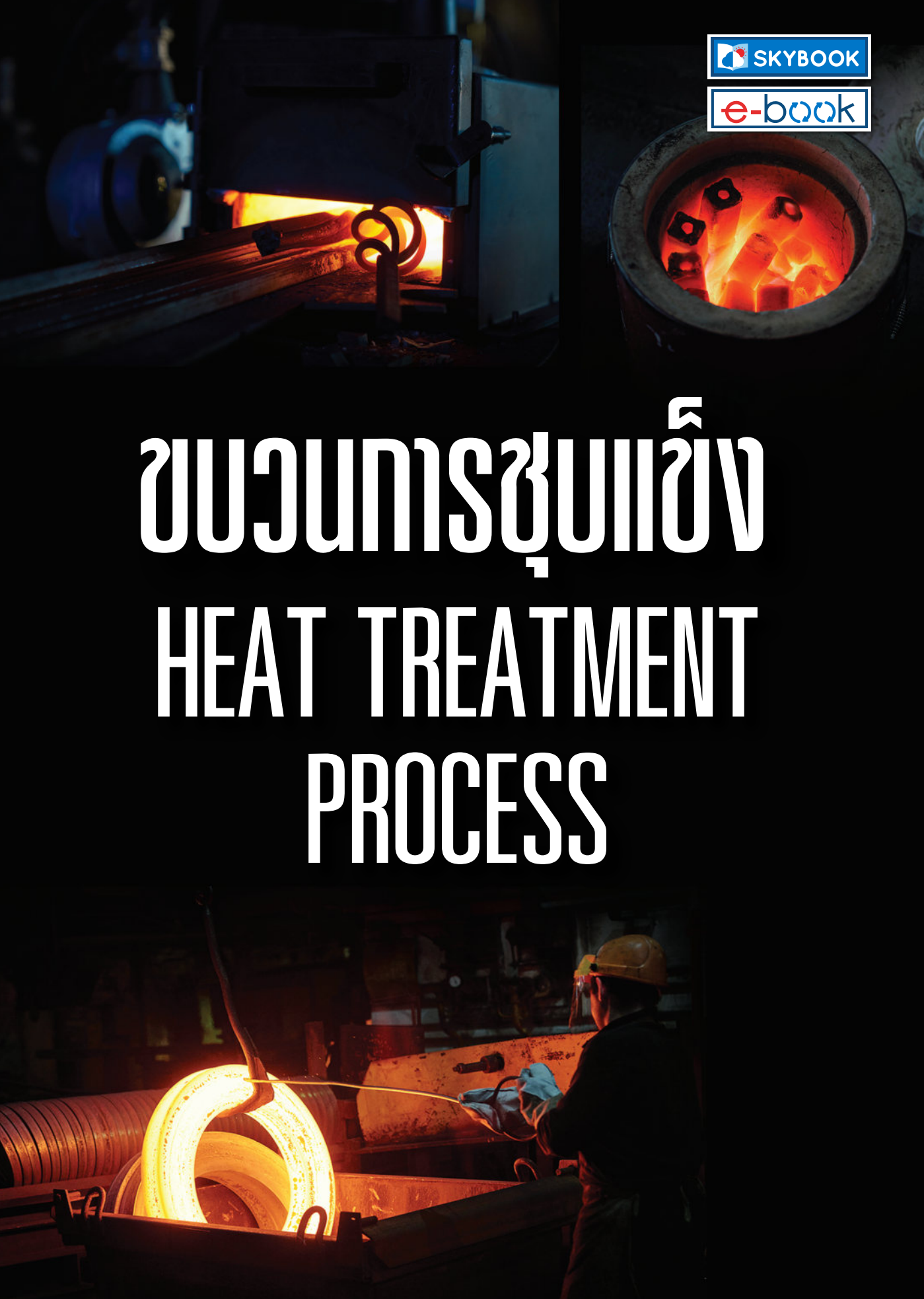




กระบวนการชุบแข็ง HEAT TREATMENT PROCESS

The background is a grayscale industrial scene. In the upper right, a circular opening reveals a glowing, molten interior, likely a furnace. In the lower right, a worker wearing a hard hat and safety gear is seen from the side, working with a large industrial component. The overall atmosphere is one of a busy manufacturing or processing environment.

กระบวนการชุบแข็ง HEAT TREATMENT PROCESS

คำนำ

ในการผลิตชิ้นงานเหล็กที่มีคุณภาพให้ได้มาซึ่งมาตรฐานนั้น ถือว่าเป็นสิ่งที่เราทุก ๆ คนปรารถนา และในการที่จะทำงานให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้นั้น ต้องมีองค์ประกอบหลายประการ สิ่งที่เป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่จะละเลยไม่ได้คือการได้รู้ว่า เหล็กที่จะใช้งานนั้น ๆ มีคุณสมบัติเหมาะสมอย่างไร

หนังสือ ขบวนการชุบแข็ง (Heat Treatment Process) รหัส ชก. 0222 จัดทำขึ้นมาเพื่อให้นักศึกษาสายช่างอุตสาหกรรม สาขาช่างกลโรงงาน ช่างโลหะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม เทคนิคอุตสาหกรรม และสาขาในคณะเทคนิคการผลิตอีกหลาย ๆ สาขาด้วยกัน โดยทางคณะผู้เรียบเรียงได้เรียบเรียงขึ้นเพื่อให้เนื้อหาใช้เรียนได้ทั้งหลักสูตรสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลและกรมอาชีวศึกษา

อนึ่งทางผู้เรียบเรียงต้องขอขอบพระคุณ ท่านอาจารย์วิฑูรย์ สวัสดิ์รักษา ผู้ช่วยผู้อำนวยการฝ่ายวางแผนและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือและเพื่อน ๆ อาจารย์สาขาช่างโลหะทุก ๆ คนที่ได้ช่วยในด้านข้อมูล และกำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด และส่วนใดที่ขาดตกบกพร่องไปบ้าง ทางคณะผู้เรียบเรียงต้องขอภัยเป็นอย่างสูง

วิหาร ดีปัญญา

ไพฑูรย์ อุดมเกตุ

เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์

ลักษณะรายวิชา

- | | |
|-----------------------|--|
| 1. รหัสและชื่อ | ชก. 0222 ขบวนการชุบแข็ง
[Heat Treatment Process] |
| 2. สภาพรายวิชา | วิชาชีพเลือกเฉพาะสาขา |
| 3. ระดับรายวิชา | ปีที่ 2 ภาคเรียนที่ 2 |
| 4. พื้นฐาน | - |
| 5. เวลาศึกษา | 36 คาบ ต่อภาคเรียน 18 สัปดาห์ ทฤษฎี 2 คาบ/สัปดาห์
ปฏิบัติ 0 คาบ/สัปดาห์ และศึกษานอกเวลาอีก 2 คาบ/สัปดาห์ |
| 6. หน่วยกิต | 2 (2-0-2) |
| 7. จุดมุ่งหมายรายวิชา | <ol style="list-style-type: none">1. เข้าใจถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ2. รู้วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ3. เข้าใจโครงสร้างภายในของโลหะ4. เข้าใจทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะเมื่อได้รับความร้อน5. เข้าใจหลักการเพิ่มคาร์บอนให้กับเหล็ก6. เข้าใจวิธีการชุบแข็งเหล็กเครื่องมือ |
| 8. คำอธิบายรายวิชา | ศึกษาถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุโดยการทดสอบอย่างง่าย ๆ โครงสร้างภายในของโลหะ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อได้รับความร้อน การอบอ่อน การชุบแข็งและการคืนตัวของเหล็กกล้า การเพิ่มคาร์บอน การชุบเหล็กเครื่องมือ |

สารบัญ

บทที่ 1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ	7
1.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ	7
1.2	ความร้อน	16
	แบบฝึกหัด	17
บทที่ 2	การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	19
2.1	คุณสมบัติทางกล	19
	แบบฝึกหัด	34
บทที่ 3	โครงสร้างภายในของโลหะ	36
3.1	โครงสร้างผลึกของโลหะ	36
3.2	โครงสร้างผลึกมาตรฐาน	39
	แบบฝึกหัด	44
บทที่ 4	ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะเมื่อได้รับความร้อน	46
4.1	การอบชุบโลหะ	46
4.2	ความหมายของการอบชุบโลหะ	47
4.3	เวลา อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลง	50
4.4	โครงสร้างออสเทนไนต์	56
4.5	โครงสร้างเฟอร์ไรต์	58
4.6	โครงสร้างเบนไนต์หรือทรูไซด์	58
4.7	โครงสร้างซอร์ไบต์	60
4.8	โครงสร้างมาร์เทนไซด์	61
4.9	การอบอ่อน	70
4.10	การอบคืนตัว	75
4.11	การอบคืนไฟ	77
4.12	สารชุบ	84
	แบบฝึกหัด	94

บทที่ 5 หลักการเพิ่มคาร์บอนให้กับเหล็ก 96

- 5.1 การเพิ่มความแข็ง 96
- 5.2 การชุบแข็งด้วยการใช้กระแสเหนี่ยวนำไฟฟ้า 99
- 5.3 หลักเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำให้ความร้อน 101
- 5.4 การชุบแข็งโดยใช้เปลวไฟ 109
- 5.5 Pack Carburizing 109
- 5.6 Case Hardening 110
- 5.7 Gas Carburizing 111
- 5.8 คาร์โบไนไตรดิง 114
- 5.9 ไนไตรดิง 120
 - แบบฝึกหัด 129

บทที่ 6 วิธีการชุบแข็งเหล็กเครื่องมือ 131

- 6.1 เหล็กไฮสปีด : High Speed Steels = AISI M2 131
- 6.2 เหล็กไฮสปีด : High Speed Steels = AISI M3 133
- 6.3 เหล็กร้อน : Hot Work Tool Steels = AISI H13 135
- 6.4 เหล็กงานร้อน : Hot Work Tool Steels = AISI L6 137
- 6.5 เหล็กงานเย็น : Cold Work Tool Steels = AISI D2 139
- 6.6 เหล็กเครื่องมืองานเย็น : Cold Work Tool Steels = AISI D6 142
- 6.7 เหล็กงานเย็น : Cold Work Tool Steels = AISI L6 143
- 6.8 เหล็กทำพิมพ์พลาสติก : Plastic Mold Tool Steels = AISI P20 145
- 6.9 เหล็กทำพิมพ์พลาสติก : Plastic Mold Tool Steels = AISI L6 147
- 6.10 เหล็กกล้าไร้สนิม : Stainless Steels = AISI 420 149
- 6.11 เหล็กกล้าไร้สนิม : Stainless Steels = AISI 440C 152
- 6.12 เหล็กทำลูกปืน : Bearing Steels = AISI 52100 (SUJ2) 154
- 6.13 เหล็กทำวาล์ว : Valve Steel = JIS SUH 3 156
- 6.14 การเลือกเหล็กเครื่องมือ 157
 - แบบฝึกหัด 160

ภาคผนวก 162

ภาคผนวก ก การสร้างเฟสไดอะแกรมแบบต่าง ๆ 163

ภาคผนวก ข การชุบแข็งเหล็กกล้าโดยทั่ว ๆ ไป 180

บรรณานุกรม 233

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ

1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ (Physical Property) เป็นคุณสมบัติของวัสดุเมื่อไม่มีแรงภายนอก (External Force) เข้ามากระทำ

1. มวลและน้ำหนัก

มวล คือ เนื้อของวัสดุซึ่งจะมีค่าคงที่เสมอไม่ว่าจะอยู่ ณ ที่ใด มวลมีหน่วยเป็นกรัม กิโลกรัม และสแล็ค

น้ำหนัก คือ แรงที่โลกดึงดูดนั้น (เมื่อวัตถุอยู่บนโลก) แรงเป็นปริมาณเวกเตอร์ ขนาดของน้ำหนัก เป็น นิวตัน ไอนด์ เพานด์ตัน

จากกฎของนิวตัน

$$W = MG$$

$$W = \text{น้ำหนัก}$$

$$M = \text{มวล}$$

$$G = \text{แรงโน้มถ่วงของโลก}$$

แรงโน้มถ่วงของโลก ณ จุดต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน ในการคำนวณจึงใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $32.2 \text{ ฟุต/วินาที}^2$ ในระบบอังกฤษ $9.81 \text{ เซนติเมตร/วินาที}^2$ ในระบบเมตริก $9.81 \text{ เมตร/วินาที}^2$ ในระบบเอสไอ

2. ความหนาแน่น

ความหนาแน่น คือ มวลของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$D = \frac{M}{V}$$

D = ความหนาแน่น

M = มวล

V = ปริมาตร

ตารางที่ 1.1 น้ำหนักเหล็กกลมโดยประมาณ

มม.	กก./1 เมตร	มม.	กก./1 เมตร	มม.	กก./1 เมตร
10	0.616	150	138.7	450	1247.9
12	0.887	155	148.0	475	1390.4
15	1.387	160	157.8	500	1540.6
16	1.578	165	167.8	525	1698.5
18	1.997	170	178.1	550	1864.1
20	2.465	175	188.7	575	2037.4
22	2.983	180	199.7	600	2218.4
25	3.851	185	210.9	625	2407.1
28	4.831	190	222.5	650	2603.6
30	5.546	195	234.3	675	2807.7
32	6.310	200	246.5	700	3019.5
35	7.549	210	271.8	725	3239.0
38	8.898	220	298.3	750	3466.3
40	9.86	225	312.0	775	3701.2
42	10.87	230	326.0	800	3943.8
45	12.48	240	354.9	825	4194.2
50	15.41	250	385.1	850	4452.2
55	18.64	260	416.6	875	4718.0
60	22.18	270	449.2	900	4991.4
65	26.04	275	466.0	950	5561.4
70	30.20	280	483.1	1000	6162.3
75	34.66	290	518.2	1050	6793.9
80	39.44	300	554.6	1100	7456.3
85	44.52	310	592.2	1150	8149.6
90	49.91	320	631.0	1200	8873.6
95	55.61	325	650.9		
100	61.62	330	671.1		
105	67.94	340	712.4		
110	74.56	350	754.9		
115	81.50	360	798.6		
120	88.74	370	843.6		
125	96.29	375	866.6		
130	104.1	380	889.8		
135	112.3	390	937.3		
140	120.8	400	986.0		
145	129.6	425	1113.1		

น้ำหนักเหล็กสี่เหลี่ยมและแบนโดยปริมาตร

$$\text{ใช้สูตร} \quad \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา} \times 0.007854 \times \frac{1}{1,000}$$

$$\text{ตัวอย่าง} \quad 200 \times 400 \times 25 \times 0.007854 \times \frac{1}{1,000}$$

$$1 \text{ เมตรหน้ก} = 15.7 \text{ กก.}$$

หมายเหตุ ความกว้าง ความยาว ความหนา หน่วยต้องคำนวณเป็นมิลลิเมตร

ในระบบเมตริกความหนาแน่นมีหน่วยเป็นกรัม/ซม.³ ในระบบอังกฤษมีหน่วยเป็นปอนด์/ฟุต³ และกิโลกรัม/เมตร³ ในระบบเอสไอ

3. ความถ่วงจำเพาะ (S.G.)

S.G. คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุกับน้ำหนักของสาร มาตรฐานที่มีปริมาตรเท่ากัน

$$S.G. = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุ}}{\text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}$$

สารมาตรฐานที่นิยมใช้กันมาก คือ น้ำที่อุณหภูมิ 4° C ซึ่งมีความหนาแน่น 62.5 ปอนด์/ฟุต³

$$S.G. = \frac{\text{น้ำหนักของวัสดุ}}{\text{น้ำหนักของน้ำ}}$$

$$S.G. = \frac{\text{ความหนาแน่นของวัสดุ}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

ในระบบเมตริก ค่าความหนาแน่นของน้ำมีค่า 1 กรัม/ซม.³ ดังนั้นในระบบเมตริก S.G. ของวัสดุจะเท่ากับค่าความหนาแน่นของวัสดุในระบบเมตริก

4. อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปริมาณซึ่งเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกที่อยู่ในภาวะสมดุล การวัดอุณหภูมิมีหลายสเกล ที่นิยมใช้กันคือเซลเซียส (°C) กับฟาเรนไฮต์ (°F) ทั้งสองสเกลสามารถเปลี่ยน-แปรผันกันได้โดยใช้สมการ

$$C = 5/9 (F - 32)$$

$$F = 9/5 (C + 32)$$

ตารางที่ 1.2 ความหนาแน่นของโลหะบางชนิด

โลหะ	ความหนาแน่น
Platinum	21.5
Gold	19.25
Lead	11.3
Silver	10.5
Copper	8.8
Brass	8.4
Iron	7.8
Zinc	7.15
Aluminum	2.7

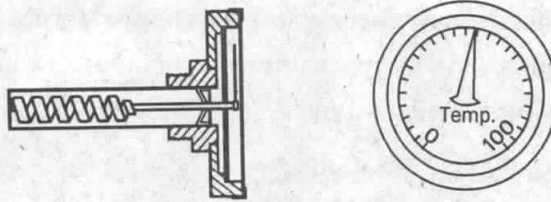
4.1 การวัดอุณหภูมิโดยการสังเกตสีของโลหะนั้น การวัดอุณหภูมินี้เป็นการประมาณอุณหภูมิอย่างหยาบ ๆ โดยสังเกตสีของชิ้นงานนั้นในขณะที่ได้รับความร้อนจนมีสีแดงหรือสีอื่น ๆ ดังตาราง 1.3

ตารางที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงสีของโลหะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สี	อุณหภูมิ (°F)	อุณหภูมิ (°C)
Faint Red	950	510
Dark Red	1,150	615
Dark Cherry	1,175	630
Cherry Red	1,300	697
Bright Cherry	1,475	793
Dark Orange	1,650	890
Orange	1,750	945
Yellow	1,800	972

4.2 เทอร์โมมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิในระดับต่ำกว่า 950°F (510°C) ที่ใช้งานอุตสาหกรรม มีหลายชนิดดังนี้

ก. ชนิดอาศัยการขยายตัวของโลหะ (Metal Expansion) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ทำงานด้วยหลักการของการขยายตัวของแผ่นโลหะ 2 แผ่น ซึ่งมีอัตราการขยายตัวไม่เท่ากันมาทำคอยล์ โดยยึดปลายข้างหนึ่งอยู่กับที่ ดังรูป 1.1



รูป 1.1 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดการขยายตัวของโลหะ

เมื่อได้รับความร้อน ขดลวดโลหะจะขยายตัวทำให้เข็มเคลื่อนที่ไปบนหน้าปัดที่มีสเกลบอก การเคลื่อนที่ของเข็มนั้นจะเคลื่อนที่ในเชิงมุมของการขยายตัวในโลหะ 2 ชนิด ชนิดหนึ่งจะขยายตัวได้สูง แต่อีกชนิดหนึ่งขยายตัวต่ำมาก โลหะทั้ง 2 ชนิดนี้เรียกว่า Bimetallic โดยจะมีโลหะชนิดหนึ่งที่มีอัตราการขยายตัวคงที่ได้แก่ Yellow Brass ส่วนโลหะที่มีการขยายตัวสูง ได้แก่ นิเกิลผสม ซึ่งสามารถวัดได้ตั้งแต่ -100 ถึง $1,000^{\circ}\text{F}$ (-75 ถึง 532°C)

ข. ชนิดการขยายตัวของของเหลว (Liquid Expansion) เครื่องมือวัดอุณหภูมิของการอุตสาหกรรมโดยการใช้ของเหลวนี้ อาศัยหลักการขยายตัวของของเหลวหรือก๊าซเป็นหลัก ดังหลักการทำงานในรูป 1.2

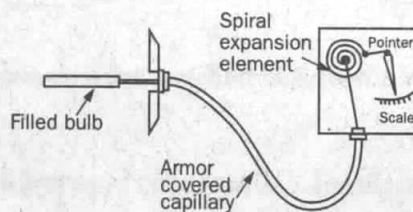
ของเหลวที่บรรจุอยู่ในกระเปาะและเบอร์ตัน เป็นของเหลวชนิดที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือเมอร์คิวรี เพื่อความเหมาะสมในการวัดอุณหภูมิ เราสามารถเปลี่ยนหลอดกระเปาะ หรือเบอร์ตันได้ดังรูป 1.3 ของเหลวที่นิยมนำมาใช้วัดอุณหภูมิ ได้แก่

เมอร์คิวรี ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -35 ถึง $+950^{\circ}\text{F}$ (-20 , $+510^{\circ}\text{C}$)

แอลกอฮอล์ ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -110 ถึง $+160^{\circ}\text{F}$ (-78 , -70°C)

เพนเทน ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ $+330$ ถึง $+85^{\circ}\text{F}$ ($+165$, $+30^{\circ}\text{C}$)

ครีโอลอสร์ ใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ $+20$ ถึง $+400^{\circ}\text{F}$ (-6 , $+202^{\circ}\text{C}$)



รูป 1.2 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดใช้ของเหลว

ค. ความดันของแก๊สหรือไอน้ำ

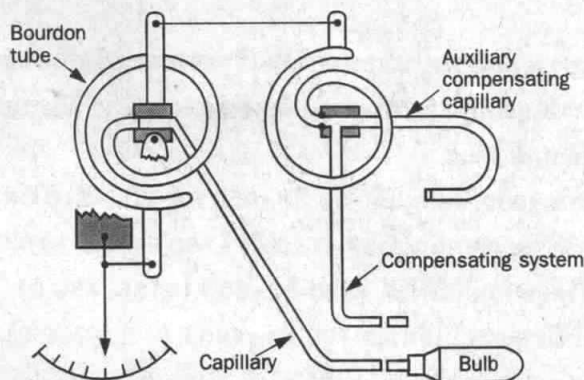
เป็นเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดในงานอุตสาหกรรมที่อาศัยหลักการของความดันของก๊าซ,ไอ เมื่อได้รับความร้อน อุณหภูมิที่ถูกลำมาไว้วัด ใช้ได้ตั้งแต่ -60 ถึง $+500^{\circ}\text{F}$ ($-50, +250^{\circ}\text{C}$) ของเหลวที่ถูกลำมาไว้ได้แก่ เมทิลคลอไรด์ อีเทอร์ เอทิลแอลกอฮอล์ และทอลูอิน (Toluene) เป็นต้น

ก๊าซเทอร์โมมิเตอร์มีหลักการเช่นเดียวกับไอน์เทอร์โมมิเตอร์ แต่ก๊าซที่ใช้เป็นไนโตรเจน ซึ่งมีช่วงใช้วัดอุณหภูมิตั้งแต่ -200 ถึง $+800^{\circ}\text{F}$ ($-125, +420^{\circ}\text{C}$)

การใช้เทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าววัดอุณหภูมิอุตสาหกรรมนั้นจะใช้กับงานอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังเช่น งานชุบเคลือบและการทำความสะอาดโลหะ งานชุบเย็นด้วยน้ำและน้ำมัน การปรับแต่งอุณหภูมิที่ต้องการเป็นศูนย์ในงานชุบเย็นของโลหะ

ง. อาศัยความต้านทาน เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมที่อาศัยหลักการความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยนำเอาตะกั่วทำเป็นตัวคอยล์แล้วบรรจุอยู่ในหลอดวัสดุทนไฟ แล้วมีคอยล์ของโลหะอีกชนิดหนึ่งเป็นความต้านทาน ใช้เป็นตัววัดอุณหภูมิ ทั้งเป็นคอยล์ความต้านทานที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือแพลตินัม นิกเกิล และทองแดง เหมาะสมกับอุณหภูมิระหว่าง $+150$ ถึง $+500^{\circ}\text{F}$ ($+65, +257^{\circ}\text{C}$) ส่วนลวดแพลตินัม ใช้ระหว่าง -350 ถึง $+1,100^{\circ}\text{F}$ ($-210, +587^{\circ}\text{C}$) เครื่องมือวัดชนิดนี้นิยมใช้ในห้องทดลองเป็นส่วนใหญ่ แต่มีบ้างที่ถูกลำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมบางประเภท

4.3 เทอร์โมอิเล็กทริกไพโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 950°F (500°C) ขึ้นไป และเป็นที่ยอมรับกันมากในงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าและโลหะวิทยา และการควบคุมอุณหภูมิ เพราะสามารถจะวัดอุณหภูมิได้ถึง $3,000^{\circ}\text{F}$ ($1,650^{\circ}\text{C}$) ดังรูป 1.3

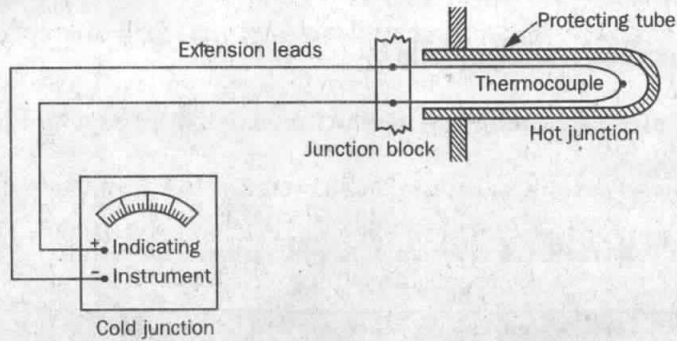


รูป 1.3 เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้การขยายตัวของของเหลว

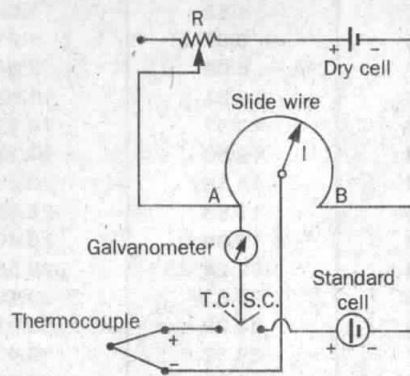
เทอร์โมอิเล็กทริกไพโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่อาศัยพลังงานความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า องค์ประกอบที่สำคัญของมันก็คือ

1. เทอร์โมคัปเปิล เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ทำด้วยโลหะหรือโลหะผสมชนิดที่ต่างกัน
2. จักร์ชั้นบล็อก เป็นเครื่องมือวัดภายนอกเตาถลุง
3. การขยายตัวของตะกั่ว เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิด้วยการขยายตัวของตะกั่ว
4. The indicating instrument or recorder เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สามารถบันทึก

อุณหภูมินั้นๆ ได้



รูป 1.4 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดใช้ความต้านทาน



รูป 1.5 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดใช้ความต้านทานอีกประเภทหนึ่ง

หลักการทำงานของไพโรมิเตอร์ มี 2 หลักการ คือ

หลักการของเพลเทียร์ (Peltier) ถ้าลวดโลหะ 2 ชนิดที่มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าไม่เท่ากันนำมาเชื่อมติดกันจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อมีอุณหภูมิ เพราะอัตราส่วนการผสมเคมีของโลหะนั้นจะเปลี่ยนไปทำให้มีการขยายตัวไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

หลักการของทอมสัน ถ้ามีอุณหภูมิขดลวดของโลหะที่บริสุทธิ์กับขดลวดของโลหะอีกชนิดหนึ่งซึ่งนำมาเชื่อมติดกัน โดยโลหะทั้งสองชนิดนี้จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ปลายขดลวดทั้งสอง โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF = Electromotive force) มีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อ่านค่าได้ที่สเกล

ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) เทอร์โมอิเล็กทริก ไพโรมิเตอร์บางที่เราเรียกว่า “Scebeck effect” เนื่องในผลบวกทางพีชคณิตของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นจุดรวมของความร้อนและความเย็นมาบรรจบกับเพลทีเยร์ อีเอ็มเอฟ และจากทอมสัน อีเอ็มเอฟที่ กล่าวถึงความยาวของขดลวดด้านทานที่ใช้วัดแรงเคลื่อน

ณ ที่อุณหภูมิเย็นของเครื่องมือวัดจะต้องรักษาอุณหภูมิคงที่ที่อับหรือ 32°F อยู่เสมอ และจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่มีความต้านทานเกิดขึ้น ดังตารางที่ 1.4

5. โลหะที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล

โลหะ 2 ชนิด ที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะถูกนำไปใช้วัดอุณหภูมิ โดยรวมปลายของโลหะทั้งสองเป็นจุดเดียวกัน

ตารางที่ 1.4 แสดงอุณหภูมิในการใช้งานของขดลวดด้านทาน

อุณหภูมิ		PT + 10%RH กับ แพลตินัม	โครเมล กับ อะลูเมล	เหล็ก กับ คอนสแตนแตน	ทองแดง กับ คอนสแตนแตน
°F	°C				
32	0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	37	0.221	1.52	1.94	1.517
200	91	0.595	3.82	4.91	3.967
300	147	1.017	6.09	7.94	6.647
400	202	1.474	8.31	11.03	9.525
500	257	1.956	10.57	14.12	12.575
600	312	2.548	12.80	17.18	15.773
700	367	2.977	15.18	20.25	19.100
800	422	3.506	17.53	23.32	
900	477	4.046	19.89	26.40	
1000	532	4.596	22.26	29.52	
1100	587	5.156	24.63	32.72	
1200	642	5.726	26.98	36.01	
1300	697	6.307	29.32	39.43	
1400	752	6.897	31.65	42.96	
1500	807	7.498	33.93	46.53	
1600	862	8.110	36.19	50.05	
1700	917	8.732	38.43		
1800	972	9.365	40.62		
1900	1027	10.009	42.78		
2000	1082	10.662	44.91		
2100	1137	11.323	47.00		
2200	1192	11.989	49.05		
2300	1247	12.657	51.05		
2400	1302	13.325	53.01		
2500	1357	13.991			
2600	1412	14.656			
2700	1467	15.319			
2800	1522	15.797			
2900	1577	16.637			
300	1632	17.292			

5.1 โครเมิล-อะลูเมิล โครเมียมเป็นโลหะผสม 90% Ni, 10% Cr, อะลูเมิลเป็นโลหะผสม 94% Ni 3% Mn 2% Al 1% Si เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะทนต่อการเติมออกซิเจน จะถูกใช้วัดอุณหภูมิระหว่าง $1,200 - 2,200^{\circ}\text{F}$ ($650 - 1,200^{\circ}\text{C}$)

5.2 เหล็ก-คอนสแตนแตน โลหะคอนสแตนแตนเป็นโลหะผสม 54% Cu 46% Ni ใช้วัดในช่วงระหว่าง $300 - 1,400^{\circ}\text{F}$ ($145 - 750^{\circ}\text{C}$) เป็นเครื่องมือวัดที่มีราคาถูก มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงและใช้ได้ทุกบรรยากาศ

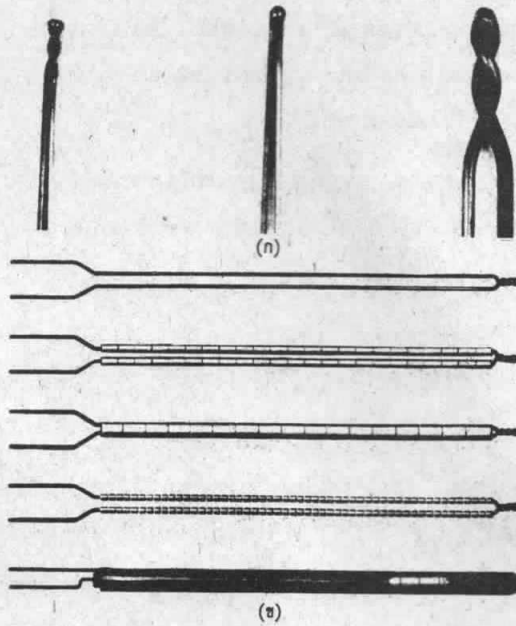
5.3 ทองแดง-คอนสแตนแตน โลหะชนิดนี้เป็นโลหะผสมที่ใช้ทองแดงเป็นตัวหลัก จะมีเหล็กผสมและแมงกานีสผสมอยู่บ้างเพียงเล็กน้อย นิยมใช้วัดในอุณหภูมิต่ำตั้งแต่ -420°F ถึงสูงสุด 600°F ($250 - 300^{\circ}\text{C}$)

5.4 พลาตินัม 10% โรเดียม-พลาตินัม มีชื่อเรียกว่า "Nobel-Metal" ใช้วัดอุณหภูมิในงานโลหะวิทยาเบื้องต้น เพราะต้องใช้อุณหภูมิในการถลุงสูง เทอร์โมคัปเบิลชนิดนี้สเกลวัดอาจจะเป็นการวัดด้วยรังสี (Radiation) หรือวัดด้วยการส่งกลอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งสามารถวัดงานได้ติดต่อกันตลอดเวลา ช่วงของการวัดตั้งแต่ $32^{\circ}\text{F} - 3,000^{\circ}\text{F}$ ($0 - 1,600^{\circ}\text{C}$)

เทอร์โมคัปเบิลที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมินั้น ที่ปลายสุดของมันจะถูกตัดตามความเหมาะสมและที่ปลายอาจจะบิดตัวเป็นเกลียว 2 รอบ หรืออาจเชื่อมติดกันโดยตรงปลายทำเป็นหัวมนเอาไว้ ดังรูป 1.6 ขดลวดที่ถูกนำมาทำเป็นตัววัดจะต้องมีกระเบื้องทนไฟเป็นฉนวนหุ้มเอาไว้ ตัวฉนวนนั้นบางทีก็ทำด้วยเซรามิกหรือโลหะทนไฟ ซึ่งจะเป็นเครื่องป้องกัน ดังเช่น ไพโรมิเตอร์ ที่ใช้วัดอุณหภูมิในการถลุงเหล็กอ่อนหรือเหล็กหล่อ ซึ่งใช้อุณหภูมิ $1,300^{\circ}\text{F}$ (700°C) จะผสมด้วย 14% Cr เหล็ก ถ้าใช้วัดถึง $1,500^{\circ}\text{F}$ (800°C) ผสม 28% Cr เหล็กหรือนิกโครม ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง $2,000^{\circ}\text{F}$ ($1,080^{\circ}\text{C}$) ถ้าใช้กับอุณหภูมิเกินกว่า $2,000^{\circ}\text{F}$ แล้วจะใช้กระเบื้องหรือซิลิกอนคาร์ไบด์

5.5 เรดิโอฮันไพโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการแผ่รังสีของธาตุ ใช้วัดอุณหภูมิตั้งแต่ $1,000^{\circ}\text{F}$ ขึ้นไป (500°C)

5.6 ออฟดิคอลไพโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างที่แผ่ออกมากับ Standard Source แบบที่นิยมใช้กันมาก คือ Disapering Filament ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ชิ้นประกอบกัน คือ เทลส์สโคปและคอลโทรลลิ่ง ดังรูป 1.6



รูป 1.6 (ก) เทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ
(ข) ชนิดของตัวกระเบื้องกันความร้อนชนิดต่าง ๆ

1.2 ความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมของระบบ เมื่อระบบกับสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิต่างกัน ปริมาณความร้อนวัดเป็น บีทียู ในระบบอังกฤษ กิโลแคลอรี ในระบบเมตริก และจูลในระบบเอสไอ

ความร้อน 1 กิโลแคลอรี คือ ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 14.5°C เป็น 15.5°C

ความร้อน 1 บีทียู คือ ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 63°F (17°C)

ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของวัสดุเรียกว่า “ความร้อนจำเพาะ” (Specific Heat)

ตารางที่ 1.5 ความร้อนจำเพาะของโลหะบางชนิด

โลหะ	S.H. (Cal / Gm°C)
อะลูมิเนียม	0.215
คาร์บอน	0.121
ทองแดง	0.0923
ตะกั่ว	0.0305
เงิน	0.0564
ทังสเตน	0.0321

แบบฝึกหัด

คำสั่ง จงทำเครื่องหมาย x ทับบนข้อที่ถูกต้องที่สุด

1. โลหะที่ผ่านกระบวนการแปรรูปและใช้งานมาแล้ว เมื่อถูกนำกลับมาใช้อีก เราเรียกวัดชนิดนี้ว่า

- | | |
|-----------------|------------------|
| 1. โลหะปฐมภูมิ | 2. โลหะทุติยภูมิ |
| 3. โลหะตติยภูมิ | 4. โลหะประติษฐ์ |

2. น้ำหนักของสารมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบหาความหนาแน่น

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. น้ำที่อุณหภูมิ 4°C | 2. น้ำที่อุณหภูมิห้อง |
| 3. สารละลายของน้ำที่ 4°C | 4. สารละลายของน้ำที่ 20°C |

3. การสังเกตสีของโลหะที่ถูกเผาให้ร้อนแดงจนเป็นสีเหลืองจะมีอุณหภูมิ

- | | |
|------------|------------|
| 1. 1,300°F | 2. 1,525°F |
| 3. 1,600°F | 4. 1,800°F |

4. การเปลี่ยนอุณหภูมิจากฟาเรนไฮต์เป็นองศาเซลเซียสใช้สูตรข้อใด

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. $\frac{5}{9}(F - 32)$ | 2. $\frac{9}{5}(C + 32)$ |
| 3. $\frac{5}{9}(C + 32)$ | 4. $\frac{9}{5}(F - 32)$ |

5. การวัดอุณหภูมิที่อาศัยการขยายตัวของโลหะใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่

- | | |
|-------------------|--------------------|
| 1. - 75°C - 532°C | 2. 75°C - 530°C |
| 3. 100°F - 950°F | 4. 200°F - 1,500°F |

6. ของเหลวที่นิยมนำมาทำเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดอุณหภูมิ ได้แก่

- | | |
|---------------|--------------|
| 1. แอลกอฮอล์ | 2. เพนเทล |
| 3. ครีโอลิสร์ | 4. ถูกทุกข้อ |

7. โลหะที่นิยมนำมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล เพื่อใช้วัดอุณหภูมิระหว่าง 650 - 1,200°C

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1. เหล็ก - คอนสแตนแตน | 2. ทองแดง - คอนสแตนแตน |
| 3. โครเมียม - อะลูเมล | 4. พลาตินัม - โรเดียม - พลาตินัม |

8. การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอุตสาหกรรมชนิดอยู่กับที่ ได้แก่

- | | |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1. การทดสอบด้วยแรงกด | 2. การทดสอบด้วยแรงกระแทก |
| 3. การทดสอบด้วยแรงเฉื่อย | 4. การทดสอบด้วยแรงหมุนหนีศูนย์กลาง |

9. การที่วัสดุยอมให้เกิดมีการเปลี่ยนรูปได้อย่างถาวร หมายถึงคุณสมบัติของข้อใด

- | | |
|---------------|----------------|
| 1. Elasticity | 2. Resillience |
| 3. Toughness | 4. Plasticity |

10. วัสดุที่ยอมให้มีการยืดตัวออกได้อย่างถาวร หมายถึงข้อใด

- | | |
|---------------|----------------|
| 1. ความเหนียว | 2. ความอ่อนตัว |
| 3. ความเปราะ | 4. ถูกทุกข้อ |

2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

2.1 คุณสมบัติทางกล

เป็นพฤติกรรมของโลหะที่แสดงออกเมื่อมีแรงมากระทำ การศึกษาเรื่องนี้กระทำได้นำชิ้นงานทดสอบมาตรฐานมาทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ เพื่อหาคุณสมบัติทางกล ซึ่งได้แก่ความแข็งแรงของวัสดุที่จะนำไปใช้งาน ความแข็ง ความอ่อนตัว ความยืดหยุ่น ความเปราะ และความเหนียว ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากสำหรับงานวิศวกรรมการออกแบบและการเลือกนำมาใช้งานให้เหมาะสม เพื่อให้ผลผลิตนั้นมีอายุการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง และคุณสมบัติเหล่านี้จะต้องมีการทดสอบโดยใช้แรงมากระทำ ซึ่งแบ่งออกได้ 3 แบบ

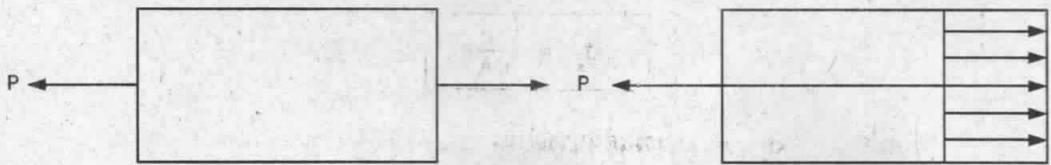
1. การทดสอบด้วยแรงอยู่กับที่ เป็นการทดสอบโดยใช้แรงที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบนั้นถูกแรงกระทำจนขาดจากกัน
2. การทดสอบด้วยแรงเคลื่อนที่ เป็นแรงที่กระทำในลักษณะช้า ๆ กัน จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน
3. การทดสอบด้วยแรงกระแทกหรืออิมแพคเทสต์ เป็นการทดสอบที่เพิ่มขนาดของแรงอย่างรวดเร็วต่อชิ้นงาน ในระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้ชิ้นงานทดสอบนั้นแตกหรือหัก

1. การทดสอบแบบแรงอยู่กับที่

โดยใช้แรงที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นขนาดของแรงขึ้นอย่างช้า ๆ มีหลายแบบ

1.1 ความเค้น (Stress) เป็นชื่อทั่ว ๆ ไปที่ใช้เรียกความเข้มของแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ เมื่อถูกแรงภายนอกมากระทำ โดยแรงภายในเนื้อวัสดุจะพยายามต้านทานการเปลี่ยนรูปของโลหะ ซึ่งมีอยู่หลายลักษณะ โดยขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ

- ความเค้นธรรมดา (Normal Stress) เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงกระทำที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน
- ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เป็นความเค้นที่เกิดจาก Tensile force



รูป 2.1 แสดงภาพของชิ้นงานเมื่อรับแรงดึง

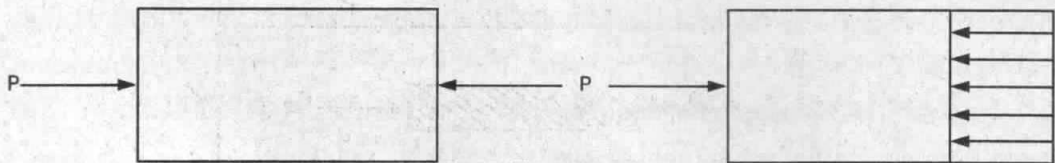
$$\sigma_t = \frac{P}{A}$$

เมื่อ σ_t = แรงเค้นดึง

P = แรงต้านภายใน

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ตั้งฉากกับแนวแรง

- ความเค้นแรงกด เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงกดต่อชิ้นงาน



รูป 2.2 แสดงภาพของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกด

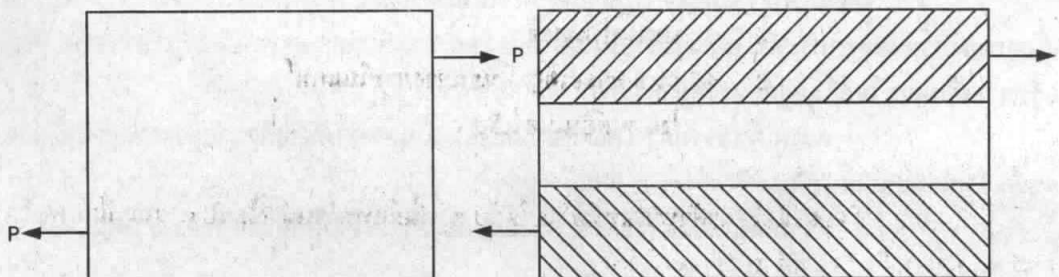
$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

เมื่อ σ_c = ความเค้นกด

P = แรงต้านภายใน

A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแนวแรง

- ความเค้นแรงเฉือน เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือนต่อชิ้นทดสอบ



รูป 2.3 แสดงภาพของชิ้นงานเมื่อได้รับความเค้นแรงเฉือน

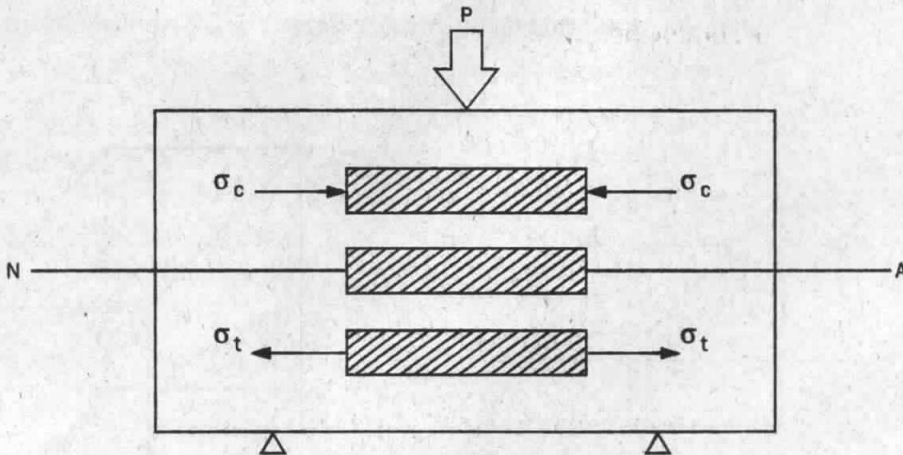
$$\sigma_s = \frac{P}{QA_s}$$

เมื่อ σ_s = ความเค้นแรงเฉือน
 Q = จำนวนพื้นที่หน้าตัด
 A_s = พื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแนวแรง

จากรูป $A\sigma_s = \frac{P}{1A_s}$ เป็น ซิงเกิล เชียร์สเตรส

จากรูป $\sigma_s = \frac{P}{2A_s}$ เป็น 2 เท่าของความเค้นแรงเฉือน

- ความเค้นแรงดัด (Bending Stress) เป็นความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงดัด

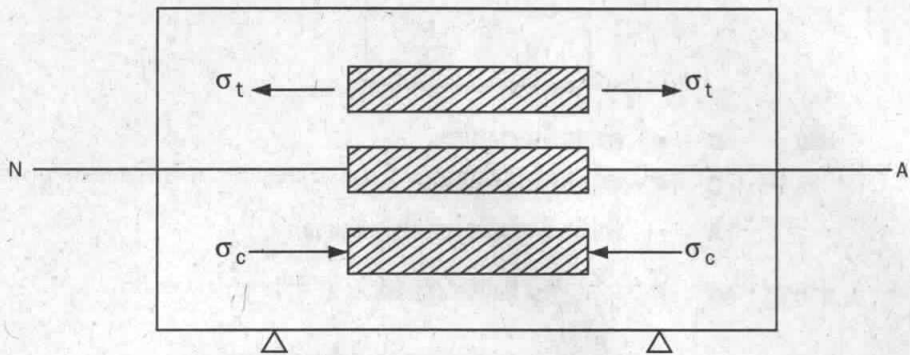


รูป 2.4 แสดงภาพของความเค้นแรงดัด

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

เมื่อ σ = ความเค้น อาจเป็น σ_c หรือ σ_t
 M = เบนดิงโมเมนต์
 C = ระยะทางจากจุดศูนย์กลางภายในแกน
 I = โมเมนต์อินเนอร์เซีย

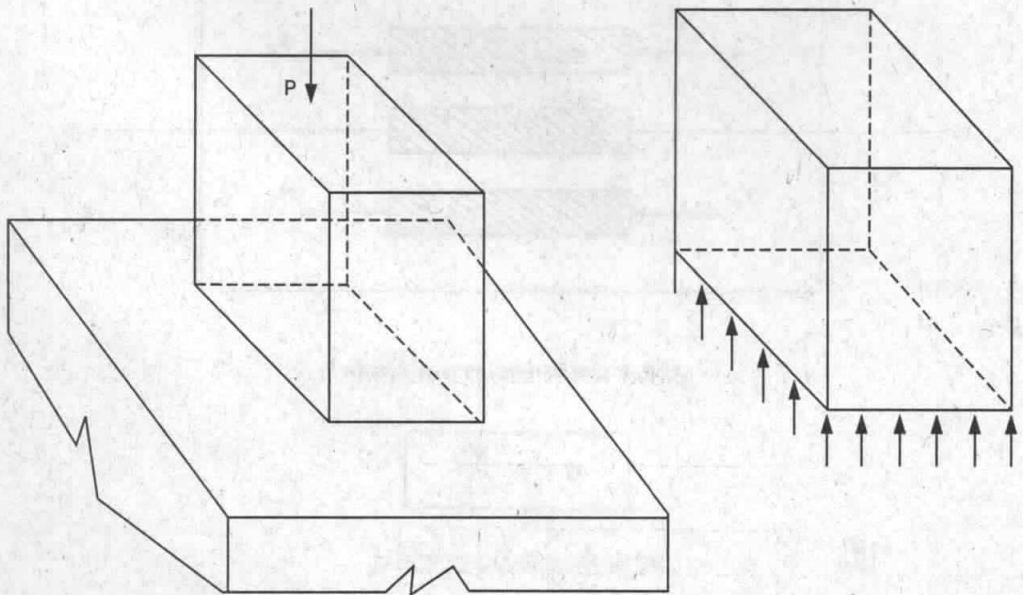
จากรูป 2.4 เนื้อโลหะด้านบนเหนือ NA ได้รับ σ_c เนื้อโลหะด้านล่างได้รับ σ_t และเนื้อโลหะในแนว NA ความเค้น (σ) มีค่าเท่ากับศูนย์



รูป 2.5 แสดงภาพของความเค้นแรงกด

จากรูป 2.5 เนื้อโลหะด้านบนเหนือ NA ได้รับความเค้นแรงดึง σ_t เนื้อโลหะด้านล่างได้รับความเค้นแรงกด σ_c เนื้อโลหะในแนวเส้น NA ความเค้นจะเป็นศูนย์

- ความเค้นแรงกดในขณะทำงาน (Bearing Stress) เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงกดที่กระทำต่อฐานรองรับ



รูป 2.6 ความเค้นแรงกด

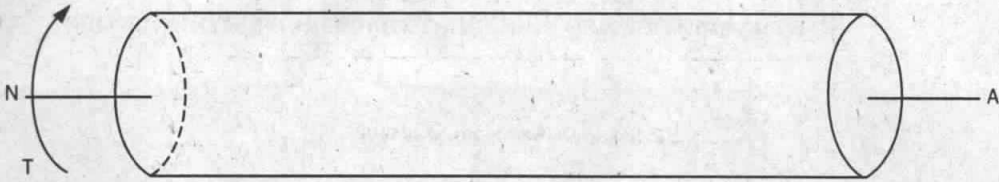
$$\sigma_b = \frac{P}{A_b}$$

เมื่อ σ_b = แบริ่ง สเตรส (Bearing Stress)

P = แรงแกด

A_b = พื้นที่ระหว่างชิ้นงานกับฐานรองรับ

- ความเค้นแรงบิด (Torsion Stress) เป็นความเค้นแรงบิดที่เกิดจากทอร์กกระทำต่อชิ้นงาน



รูป 2.7 แสดงถึงชิ้นงานเมื่อได้รับทอร์ก

$$\tau = \frac{TR}{J}$$

เมื่อ

τ $\equiv$ เชียร์สเตรส (Shear Stress)

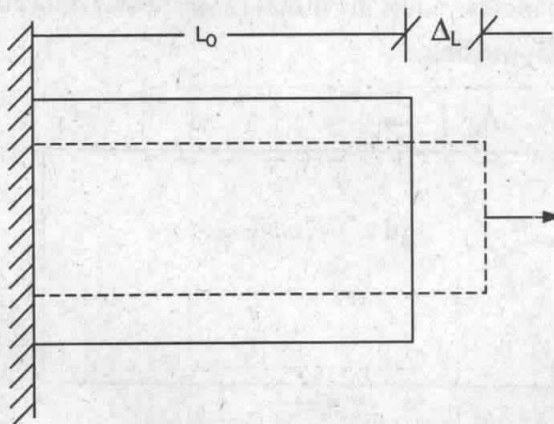
T = ทอร์ก (Torque)

R = รัศมีของเพลา (Radial of Shaft)

J = Polar Moment of Inertia โพลาร์โมเมนต์ของอินเนอร์เซีย

1.2 ความเครียด (Strain) หมายถึงความเครียดซึ่งจะปรากฏภายใต้แรงที่มากจะทำให้ส่วนของโลหะเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปจากเดิมก่อนที่จะได้รับแรง ความเครียดมี 3 ลักษณะของแรงที่มากกระทำ

- ความเครียดที่เกิดจากแรงดึง เป็นความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึง



รูป 2.8 แสดงการยืดตัวออกด้วยแรงดึง