอบโลหะ 30, 50 และ 65 องศาเซลเซียส สำหรับขึ้นทดสอบอะคริลิก การทดสอบโดยใช้ชุดปรับอุณหภูมิมีวิธีการดังต่อไปนี้

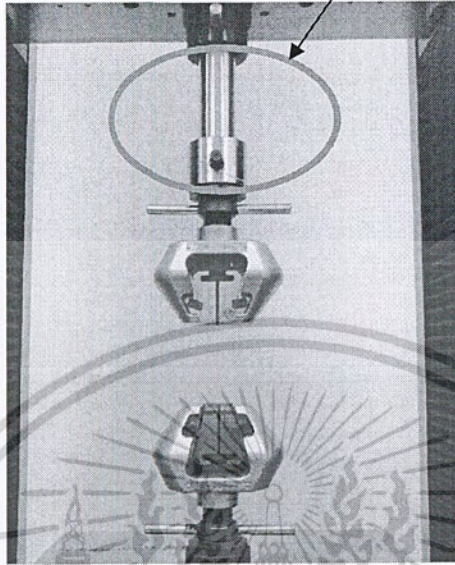
- ทำการออโตจูนนิ่งชุดปรับอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบมากที่สุด โดยค่าอุณหภูมิที่ทำการออโตจูนนิ่งสามารถใช้ทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ  $\pm 50$  องศาเซลเซียส การทำออโตจูนนิ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้ กดเลือกฟังก์ชัน Auto ที่ตัวคอนโทรลเลอร์ กดปุ่ม Set แล้วตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การทำออโตจูนนิ่ง

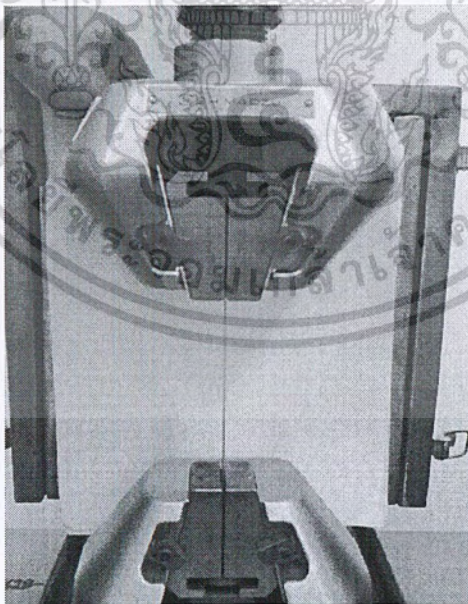
- ถอดหัวจับของเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อใส่ แกนปากจับยึด แล้วจึงใส่ขึ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.33

แกนปากจับยึด



รูปที่ 3.33 การประกอบแกนปากยึดจับ

- การจับชิ้นทดสอบหลังจากมีการเพิ่มแกนปากยึดจับ ดังแสดงในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 การจับชิ้นทดสอบ

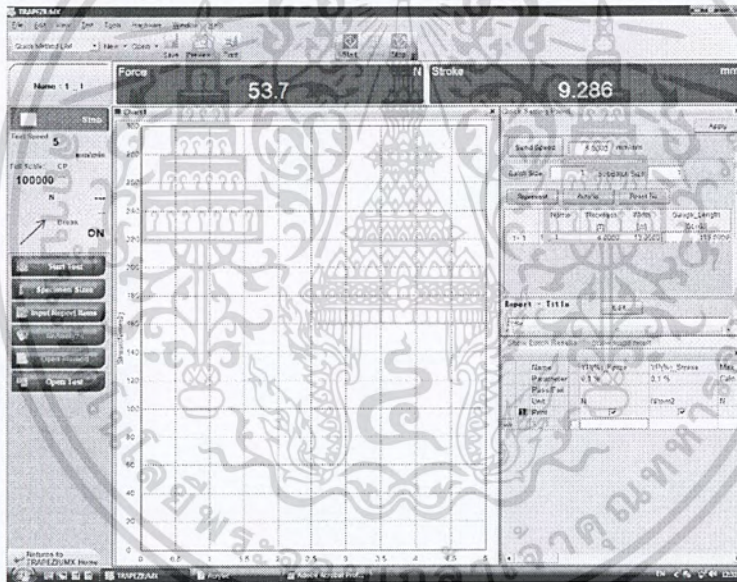
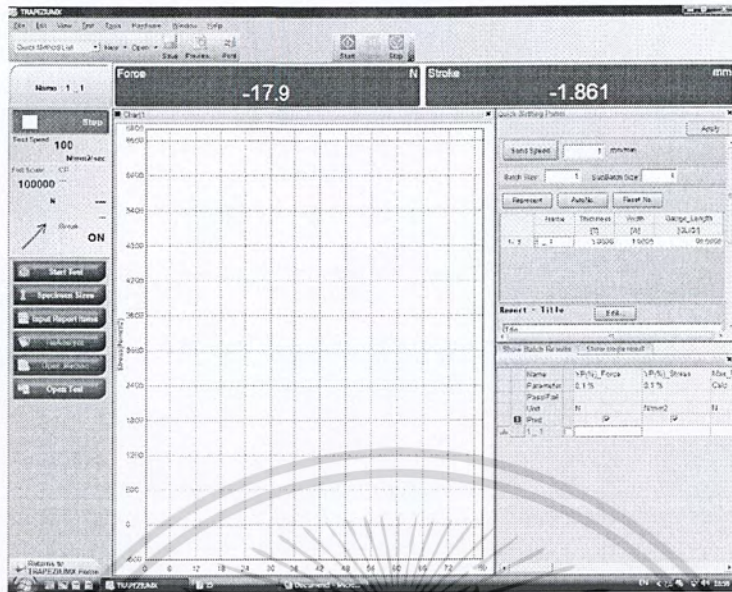
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประกอบเครื่องปรับอุณหภูมิเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ประกอบเครื่องปรับอุณหภูมิเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง

- ดำเนินการตั้งค่าทดสอบในส่วนของโปรแกรมการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 หน้าต่างของโปรแกรม

- ตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ โดย เปิดเครื่องปรับอุณหภูมิ และตั้งค่าเทอร์มอร์คัปเปิล โดย กดปุ่ม Set 2 ครั้ง แล้วปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการ
- เริ่มการทดสอบ
- 4) บันทึกผลการทดลองตามตาราง ดังแสดงในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา<sup>84</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 บันทึกผลการทดลอง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าแรงที่เหลือค้าง (นิวตัน)	ค่าแรงดึงสูงสุด (นิวตัน)	ค่าแรงดึงสูงสุด $\pm$ ค่าแรงเหลือค้าง (นิวตัน)	ค่าความเค้น-ความเครียด (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
ขั้นตอนสอบ				
1				
2				
3				
4				
5				
เฉลี่ย				

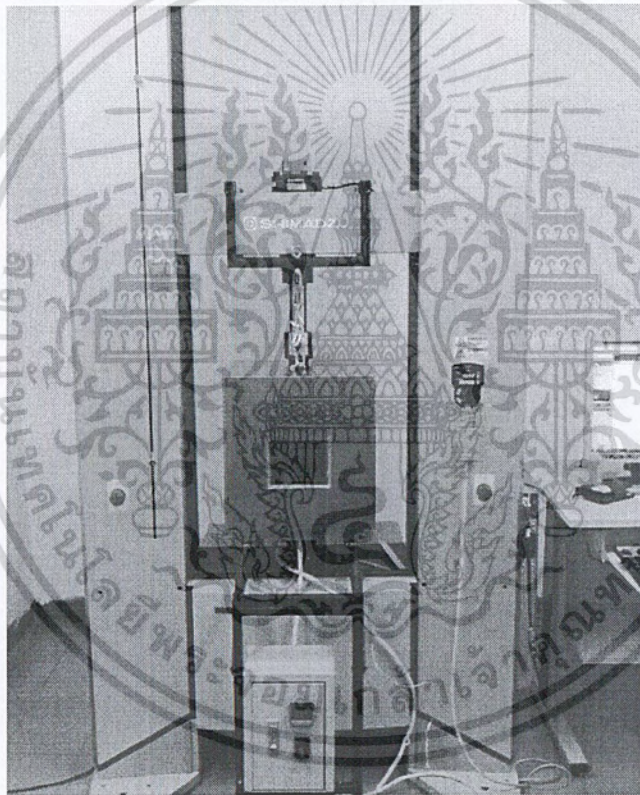


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา <sup>85</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

เมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของชุดปรับอุณหภูมิเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงแล้ว จะได้เครื่องทดสอบแรงดึงที่สามารถปรับอุณหภูมิชิ้นงานในการทดสอบได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่องปรับอุณหภูมิเมื่อประกอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง

#### 4.1 คุณสมบัติของชุดปรับอุณหภูมิ

- ใช้ทดสอบแรงดึงร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X, 100 กิโลนิวตัน น้ำหนัก 800 กิโลกรัม
- สามารถทดสอบกับชิ้นทดสอบที่เป็น โลหะ และพลาสติกได้ตามมาตรฐานของชิ้นทดสอบ
- สามารถทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถปรับระยะกล่องขึ้นนอกได้โดยการปรับระยะของเกลียวเร่ง
- ตัวเครื่องเลื่อนขึ้นสูงสุดได้ 330 มิลลิเมตร
- น้ำหนักรวม 41.312 กิโลกรัม

## 4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความเค้น-เครียดของวัสดุ โดยใช้เครื่องปรับอุณหภูมิ นั้นแบ่งออกเป็น 2 กรณี โดยทำการทดสอบขึ้นทดสอบที่เป็นพลาสติก และโลหะตามมาตรฐานของขึ้นทดสอบนั้นๆ ดังนี้

ขึ้นทดสอบพลาสติกใช้ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-08 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบชิ้นงานพลาสติก โดยเลือก Type I ในการทดสอบ อะคริลิก หนา 4 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของ Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

ขึ้นทดสอบโลหะใช้ขึ้นทดสอบ 19 x 148 x 1 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานของ Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

ทำการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยทดสอบขึ้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละระดับอุณหภูมิ และขึ้นทดสอบโลหะที่อุณหภูมิ 25 50 และ 100 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละระดับอุณหภูมิ กราฟที่ได้จะเป็นกราฟความเค้น-เครียดของวัสดุ เพื่อเปรียบเทียบค่าผิดพลาดกับมาตรฐานจากการทำความร้อนของชุดปรับอุณหภูมิ

### 4.2.1 ทำการทดสอบชิ้นงานพลาสติก

ทดสอบขึ้นทดสอบอะคริลิก หนา 4 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-08 Type I คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของขึ้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 25 50 และ 75 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของขึ้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลือค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด ±	ค่าความเค้น-ความเครียด
ขึ้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลือค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	80.37	3229.41	3149.04	60.56
2	17.44	2974.63	2957.19	56.87
3	-97.02	2619.27	2716.27	52.23
4	67.75	3108.44	3040.69	58.47
5	-77.23	2747.57	2824.80	54.32
			<b>เฉลี่ย</b>	<b>56.49</b>

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลือค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด ±	ค่าความเค้น-ความเครียด
ชั้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลือค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	-102.3	1428.68	1530.98	29.44
2	-109.50	1540.22	1649.72	31.73
3	-4.32	1688.07	1692.39	32.55
4	-103.44	1170.72	1274.16	24.50
5	-98.50	1570.24	1668.74	32.09
			เฉลี่ย	30.06

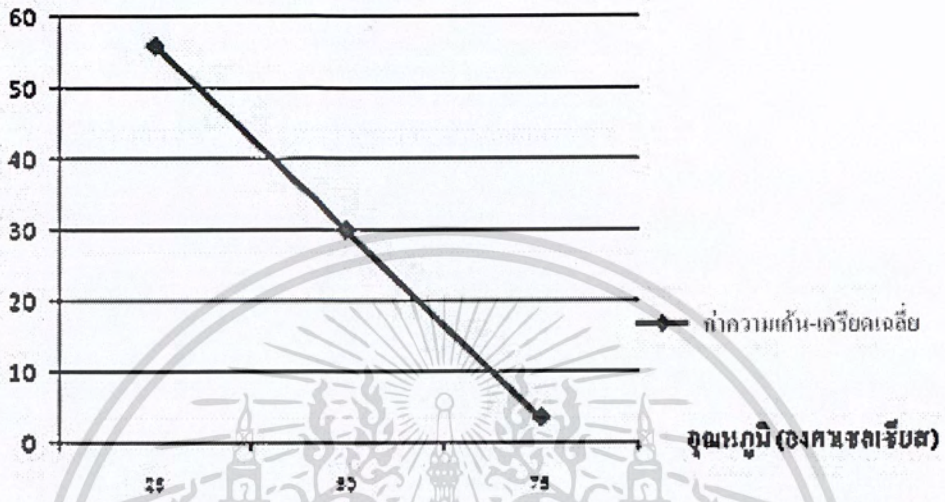
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชั้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลือค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด ±	ค่าความเค้น-ความเครียด
ชั้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลือค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	-20.32	152.667	172.987	3.33
2	3.10	184.402	181.302	3.49
3	4.20	187.243	183.043	3.52
4	3.50	188.324	184.824	3.55
5	-5.70	187.547	193.247	3.72
			เฉลี่ย	3.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบแรงดึงค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบอะคริลิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถเขียนกราฟดูแนวโน้มของค่าความเค้น-ความเครียด ได้ดังรูปที่ 4.2

ค่าความเค้น-เครียดเฉลี่ย (นิวตัน / ตารางมิลลิเมตร)



รูปที่ 4.2 แนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความเค้น-ความเครียด ในการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบอะคริลิก

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้น-ความเครียดของชิ้นทดสอบมีค่าลดลง โดยค่าความเค้นมีค่าลดลง แต่เปอร์เซ็นต์ของความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการดึงชิ้นทดสอบนานขึ้น

#### 4.2.2 ทำการทดสอบชิ้นงานโลหะ

ทำการทดสอบชิ้นทดสอบโลหะหนา 1 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10 มิลลิเมตร ต่อนาที ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบโลหะที่อุณหภูมิ 25 50 และ 100 องศาเซลเซียส แสดง ได้ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลื่อค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด ±	ค่าความเค้น-ความเครียด
ชิ้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลื่อค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	-65.50	4585.00	4650.50	290.66
2	0.20	4659.56	4659.36	291.21
3	-137.78	4449.54	4587.32	286.71
4	-156.81	4520.51	4677.32	292.33
5	51.27	4938.13	4886.86	305.43
			เฉลี่ย	293.27

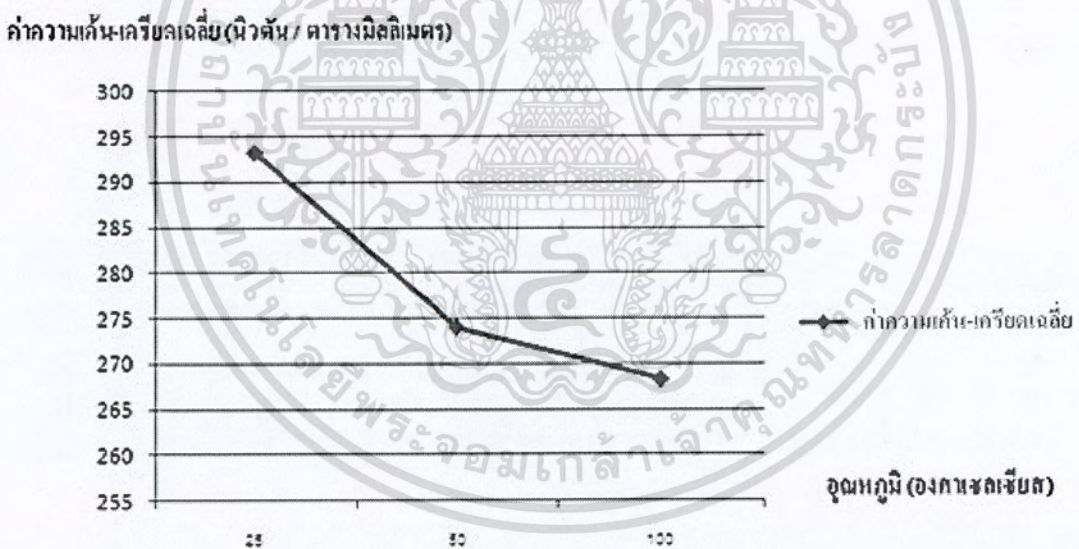
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลื่อค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด ±	ค่าความเค้น-ความเครียด
ชิ้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลื่อค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	96.40	4517.78	4421.38	276.34
2	-93.33	4265.44	4358.77	272.42
3	-4.00	4449.54	4453.54	278.35
4	-97.6	4197.34	4294.94	268.43
5	-88.57	4482.78	4394.21	274.64
			เฉลี่ย	274.04

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแรงดึง ค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	ค่าแรงที่เหลื่อค้าง	ค่าแรงดึงสูงสุด	ค่าแรงดึงสูงสุด $\pm$	ค่าความเค้น-ความเครียด
ชิ้นทดสอบ	(นิวตัน)	(นิวตัน)	ค่าแรงเหลื่อค้าง (นิวตัน)	(นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)
1	-1.20	4121.80	4122.00	257.625
2	80.77	4636.18	4555.41	284.71
3	98.50	4372.49	4273.99	267.12
4	-48.2	4196.55	4244.75	265.30
5	25.63	4240.50	4266.13	266.63
			เฉลี่ย	268.28

จากผลการทดสอบแรงดึงค่าความเค้น-ความเครียด ของชิ้นทดสอบ โลหะที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถเขียนกราฟ แนวโน้มของค่าความเค้น-ความเครียด ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความเค้น-ความเครียด ในการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ โลหะ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเค้น-ความเครียดมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

## บทที่ 5

# สรุปและอภิปรายผลการดำเนินงาน

### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

ในการสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานได้ดังนี้

#### 5.1.1 การสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

การสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิเป็นการปฏิบัติการสร้างเครื่อง ซึ่งได้ทำการศึกษาข้อมูลในด้านต่าง ๆ ของการดำเนินงานสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิเพื่อให้สามารถใช้งานกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X ที่มีอยู่ที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการได้ ทำการออกแบบและแก้ไขแบบของเครื่องปรับอุณหภูมิ จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ตามคุณสมบัติที่ต้องการและได้ออกแบบไว้เบื้องต้น ดำเนินการสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิและแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่อง ออกแบบการทดสอบ โดยศึกษาว่าเครื่องสามารถให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบอย่างมีประสิทธิภาพ ทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องปรับอุณหภูมิให้ความร้อนแก่ชิ้นงานการทดสอบสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบชิ้นงานนั้นสามารถทำได้ตั้งแต่ 25-150 องศาเซลเซียส โดยใช้ชิ้นทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638-08 และชิ้นทดสอบโลหะ บันทึกผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง โดยดูจากค่าความเค้น-เครียด เทียบกับมาตรฐาน ASTM D638-08 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

#### 5.1.2 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบชิ้นงานพลาสติกด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความเค้น-ความเครียดมีค่าลดลง โดยความเครียดมีค่าลดลง เปรียบเช่นเดียวกับค่าเพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นทดสอบโลหะค่าความเค้น-ความเครียดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยเครื่องปรับอุณหภูมิใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที

#### 5.1.3 การอภิปรายผลการทดสอบ

จากการทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องปรับอุณหภูมิในการทดสอบ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าความเค้น-ความเครียด ในการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบอะคริลิก ส่วนชิ้นทดสอบ โลหะนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบไม่ส่งผลต่อการทดสอบแรงดึงมากนัก เมื่อนำผลการทดสอบของชิ้นทดสอบอะคริลิกมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบมาตรฐาน ASTM D638-08 เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเค้น-ความเครียดของชิ้นทดสอบที่ขาดบริเวณตรงกลางมีค่าความผิดพลาด 6.4 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าตัวเครื่องปรับอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง ที่อุณหภูมิ 50 และ 100 องศาเซลเซียส ของชิ้นทดสอบที่ขาดบริเวณตรงกลางมีค่าความเอกสาร์เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาดประมาณ 30.46 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความร้อนมีการลอยตัวขึ้นสูงที่สุดทำให้ความร้อนในกล่องไม่ทั่วถึง ชั้นทดสอบจึงมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน ค่าผิดพลาดในการให้ความร้อนของเครื่องทดสอบแรงดึงมีค่า 5.09 เปอร์เซ็นต์ บริเวณด้านบนของกล่อง และ 0.6 เปอร์เซ็นต์บริเวณด้านล่างของกล่อง และเนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการขยายตัวของอะคริลิกอย่างมาก ในขณะที่มีการให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงาน อะคริลิกจะมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้แรงกดที่หัวจับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วจึงค่อยๆ ลดลงเพราะว่าอะคริลิกเริ่มมีการอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลต่อแรงกดที่หัวจับ ผลการทดสอบจึงผิดพลาด

เครื่องปรับอุณหภูมิใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งนานกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากเครื่องปรับอุณหภูมิมิมีการสูญเสียความร้อน

#### 5.1.4 สรุปผลการทดสอบ

- เครื่องปรับอุณหภูมิสามารถใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง
- ค่าผิดพลาด ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบมีค่า 5.09 เปอร์เซ็นต์
- เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ถึง 50 องศาเซลเซียส คือ 9 นาที และ 100 องศาเซลเซียส 15 นาที
- ให้ความร้อนได้ถึง 150 องศาเซลเซียส แต่ทำการทดสอบแค่ที่ 100 องศาเซลเซียส เนื่องผู้ทดสอบเกรงว่าความร้อนอาจทำให้ Load Cell ซึ่งมีราคาแพงเสียหาย
- เวลาในการติดตั้งเครื่องเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงพร้อมที่จะทดสอบชิ้นงาน ไม่เกิน 5 นาที

#### 5.2 การวิเคราะห์ปัญหาและแนวทางในการปรับปรุงในอนาคต

ในการศึกษาโครงการสามารถสรุปปัญหาและแนวทางการปรับปรุงได้ ดังนี้

- ข้อมูลของเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ไม่เพียงพอ
- เนื่องจากเครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Testing Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU เป็นเครื่องที่ผลิตที่ประเทศญี่ปุ่นจำหน่ายโดยการสั่งซื้อเพื่อนำเข้าในเมืองไทย ข้อมูลเกี่ยวกับตัวเครื่องและเครื่องปรับอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADZU มีน้อยและไม่เพียงพอ ทำให้ต้องไปศึกษาเครื่องต้นแบบของ SHIMADZU ที่โรงงาน Nitto Denko Material เป็นผู้ปรับอุณหภูมิรุ่น TCE-N300 TERMOSTATIC CHAMBER ของ SHIMADZU ใช้กับเครื่องทดสอบแรงดึง Load cell 500 N

- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) มีราคาแพง
- เครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Testing Machine) ยี่ห้อ SHIMADZU เป็นเครื่องที่มีราคาแพง การออกแบบจึงต้องทำอย่างระมัดระวัง ต้องศึกษาข้อมูลและออกแบบเป็นอย่างดี จึงเสียเวลาในการออกแบบเครื่องปรับอุณหภูมิมาก

- การขาดความรู้และประสบการณ์ในการออกแบบ

ในการจัดสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบแรงดึง(Universal Testing Machine) นั้นต้องมีการออกแบบที่ดีเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกันได้จริง และไม่ทำความเสียหายให้กับเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งผู้ทำการออกแบบขาดความรู้ความชำนาญในการออกแบบ ทำให้ต้องแก้ไขแบบหลายครั้ง สามารถแก้ไขปัญหาก็ได้โดยการขอคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญ หรืออาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา<sup>93</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การสร้างเครื่องไม่ตรงตามแบบ

เมื่อสร้างเครื่องปรับอุณหภูมิเสร็จแล้วมีบางส่วนที่ไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้ จึงต้องทำการแก้ไขซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองวัสดุและงบประมาณ สามารถแก้ไขโดยการอธิบายแบบให้ชัดเจนกับก่อนที่จะสร้างเครื่องและติดตามคุยงานกับผู้สร้างเครื่องเป็นระยะๆ

- ทักษะในการใช้เครื่องมือ

เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานมีทักษะในงานใช้เครื่องมือทำงาน ไม่มากนักจึงทำในผลงานที่ออกมาในส่วนที่ตัวเองไม่สวยงามเท่าที่ควรแต่ยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

- อุปกรณ์ในการปฏิบัติงานไม่เพียงพอหรือชำรุด

อุปกรณ์การทำงานในภาควิชายังชำรุด เช่น เครื่อง CNC ทำให้ไม่สามารถตัดชิ้นทดสอบได้ แก้ไขปัญหาโดยการดำเนินการตัดชิ้นทดสอบที่ภาควิชาแมคคาทรอนิกส์

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับปฏิบัติการมีไม่เพียงพอ ชำรุด หรือไม่มี ทำให้ใช้อุปกรณ์ในการทำงานผิดประเภทและวิธี ส่งผลให้งานล่าช้าและออกมาไม่เรียบร้อยแต่ยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

- การทำวงจรไฟฟ้า

เนื่องจากสมาชิกในกลุ่มไม่มีความรู้ในการต่อวงจรไฟฟ้า หากต่อผิดพลาดจะทำให้เครื่องเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน จึงแก้ปัญหาโดยการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญและอาจารย์ เพื่อขอคำแนะนำและตรวจสอบวงจรว่าถูกต้องหรือไม่

- การขาดทักษะในการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

เครื่องทดสอบแรงดึงมีราคาแพง และค่อนข้างใช้งานยาก ผู้ใช้งานจึงต้องใช้งานด้วยความระมัดระวัง แต่เนื่องจากผู้ใช้งานขาดทักษะในการใช้งาน แก้ไขปัญหาโดยการขอให้อาจารย์ที่มีความรู้ในการใช้งานสอนการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง

- การติดตั้งเครื่องและใช้งาน

เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องทดสอบแรงดึง ส่งผลให้การติดตั้งเครื่องใช้เวลานานพอสมควรก่อนที่จะถูกใช้งานในการทดสอบแรงดึง สำหรับฟังก์ชันการทำงานของเครื่องในส่วนของกระจายความร้อนภายในกล่องทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากในขณะที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน อากาศร้อนจะลอยตัวขึ้นด้านบนจึงทำให้ความร้อนภายในกล่องกระจายตัวไม่ทั่วถึง แก้ไขได้โดยการติดตั้งพัดลมเข้าไปเพื่อกระจายความร้อนภายในกล่อง และมีกรรไกรของความร้อนออกจากภายในกล่องบริเวณรอยต่อบางส่วนที่ไม่แนบสนิทจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้งานในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ถ้ามีความร้อนออกมาเยอะอาจส่งผลต่อผู้ใช้งาน และ Load cell

จากการวิเคราะห์ปัญหาของชุดปรับอุณหภูมิ พบปัญหาและแนวทางแก้ไข ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

ลำดับที่	ปัญหาที่พบ	แนวทางการแก้ไข
1	ในขณะที่มีการให้อุณหภูมิแก่ชิ้นงาน อะคริลิกจะมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้แรงกดที่หัวจับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วจึงค่อยๆลดลง เนื่องจากอะคริลิกมีการอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลต่อแรงกดที่หัวจับ	ใช้โปรแกรมในการควบคุมเพื่อลดแรงกดที่หัวจับในขณะที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบก่อนทำการทดสอบแรงดึง ซึ่งต้องอาศัย เทคโนโลยีขั้นสูง
2	จากการคำนวณเวลาที่ต้องใช้ในการให้ชิ้นทดสอบมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสคือ 4.37 นาที แต่เครื่องปรับอุณหภูมิที่สร้างขึ้นใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบก่อนใช้งานนาน คือประมาณ 15 นาที	คิดพัฒนาเพื่อกระจายความร้อนในกล่องให้ทั่วถึง และออกแบบกล่องปรับอุณหภูมิให้มีการรั่วไหลของความร้อนให้น้อยที่สุด
3	ในขณะที่ทำการให้ความร้อน ส่งผลให้แกนปากยึดจับร้อนเนื่องจากความร้อนลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน แกนปากยึดจับจึงนำความร้อน หากมีความร้อนมากอาจทำให้ Load Cell เสียหายได้	ควรทำการติดตั้งฉนวนกันระหว่างแกนปากยึดจับกับ Load Cell และคิดพัฒนาเพื่อกระจายอากาศภายในกล่อง
4	ความร้อนลอยตัวขึ้นข้างบน ทำให้ความร้อนภายในกล่องไม่ทั่วถึง และชิ้นทดสอบมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ	ควรคิดพัฒนาระบบบริเวณด้านบนของกล่อง เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวทั่วกล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 95 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

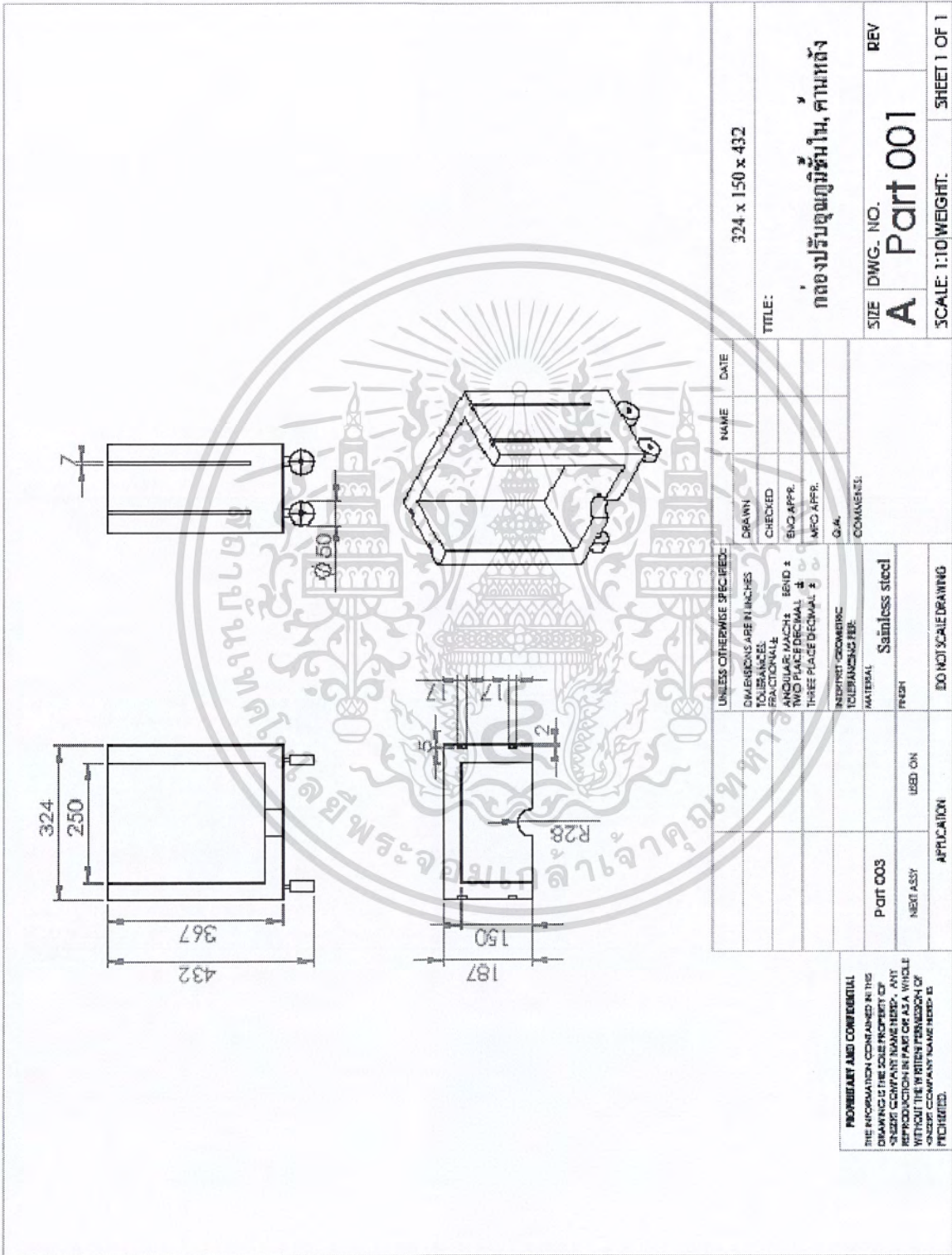
## เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. เรียนโลหะกับมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 15 กันยายน 2553 <<http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/metalswu/lesson1-1.htm>>.
- [2] จินตมัย สุวรรณประทีป. การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [3] มานพ ต้นพระบัณฑิตย์. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่6. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.
- [4] "ASTM D638 - 08 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics." 2008. [www.astm.org](http://www.astm.org). 24 December 2009 <<http://www.astm.org/Standards/D638.htm>>
- [5] มนัส สติรจินดา. เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2529.
- [6] มหาวิทยาลัยนเรศวร. "เทอร์โมคัปเปิล." [student.nu.ac.th](http://student.nu.ac.th). 9 กันยายน 2553 <<http://student.nu.ac.th/electronic/00008.doc>>.
- [7] พินัส เลิศเดื่อมใส. "กระจกและการเลือกใช้ที่เหมาะสม." กรกฎาคม-ธันวาคม 2553. อุตสาหกรรม ACS. 9 กันยายน 2553 <[www.eptg-acsc.co.th/mix-acsc/images/Column/column5.pdf](http://www.eptg-acsc.co.th/mix-acsc/images/Column/column5.pdf)>.
- [8] CSR Insulation (Thailand) Limited. "ฉนวนหรือวัสดุสำหรับงานกันไฟ". [www.csrthailand.com](http://www.csrthailand.com) . 4 January 2010 <http://www.csrthailand.com/productfire.html>
- [9] <http://elec.ltc.ac.th/nikom/Present/2104-2224/Know2/PDF/207%20-%2052%20-%20Solid%20State%20Relay.pdf>
- [10] สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. กลศาสตร์ของแข็ง. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [11] มนตรี พิรุณเกษตร. อุณหพลศาสตร์. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์, 2548

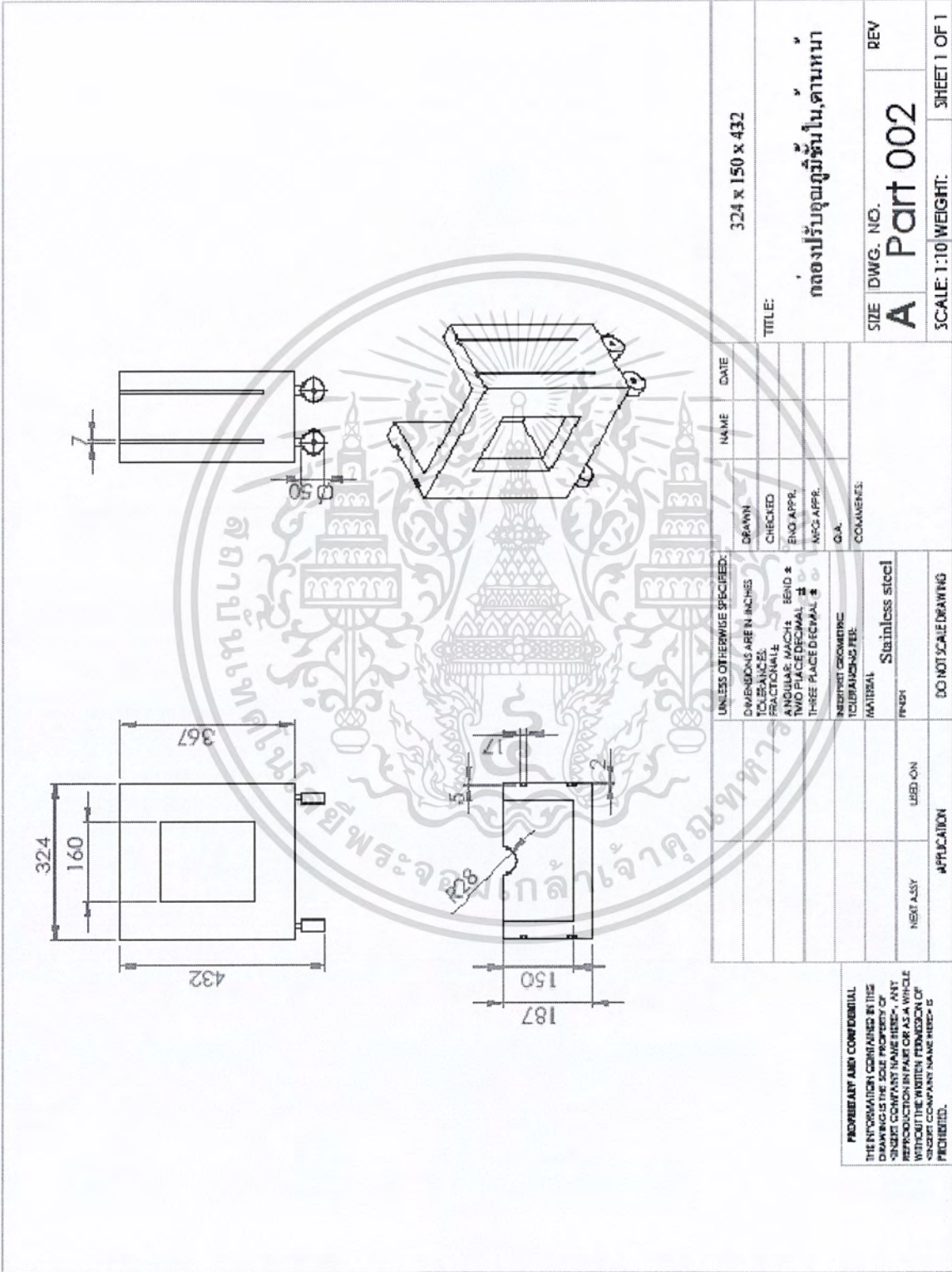
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



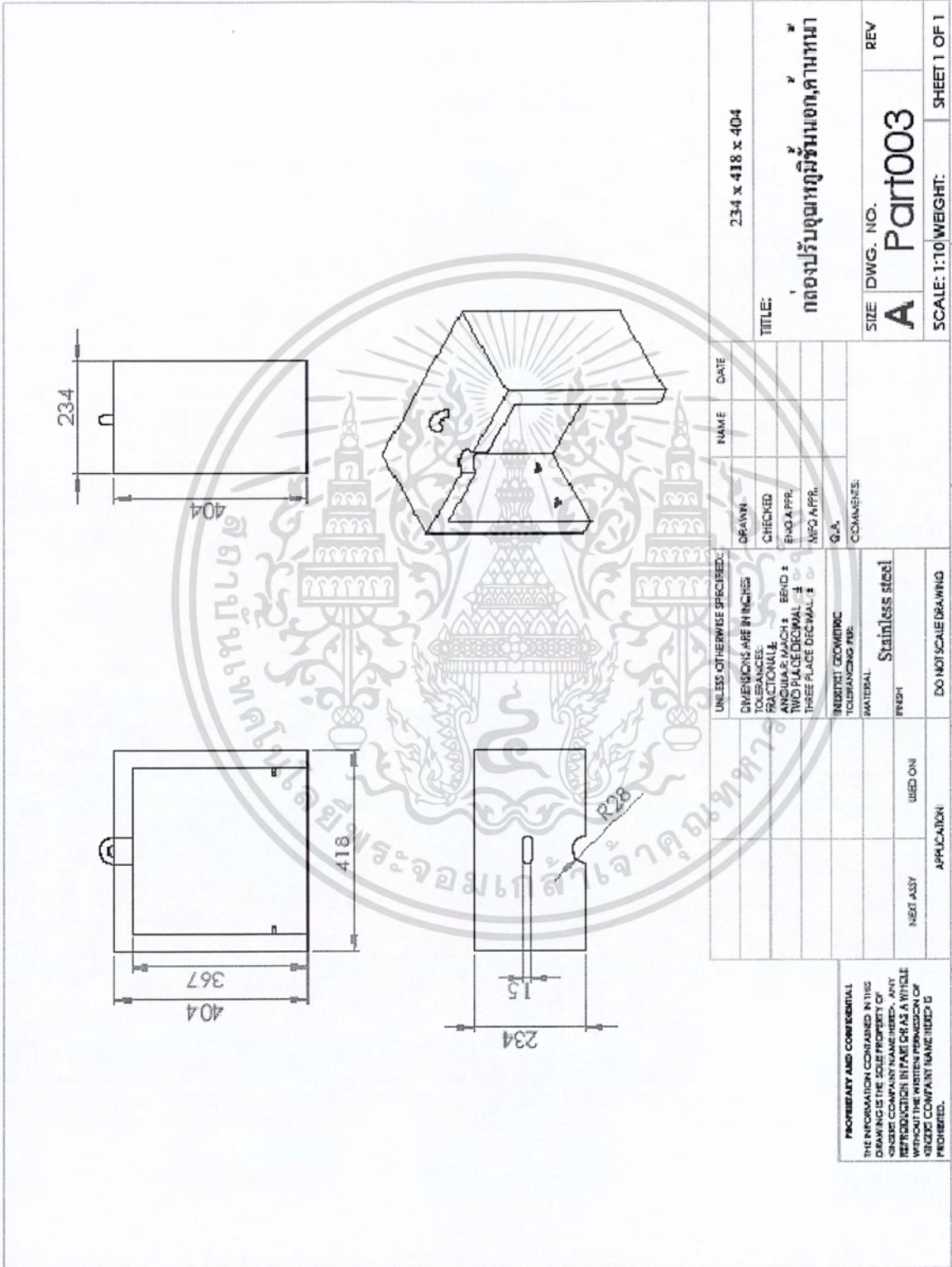
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



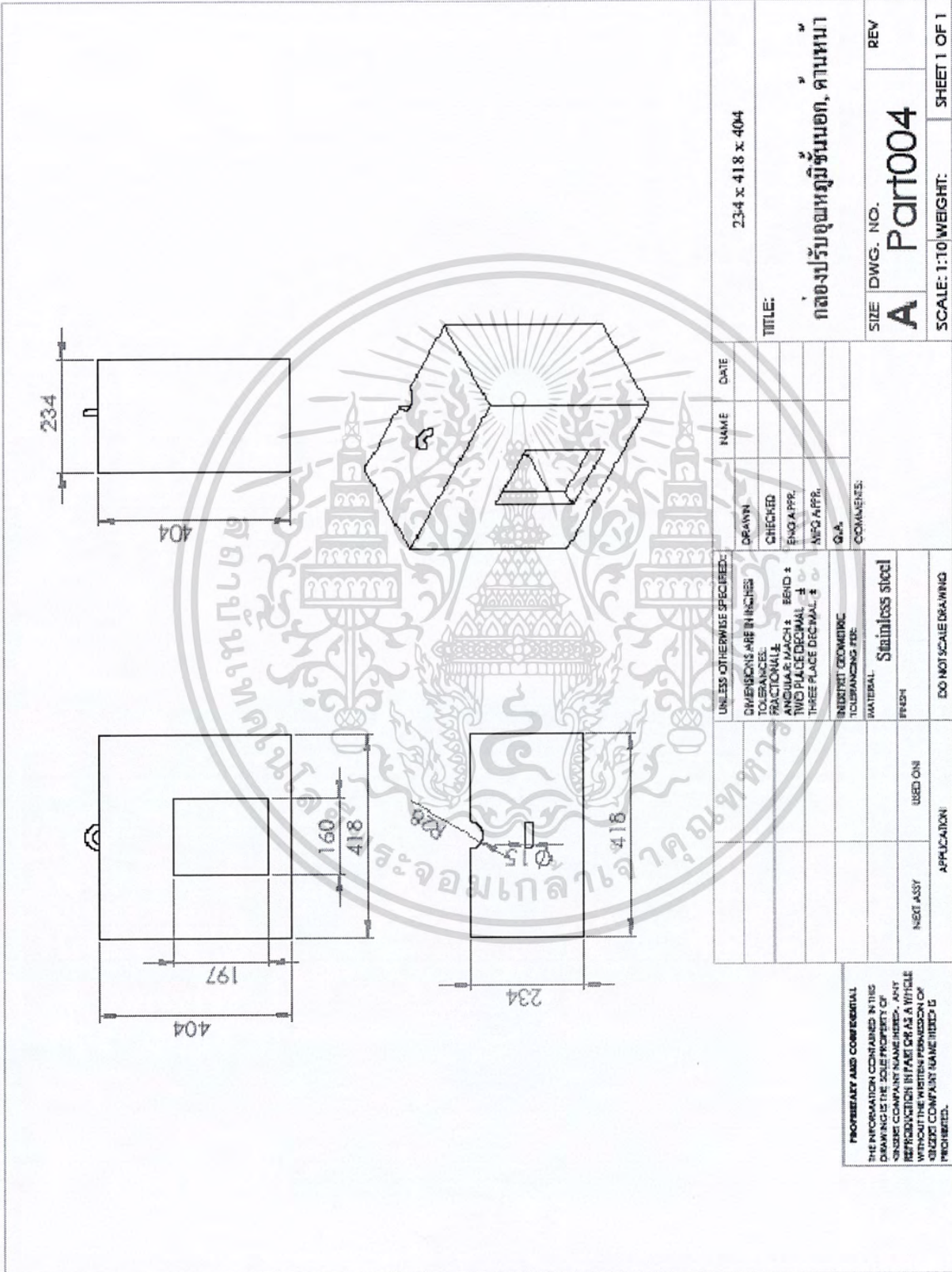
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



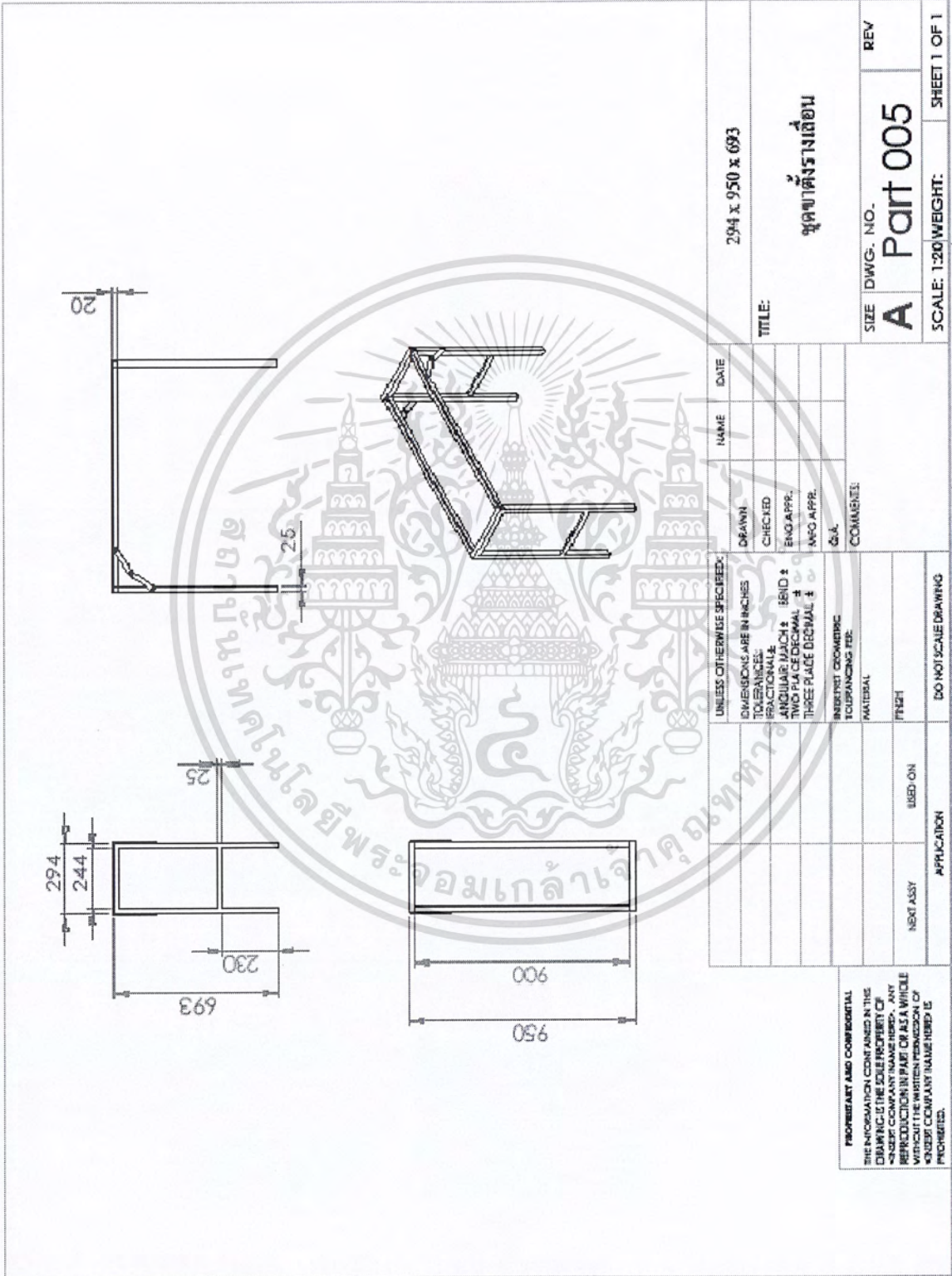
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

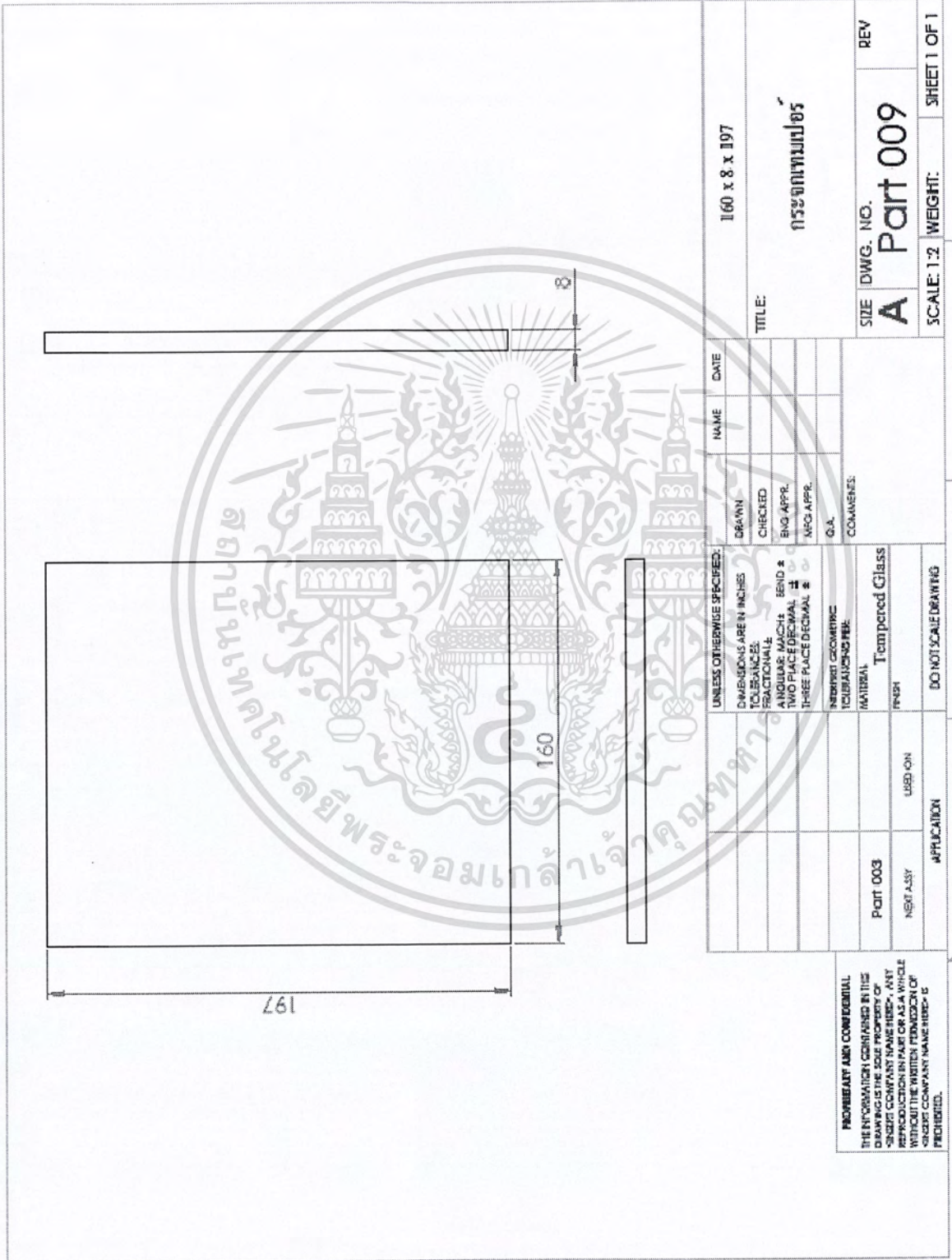


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



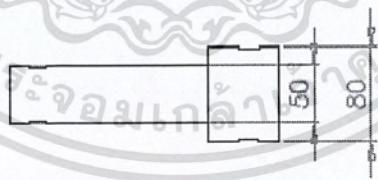
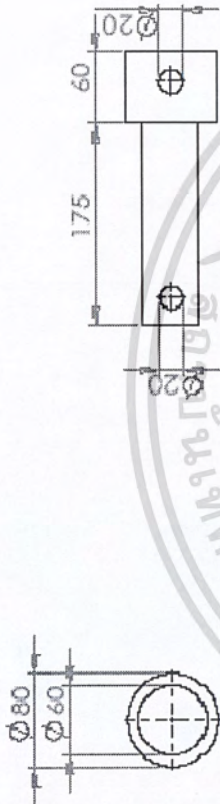






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิก 10



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	SIZE DWG. NO.		REV
DIMENSIONS ARE IN INCHES				Ø-60,80 x 135		
TOLERANCES FRACTIONAL		DRAWN		TITLE		
ANGULAR MATCH BEND #		CHECKED		แกนปากฉีดจับ		
TWO PLACE DECIMAL		ENG. APPR.		SCALE: 1:5		WEIGHT:
THREE PLACE DECIMAL		MEG. APPR.		SHEET 1 OF 1		
NEAREST GEOMETRIC TOLERANCING PER		G.A.		SIZE DWG. NO.		REV
MATERIAL	Stainless steel	COMMENTS:		A		Part 010
FINISH				SCALE: 1:5		WEIGHT:
NEST ASSY	USED ON	DO NOT SCALE DRAWING		SHEET 1 OF 1		
APPLICATION						

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL  
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF SINGTEC COMPANY NAME HEREIN. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SINGTEC COMPANY NAME HEREIN IS PROHIBITED.





## รหัสที่ใช้ในการตัดขึ้นทศบอะคริลิก

%

O1 (NEW PART 2008)

N5 G0 G40 G49 G80 G21 (Initialisation)

N10 G0 G53 Z0 (Retour aux origines machine)

N15 G0 G53 X0 Y0

N20 (Outil รหัส 1 - Diametre 2.0 D1 H1)

N25 T1 M6 D1 H1

N30 S1000 M3

N35 G0 z5

N40 (F-contour-T1)

N45 G0 G54 X156.785 Y20.

N50 G43 H1 Z5.

N55 G0 Z2.

N60 G1 Z-1.5 F33

N65 G1 X132.142 F100

N70 G3 X131.864 Y19.96 I0. J-1.

N75 G2 X111. Y17. I-20.864 J72.039

N80 G1 X54.

N85 G2 X33.136 Y19.96 I0. J75.

N90 G3 X32.857 Y20. I-0.278 J-0.961

N95 G1 X0.

N100 G3 X-1. Y19. I0. J-1.

N105 G1 Y0.

N110 G3 X0. Y-1. I1. J0.

N115 G1 X32.857

N120 G3 X33.136 Y-0.961 I0. J1.

N125 G2 X54. Y2. I20.864 J-72.039

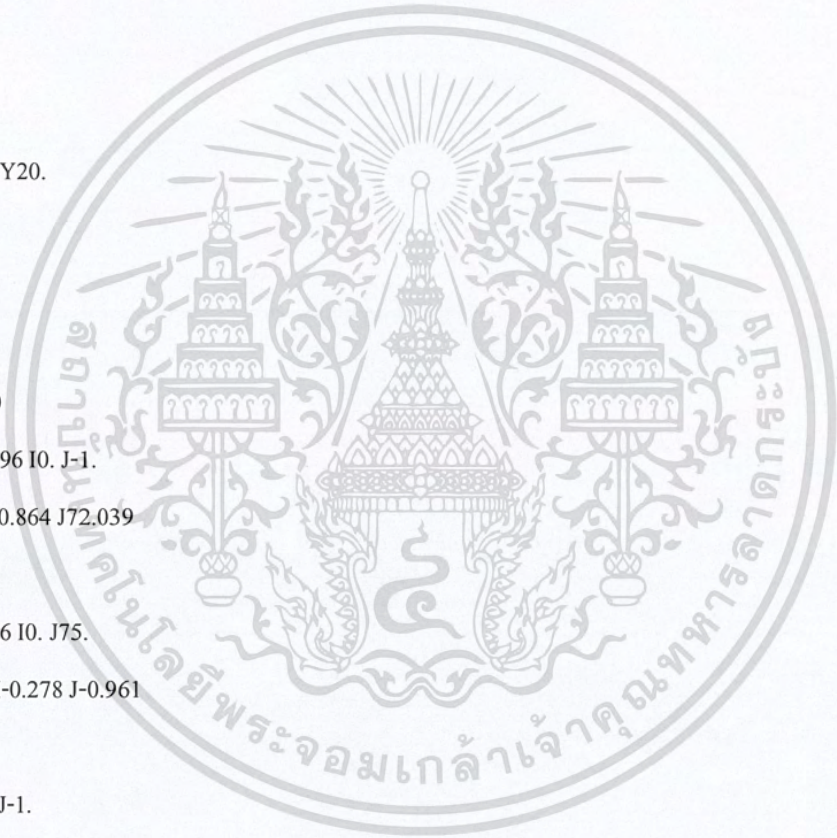
N130 G1 X111.

N135 G2 X131.864 Y-0.961 I0. J-75.

N140 G3 X132.142 Y-1. I0.278 J0.961

N145 G1 X165

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 2 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



N150 G3 X166. Y0. I0. J1.

N155 G1 Y19.

N160 G3 X165. Y20. I-1. J0.

N165 G1 X156.785

N170 G1 Z-3. F33

N175 G1 X132.142 F100

N180 G3 X131.864 Y19.96 I0. J-1.

N185 G2 X111. Y17. I-20.864 J72.039

N190 G1 X54.

N195 G2 X33.136 Y19.96 I0. J75.

N200 G3 X32.857 Y20. I-0.278 J-0.961

N205 G1 X0.

N210 G3 X-1. Y19. I0. J-1.

N215 G1 Y0.

N220 G3 X0. Y-1. I1. J0.

N225 G1 X32.857

N230 G3 X33.136 Y-0.961 I0. J1.

N235 G2 X54. Y2. I20.864 J-72.039

N240 G1 X111.

N245 G2 X131.864 Y-0.961 I0. J-75.

N250 G3 X132.142 Y-1. I0.278 J0.961

N255 G1 X165.

N260 G3 X166. Y0. I0. J1.

N265 G1 Y19.

N270 G3 X165. Y20. I-1. J0.

N275 G1 X156.785

N280 G1 Z-4.5 F33

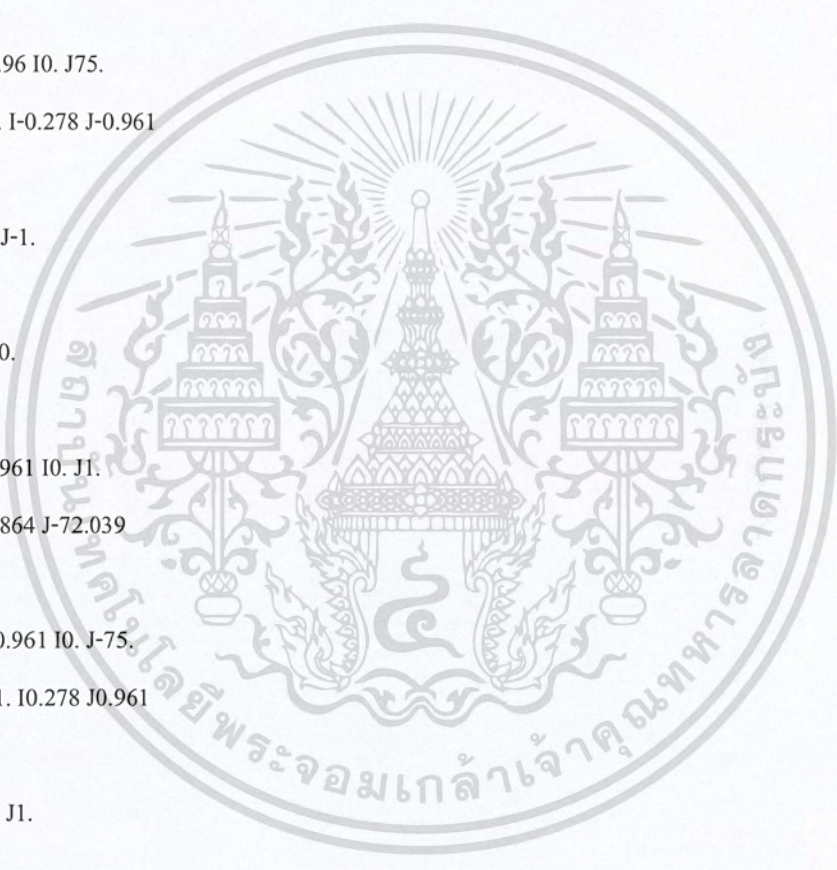
N285 G1 X132.142 F100

N290 G3 X131.864 Y19.96 I0. J-1.

N295 G2 X111. Y17. I-20.864 J72.039

N300 G1 X54.

N305 G2 X33.136 Y19.96 I0. J75.



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **ผข 3** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N310 G3 X32.857 Y20. I-0.278 J-0.961

N315 G1 X0.

N320 G3 X-1. Y19. I0. J-1.

N325 G1 Y0.

N330 G3 X0. Y-1. I1. J0.

N335 G1 X32.857

N340 G3 X33.136 Y-0.961 I0. J1.

N345 G2 X54. Y2. I20.864 J-72.039

N350 G1 X111.

N355 G2 X131.864 Y-0.961 I0. J-75.

N360 G3 X132.142 Y-1. I0.278 J0.961

N365 G1 X165.

N370 G3 X166. Y0. I0. J1.

N375 G1 Y19.

N380 G3 X165. Y20. I-1. J0.

N385 G1 X156.785

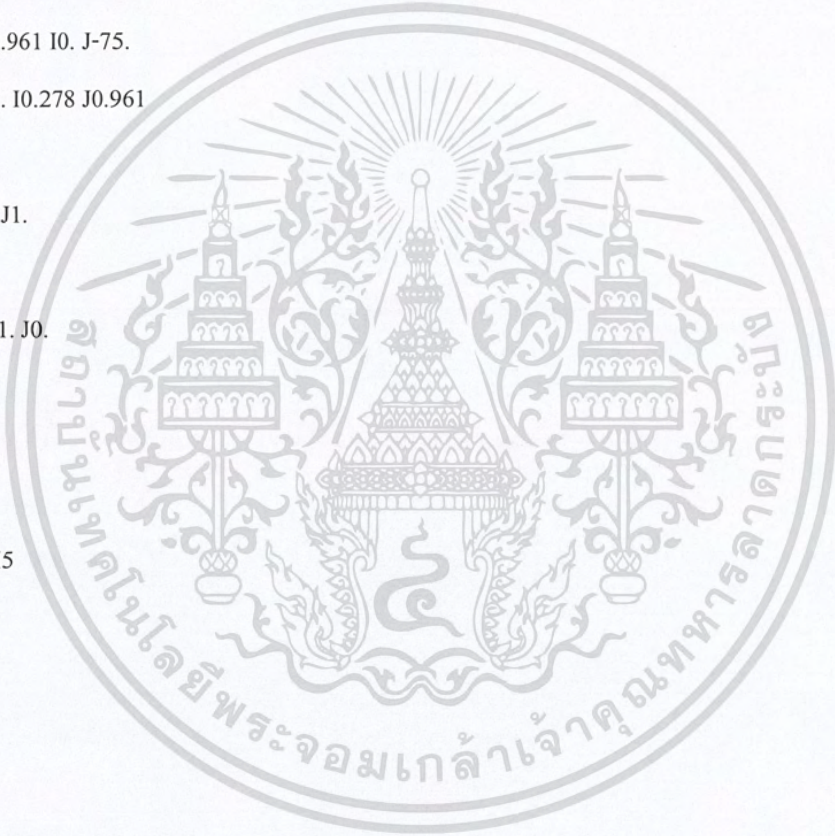
N390 G0 Z5.

N395 G0 G53 Z0 M9

N400 G0 G53 X0 Y0 M5

M30

%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พ.ร.บ. 4** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ค

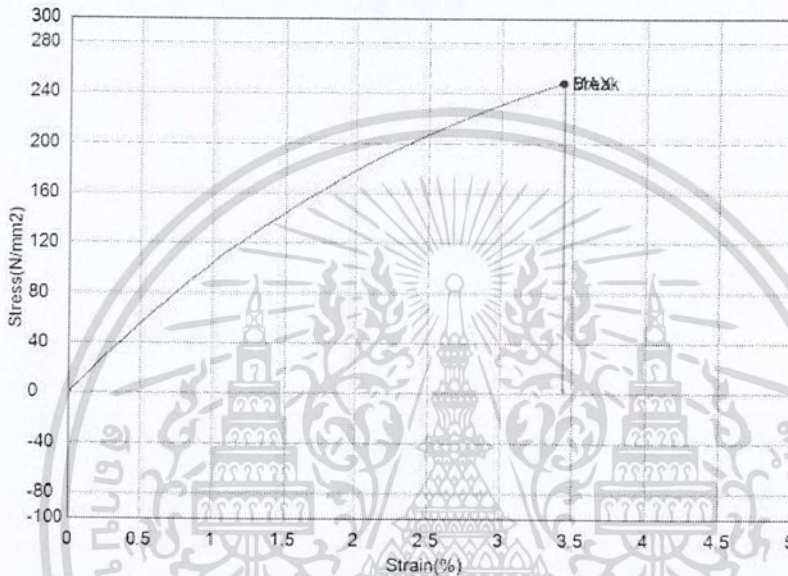
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงชนิดทดสอบอะคริลิกที่ 25 องศาเซลเซียส

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	3229.41	248.416

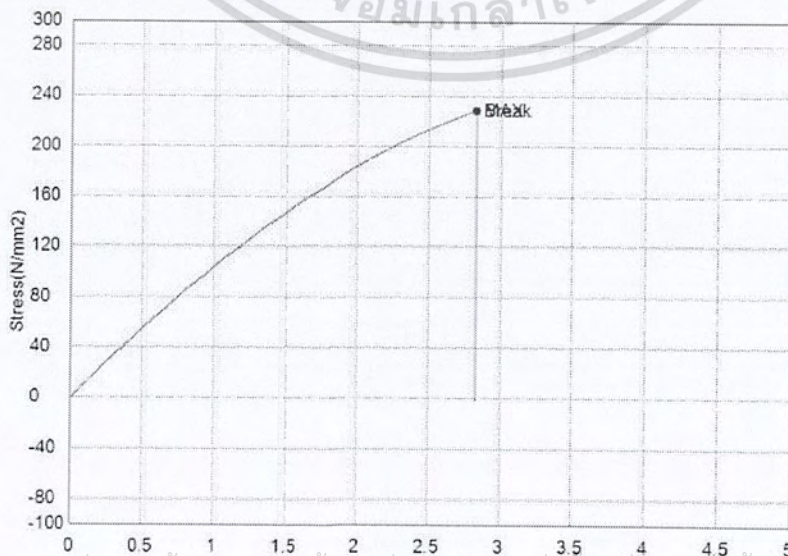
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	3229.41	248.416



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	2974.69	226.822

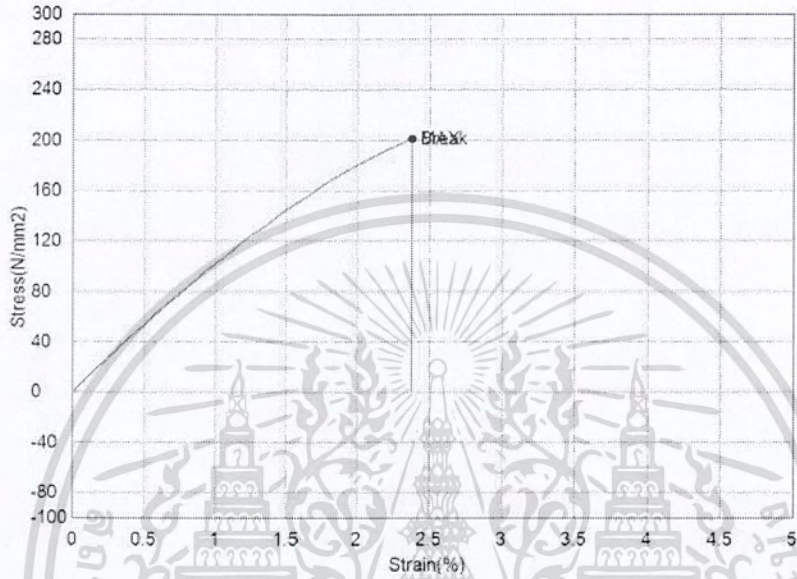
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	2974.69	226.822



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

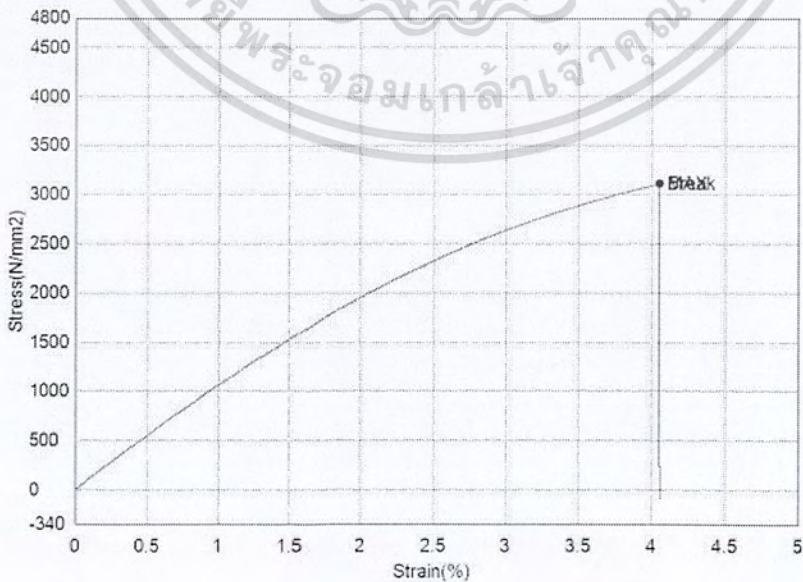
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	2619.27	201.482

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	2619.27	201.482



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	3108.44	3108.44

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	3108.44	3108.44

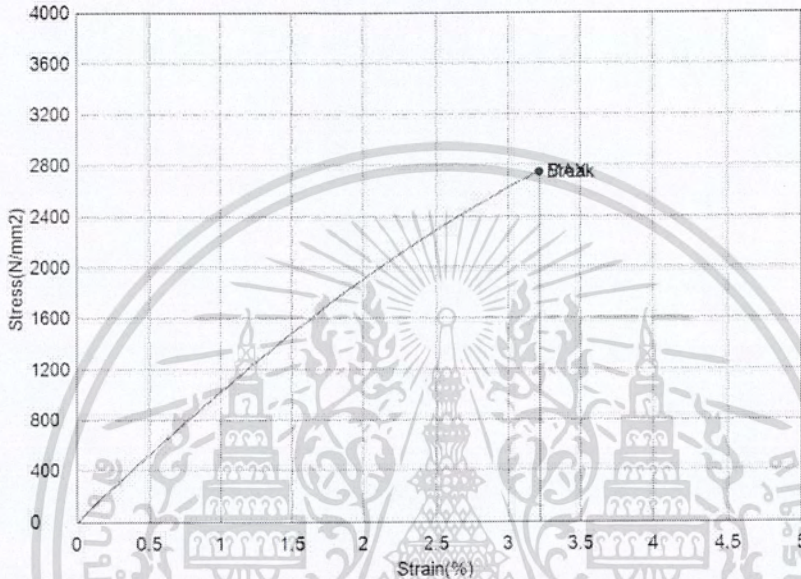


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พท.3** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	2747.57	2747.57

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	2747.57	2747.57



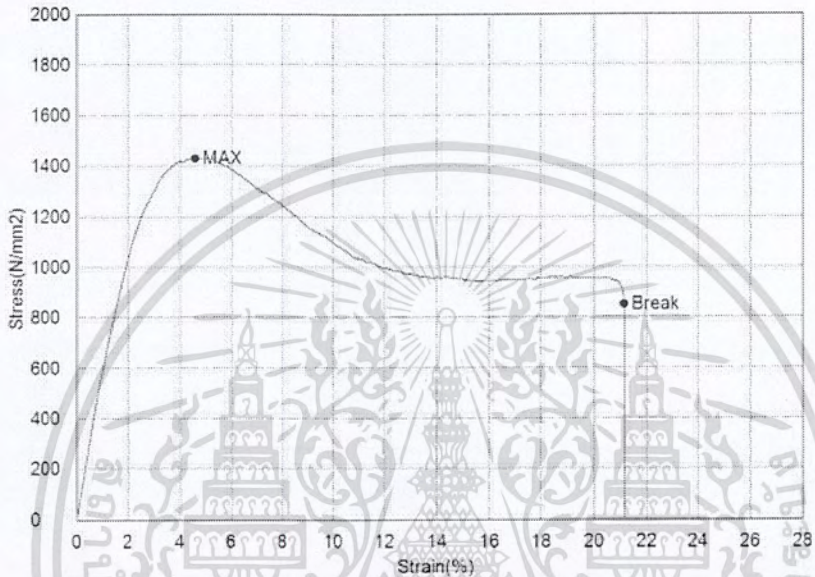
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **ผศ.4** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกที่ 50 องศาเซลเซียส

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	1428.68	1428.68

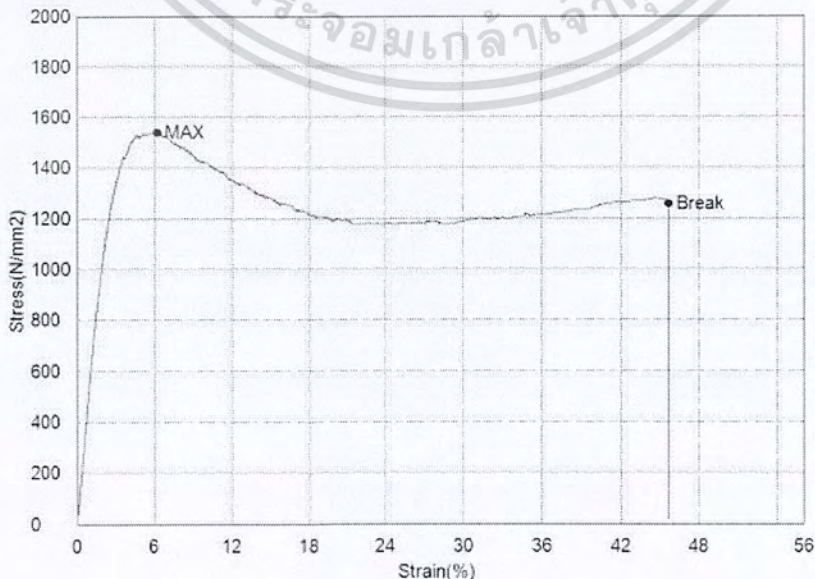
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	852.235	852.235



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	1540.22	1540.22

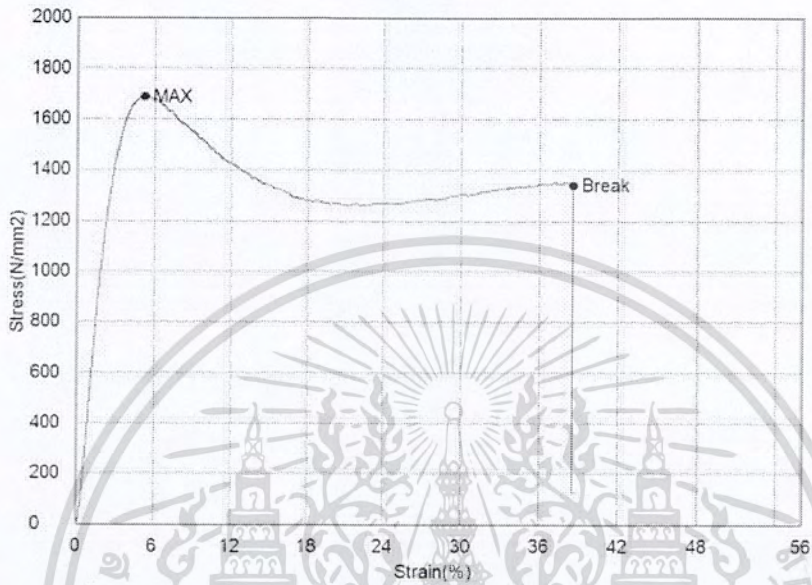
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1257.25	1257.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ผศ.5 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

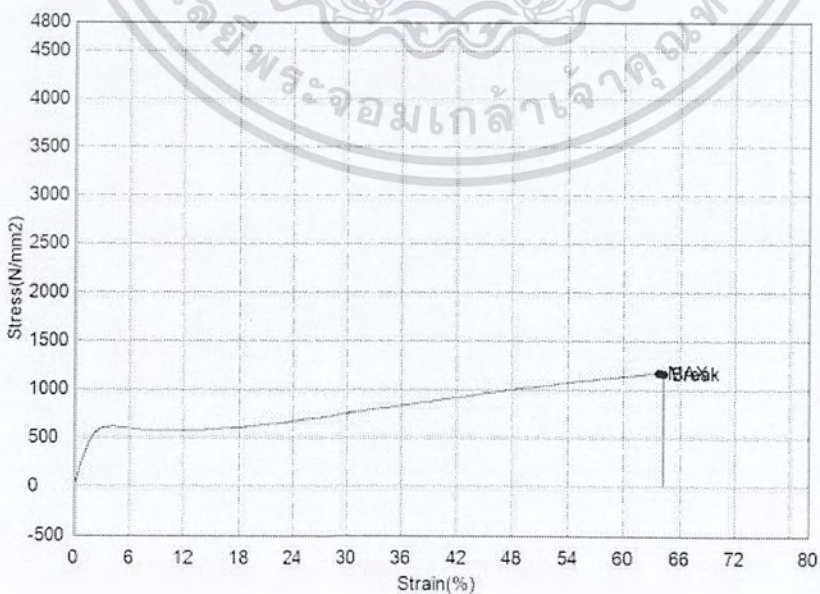
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	1688.07	1688.07

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1338.55	1338.55



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	1170.72	1170.72

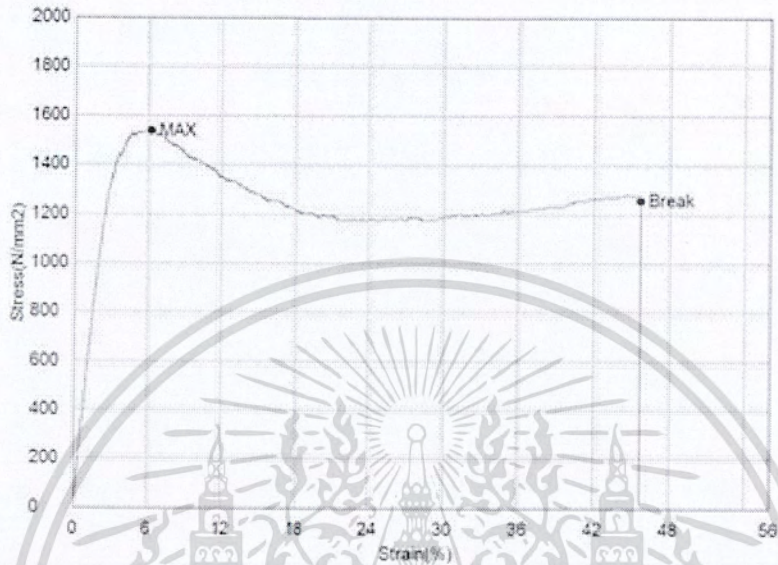
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1159.83	1159.83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พท.6** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	1570.24	1570.24

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1257.25	1257.25

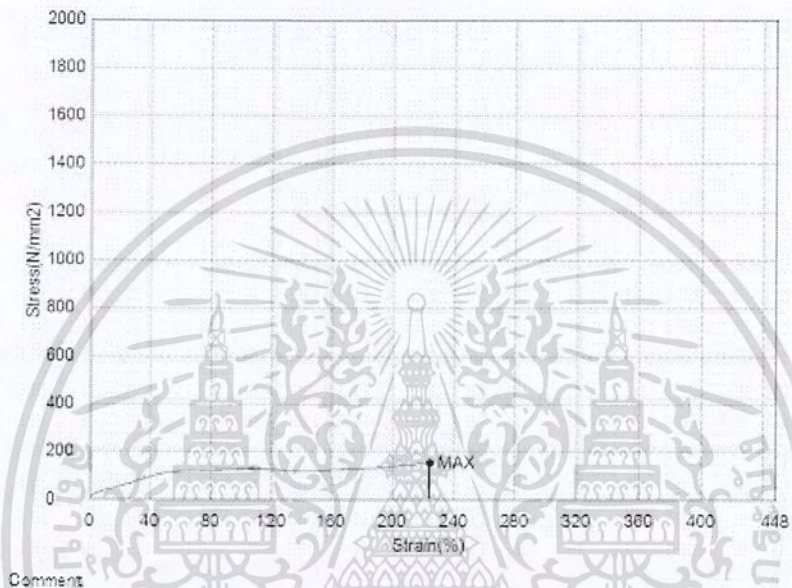


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พท.7** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกที่ 100 องศาเซลเซียส

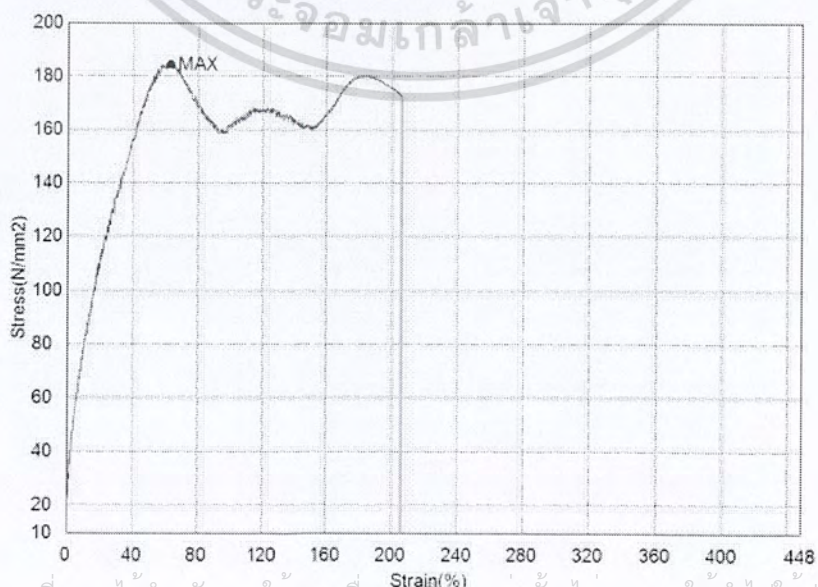
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	152.667	152.667

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	--	--



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	184.409	184.409

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	--	--

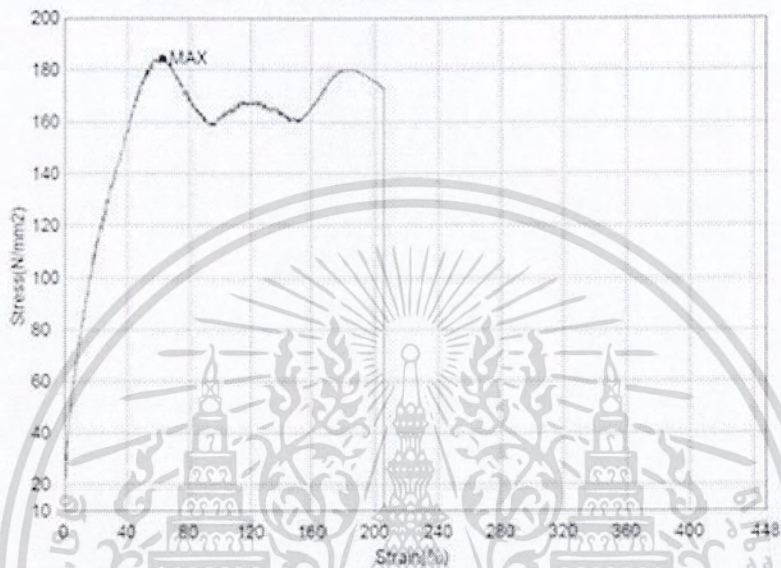


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ผศ.8 ระบุต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	137.243	137.243

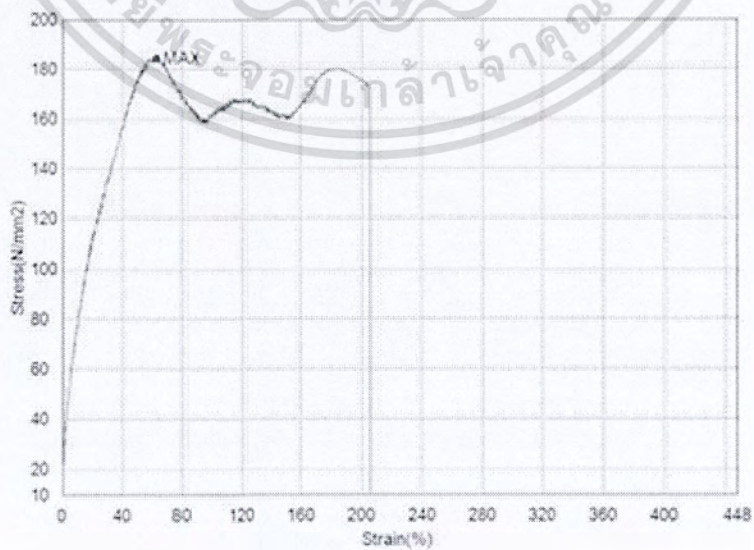
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	--	--



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	133.324	133.324

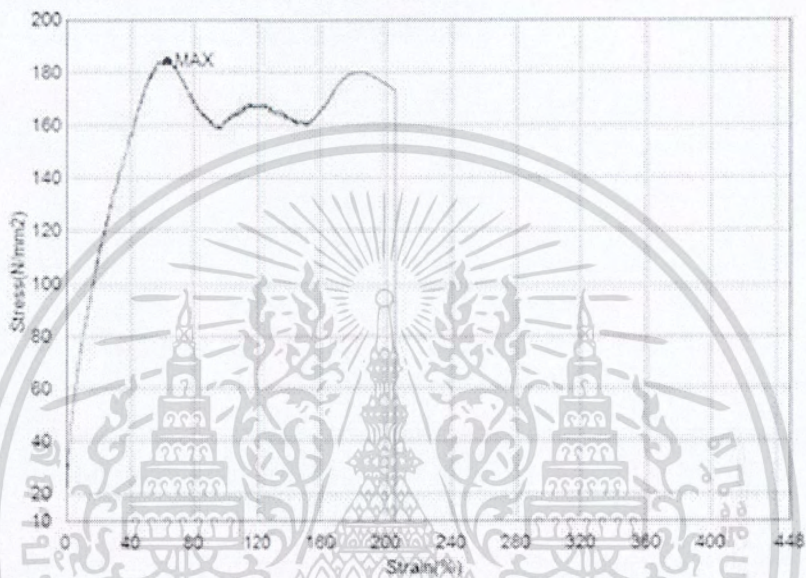
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_10	--	--



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พค.9** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	187.547	187.547

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	--	--



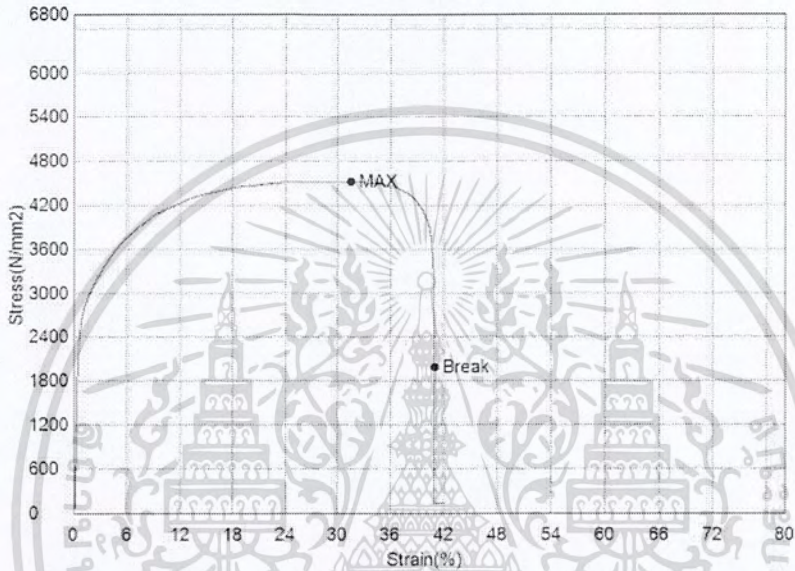
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พค.10** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกที่ 25 องศาเซลเซียส

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4517.78	4517.78

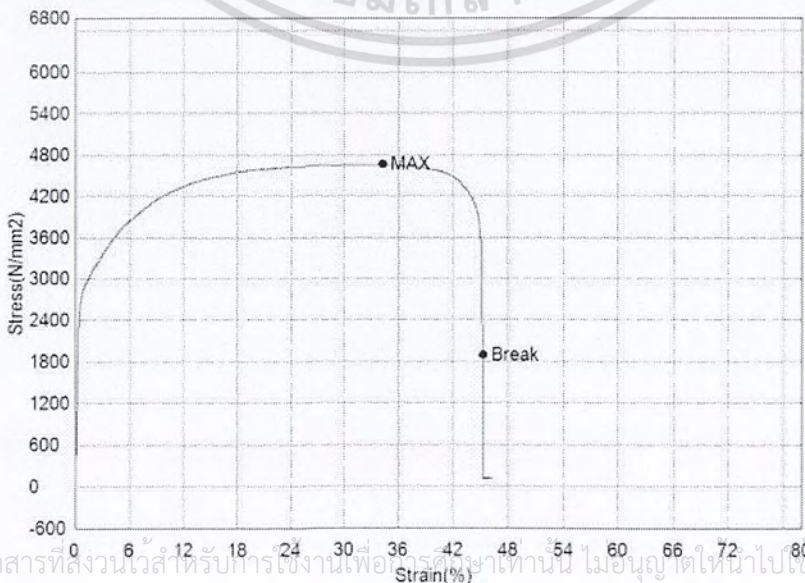
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1980.32	1980.32



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4659.56	4659.56

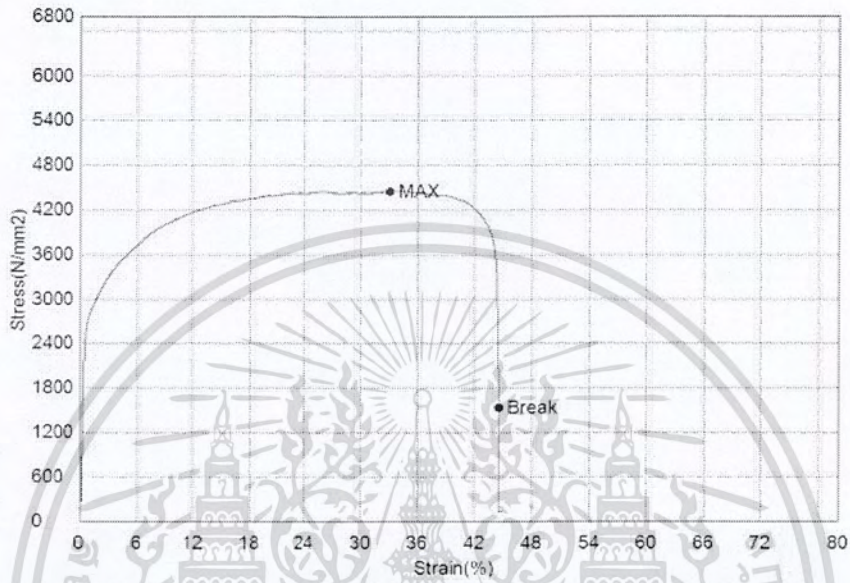
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1899.42	1899.42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา ผศ.11 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

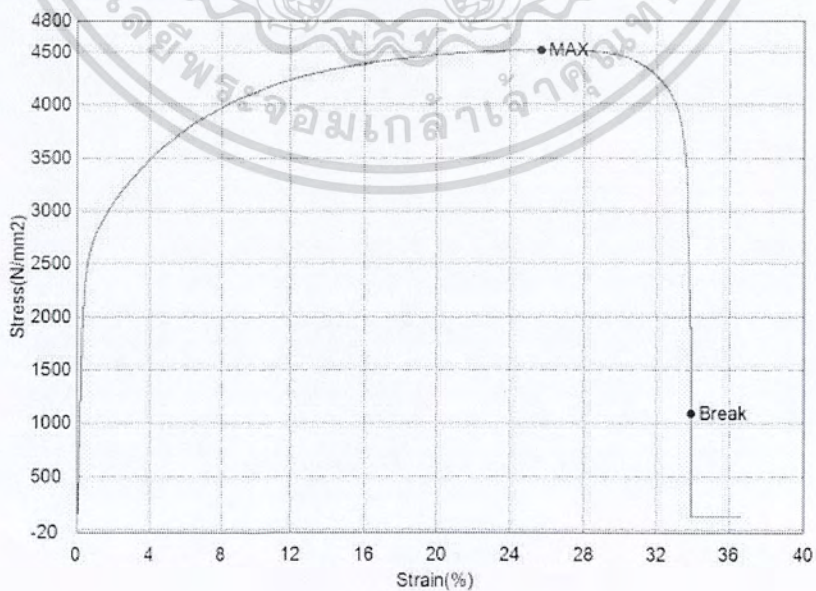
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4449.54	4449.54

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1534.64	1534.64



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4520.15	4520.15

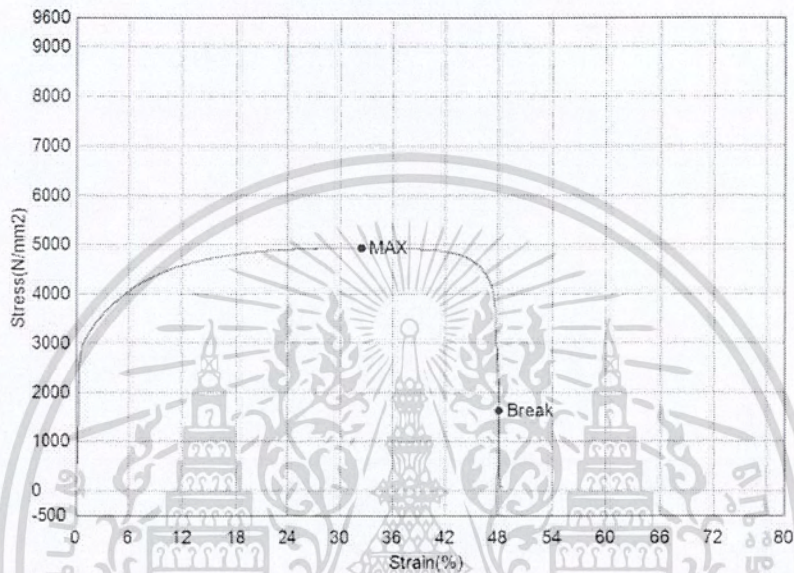
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1091.02	1091.02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พค.12** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4938.13	4938.13

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1632.42	1632.42



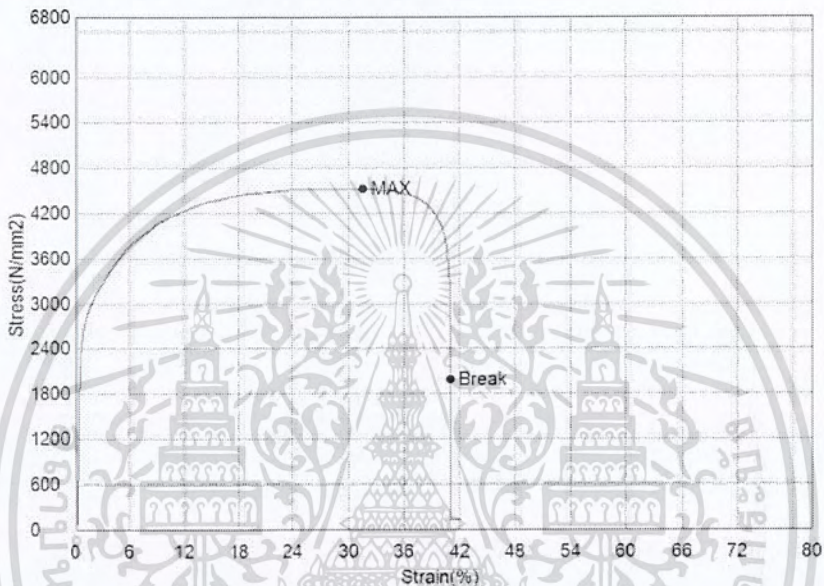
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ผศ 13 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกที่ 50 องศาเซลเซียส

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4517.78	4517.78

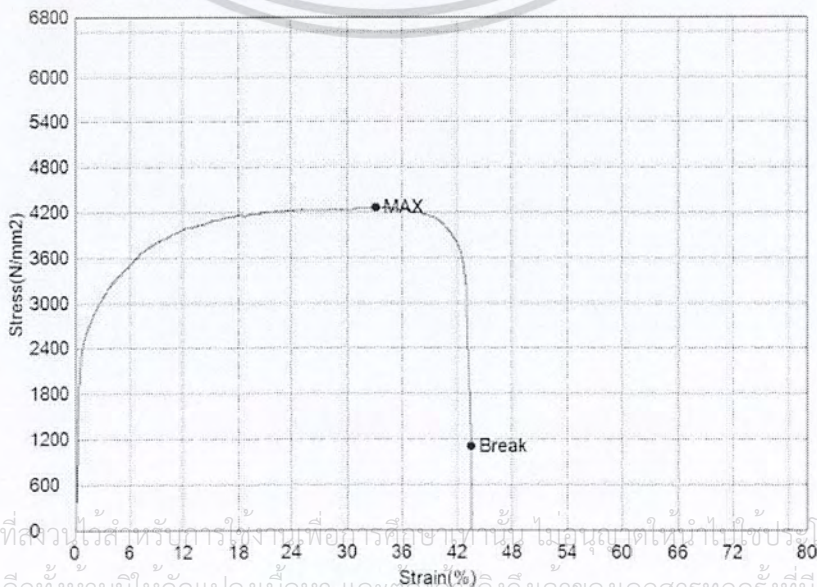
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1980.32	1980.32



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4265.44	4265.44

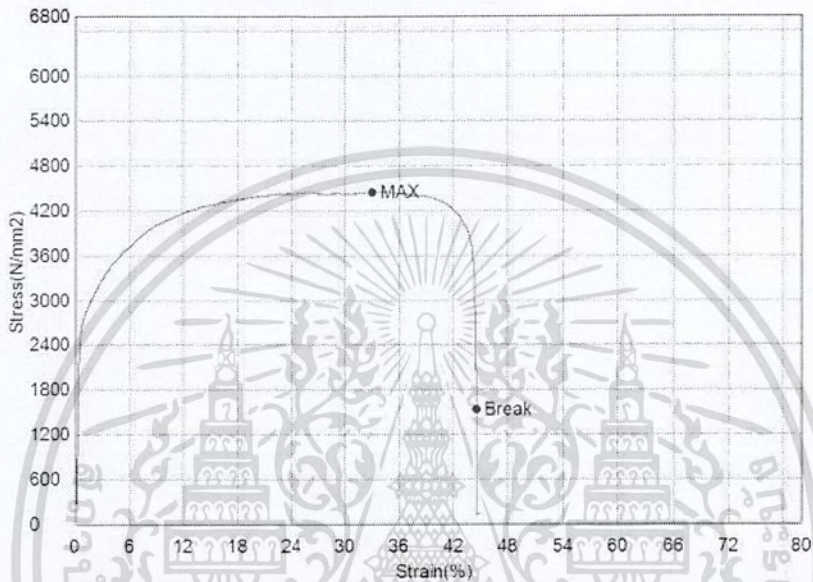
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1095.93	1095.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

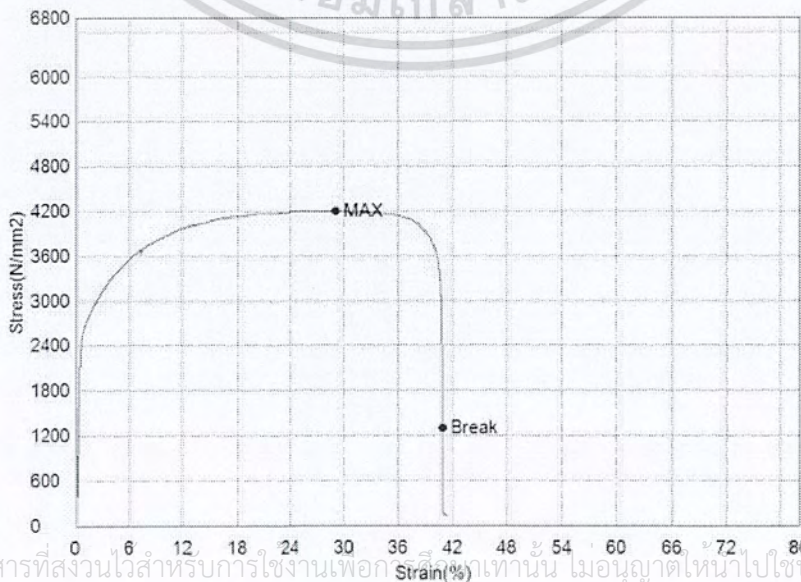
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4449.54	4449.54

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1534.64	1534.64



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4197.34	4197.34

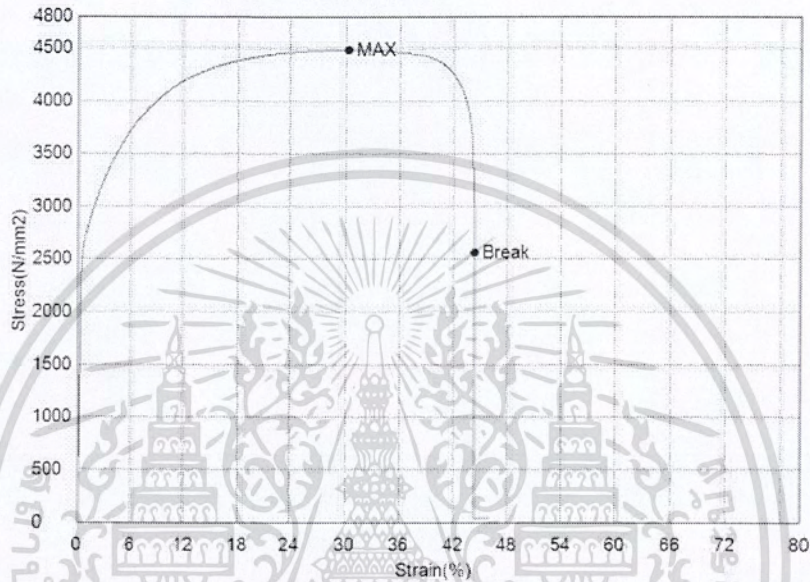
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1295.30	1295.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ.15 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4482.78	4482.78

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	2562.56	2562.56

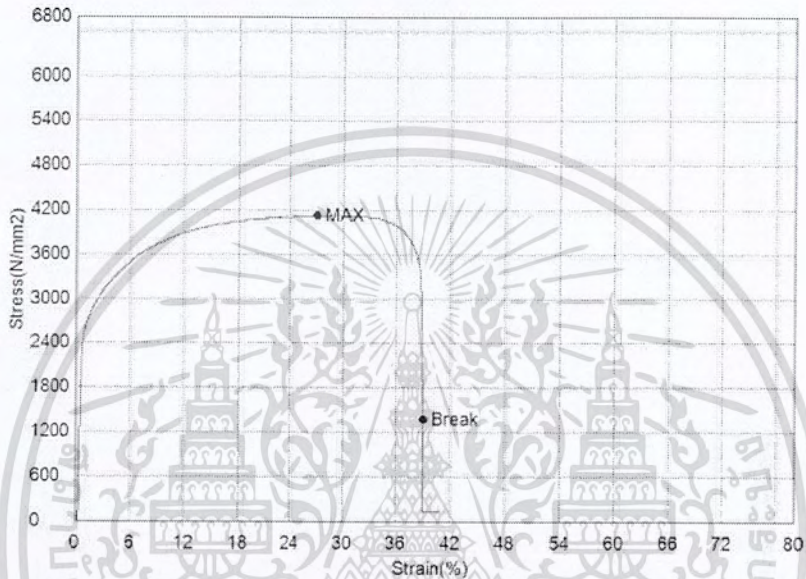


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **พค 16** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดสอบแรงดึงขึ้นทดสอบอะคริลิกที่ 100 องศาเซลเซียส

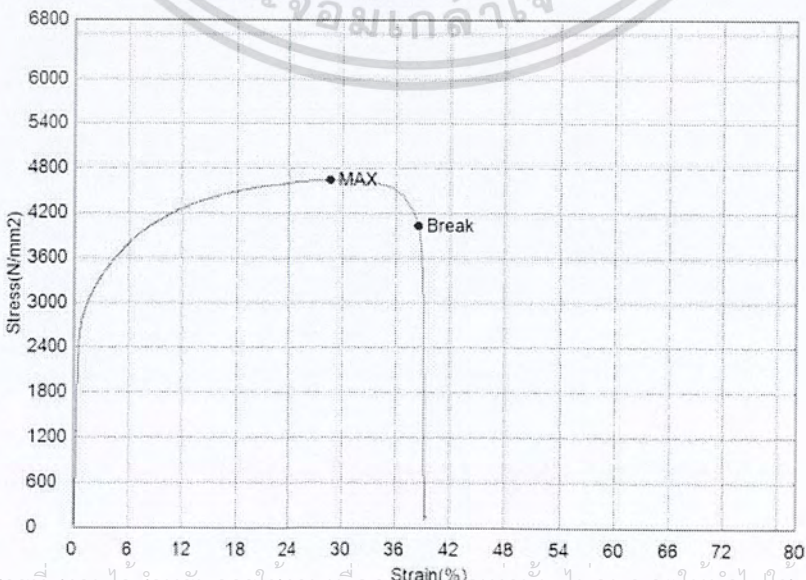
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4121.80	4121.80

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1376.92	1376.92



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4636.18	4636.18

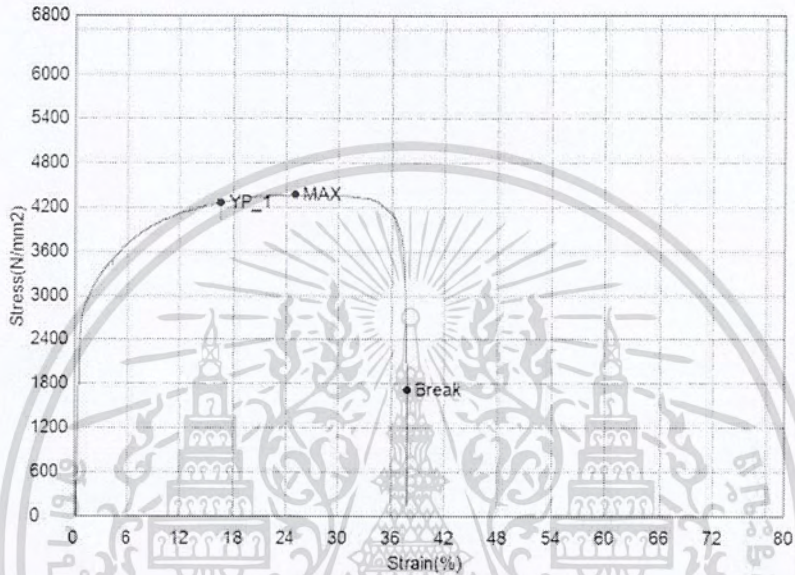
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	4022.76	4022.76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ ผศ 17 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

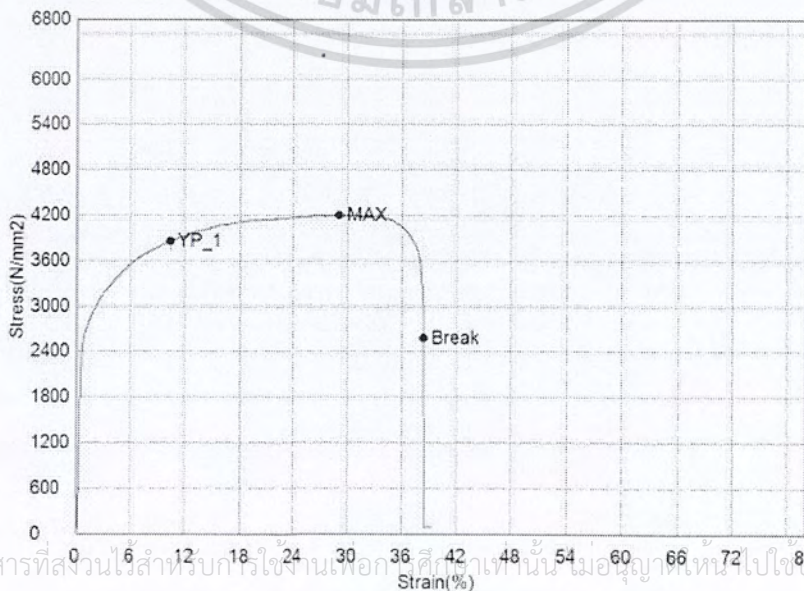
Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	4265.83	4265.83	4372.49	4372.49

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1710.42	1710.42



Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	3850.89	3650.89	4196.55	4196.55

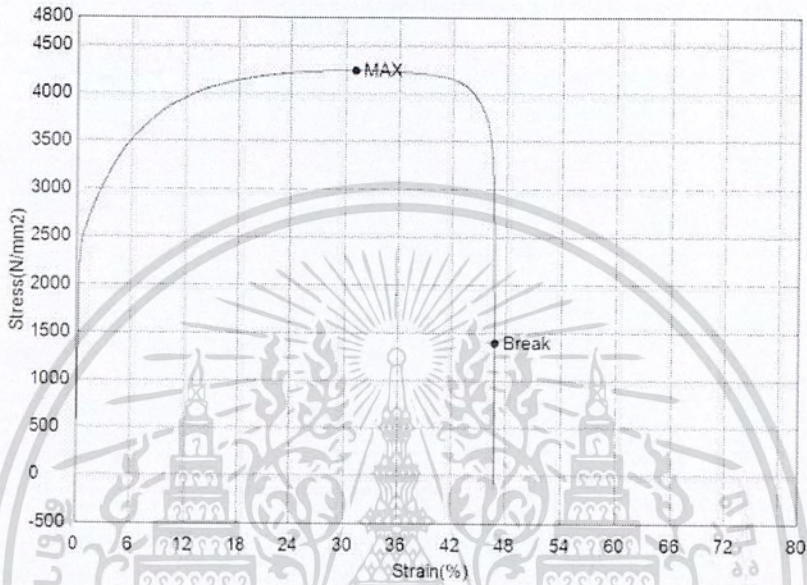
Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	2574.52	2574.52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในโอกาสที่ศึกษาเท่านั้น เมื่อสัญญาให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา ผศ.18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name	YP(%)_Force	YP(%)_Stress	Max_Force	Max_Stress
Parameters	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Ar	Calc. at Entire Ar
Unit	N	N/mm2	N	N/mm2
1_1	--	--	4240.50	4240.50

Name	Break_Force	Break_Stress
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2
1_1	1394.22	1394.22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ **ผศ 19** ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้