บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ชุดทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโลหะจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงนี้อาศัยการเกิดปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนแสงผ่านสลิตเดี่ยว ดังนั้นในบทที่ 2 นี้ จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความร้อน อุณหภูมิ การถ่ายโอนพลังงานความร้อน การขยายตัวทางความร้อนของของแข็ง เครื่องมือและวิธีการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโลหะ การเลี้ยวเบนแสงผ่านสลิตเดี่ยว และสมบัติของโลหะที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียม ทองแดง และสแตนเลส เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างชุดการทดลองซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

2.1 ความร้อนและอุณหภูมิ [2 – 3]

ในด้านการศึกษาเกี่ยวกับความร้อน (heat) มีนักวิทยาศาสตร์อยู่ 2 ท่าน คือ เคาน์ รุมฟอร์ด (Count Rumford) และ ฮัมฟรีย์ เดวี (Humphry Davy) ที่เป็นผู้เปลี่ยนโฉมหน้าของทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อน จากความเชื่อที่ว่าความร้อนเป็นของไหล มาสู่ข้อเท็จจริงที่ว่าความร้อนเป็นพลังงาน เพราะมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและสนับสนุน ดังนี้

- เคาน์ รุมฟอร์ด แห่งบาวาเรีย พบว่าเกิดความร้อนขึ้นเป็นจำนวนมากจากการเจาะลำกล้องปืน และยิ่งสว่านทื่อมากเท่าใดความร้อนยิ่งเกิดมากขึ้นเท่านั้น เพราะต้องการออกแรงทำงานมากขึ้น
- ฮัมฟรีย์ เดวี นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ พบว่าเมื่อจับก้อนน้ำแข็งมาถูกันในภาชนะปิดที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนไว้อย่างดีแล้ว น้ำแข็งก็ยังละลายได้ และน้ำแข็งจะยิ่งละลายได้เร็วขึ้นถ้าออกแรงถูมากขึ้น

ทั้งสองท่านต่างก็มีความเห็นว่าความร้อนเกิดขึ้นจากงานที่ทำ และงานก็คือพลังงานรูปหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความร้อนเป็นพลังงาน ซึ่งอาจแปลงรูปมาจากพลังงานรูปอื่นหรือแปรเป็นพลังงานรูปอื่นได้

2.1.1 ความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เปลี่ยนมาจากพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล (พลังงานศักย์และพลังงานจลน์) พลังงานเคมี พลังงานนิวเคลียร์ หรืองาน เป็นต้น โดยการแปรรูปนั้นอาจเป็นการแปรรูปให้เห็นได้โดยง่าย หรือบางครั้งอาจจะต้องใช้เวลาพิจารณากันบ้างเล็กน้อย ในที่นี้จะกล่าวถึงแต่เพียงความร้อนที่พบเห็นเป็นประจำเพียง 3 แบบ คือ

1) ความร้อนจากเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงในที่นี้อาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ เช่น ถ่านที่ใช้ในการหุงต้มและถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงแข็ง น้ำมันก๊าดและน้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงเหลว และก๊าซหุงต้มเป็นก๊าซเชื้อเพลิง เป็นต้น

2) ความร้อนจากการเสียดทาน คำว่าความเสียดทานในที่นี้อาจมองได้ในแง่ของความฝืด เพราะฝืดมากก็ก่อให้เกิดความร้อนได้มาก ตัวอย่างความร้อนประเภทนี้มีจำนวนมาก เช่น ฤดูหนาวเราชอบถูมือเพื่อให้มือหายเย็น หรือสว่านร้อนเมื่อใช้เจาะฝาผนัง และต้องใช้น้ำหล่อเมื่อกลึงโลหะ แม้แต่เวลาตอกตะปู บางครั้งที่ไม่รู้สึกว่าร้อนเพราะความร้อนได้ถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมไปแล้ว แต่บางกรณีความร้อนถ่ายเทไม่ทันก่อให้เกิดไฟไหม้ดังเช่นเกิดไฟไหม้ป่าเมื่อมีพายุ เป็นต้น

3) ความร้อนจากการอัดก๊าซ เช่น สูบยางจักรยาน ในระยะแรกๆ ที่ยางยังอ่อนอยู่เราก็สูบง่าย และเบาแรงดี แต่พอยางแข็งขึ้นการสูบก็หนักแรงขึ้น เครื่องสูบลมที่สูบก็ร้อนขึ้นด้วย ความร้อนจำนวนนี้เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างลูกสูบกับกระบอกสูบส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากก๊าซถูกลูกสูบอัดซ้ำๆ กันหลายครั้ง จนมีความดันสูงขึ้น

พลังงานความร้อนมีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) ในระบบเอสไอ (SI) แต่บางครั้งอาจบอกเป็นหน่วยอื่นได้ เช่น แคลอรี (cal) และบีทียู (BTU) โดย 1 cal = 4.186 J และ 1 BTU = 252 cal = 1055 J ซึ่งพลังงานความร้อน 1 cal คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำมวล 1 g มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C ในช่วง 14.5 - 15.5 °C และพลังงานความร้อน 1 BTU คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำที่มีมวล 1 lb มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °F ในช่วง 58.1 - 59.1 °F

2.1.2 อุณหภูมิ

สสารทั้งหลายประกอบด้วยอะตอมรวมตัวกันเป็นโมเลกุล การเคลื่อนที่ของอะตอมหรือการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดรูปแบบของพลังงานจลน์ ซึ่งเรียกว่า ความร้อน อุณหภูมิ (temperature) หมายถึง การวัดค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ซึ่งเกิดขึ้นจากอะตอมแต่ละตัวหรือแต่ละโมเลกุลของสสาร เมื่อทำการให้พลังงานความร้อนแก่สสาร อะตอมจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น ทำให้สสารมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อทำการลดพลังงานความร้อน อะตอมจะเคลื่อนที่ช้าลง ทำให้อุณหภูมิของสสารลดต่ำลง การที่จะบอกว่าวัตถุใดร้อนมากหรือน้อยสามารถบอกได้ด้วยอุณหภูมิของวัตถุนั้น ถ้ามีวัตถุสองตัววางอยู่ในภาชนะที่เป็นฉนวนความร้อนอันเดียวกัน แต่วัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างกัน จะกล่าวว่าวัตถุทั้งสองอยู่ในสภาวะสัมผัสทางความร้อน (thermal contact) เมื่อการแลกเปลี่ยนพลังงาน

ความร้อนสิ้นสุดลง วัตถุทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน นั่นคือ วัตถุทั้งสองอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ โดยหน่วยของอุณหภูมิมีดังนี้

- **องศาฟาเรนไฮต์** ในปี ค.ศ.1714 กาเบรียล ฟาเรนไฮต์ (Gabrial Fahrenheit) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ประดิษฐ์เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งบรรจุปรอทไว้ในหลอดแก้ว เขาพยายามทำให้ปรอทลดต่ำสุด (0 ˚F) โดยใช้น้ำแข็งและเกลือผสมน้ำ และได้พิจารณาจุดหลอมละลายของน้ำแข็ง พบว่ามีค่าเท่ากับ 32 ˚F และจุดเดือดของน้ำเท่ากับ 212 ˚F

- **องศาเซลเซียส** ในปี ค.ศ.1742 แอนเดอส์ เซลเซียส (Anders Celsius) นักดาราศาสตร์ชาวสวีเดน ได้ออกแบบสเกลเทอร์โมมิเตอร์ให้อ่านได้ง่ายขึ้น โดยมีจุดหลอมละลายของน้ำแข็งเท่ากับ 0 ˚C และจุดเดือดของน้ำเท่ากับ 100 ˚C

- **เคลวิน (องศาสัมบูรณ์)** ในคริสต์ศตวรรษที่ 19 ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ผู้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและอุณหภูมิว่า ณ อุณหภูมิ -273 ˚C อะตอมของสสารจะไม่มีการเคลื่อนที่ และจะไม่มีสิ่งใดหนาวเย็นไปกว่านี้ได้อีก เขาจึงกำหนดให้ 0 K เท่ากับ -273 ˚C

2.1.3 ปริมาณความร้อนของวัตถุ

ปริมาณความร้อนของวัตถุ (Q) เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกไป ผลของความร้อนต่อสสารหรือวัตถุแบ่งได้ดังนี้

- **ความร้อนจำเพาะ** (specific heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง โดยยังคงสถานะเดิม

- **ความจุความร้อน** (heat capacity, C) คือ ความร้อนที่ทำให้สารทั้งหมดที่กำลังพิจารณามีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย โดยสถานะไม่เปลี่ยน

- **ความจุความร้อนจำเพาะ** (specific heat capacity, c) คือ ความร้อนที่ทำให้สสาร (วัตถุ) มวลหนึ่งหน่วย มีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งเคลวิน พิจารณาสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก T_1 เป็น T_2 และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว ปริมาณความร้อนที่สารได้รับมีค่าเท่ากับ

$$Q = mc\Delta T \quad (2.1)$$

กำหนดให้ Q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับ (J)

m = มวลของสสาร (วัตถุ) (kg)

c = ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg•K)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (K)

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความจุความร้อนจำเพาะของสาร

สาร	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg•K)
อะลูมิเนียม	0.896
น้ำแข็ง	1.38-2.1
ทอง	0.13
ทองแดง	0.381
เงิน	0.234
แก้ว	0.6-0.8
น้ำ	4.187
เอทานอล	2.428

- **ความร้อนแฝง** (latent heat) คือ พลังงานความร้อนที่เกี่ยวกับกระบวนการของการเปลี่ยนสถานะของสาร โดยที่อุณหภูมิของสารไม่เปลี่ยนแปลง
- **ความร้อนแฝงจำเพาะ** (specific latent heat, L) คือ ค่าความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลของสาร พิจารณาสารมวล m และมีความร้อนแฝงจำเพาะ L เมื่อเปลี่ยนสถานะจนหมดโดยมีการรับหรือคายพลังงานความร้อน Q จะได้

$$Q = mL \tag{2.2}$$

กำหนดให้ Q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือคายออกมา (J)

m = มวลของสสาร (วัตถุ) (kg)

L = ความร้อนแฝงจำเพาะ (J/kg)

ความร้อนแฝงจำเพาะของสารในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสาร สามารถแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่

1) ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลว (specific latent heat of fusion) เป็นกรณีที่สารชนิดหนึ่งเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ในทางกลับกันถ้าสารชนิดนั้นเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งก็จะเรียกว่า ความร้อนแฝงจำเพาะของการเป็นของแข็ง (specific latent heat of solidification) ของสาร

2) ความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอ (specific latent heat of vaporization) เป็นชื่อที่ใช้เรียกเมื่อสารชนิดหนึ่งเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ ในกระบวนการตรงกันข้ามเมื่อสารชนิดนี้เปลี่ยนสถานะจากก๊าซมาเป็นของเหลวก็จะเรียกว่า ความร้อนแฝงจำเพาะของการควบแน่น (specific latent heat of condensation) ของสาร

ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของสารแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนแผงจำเพาะของสาร

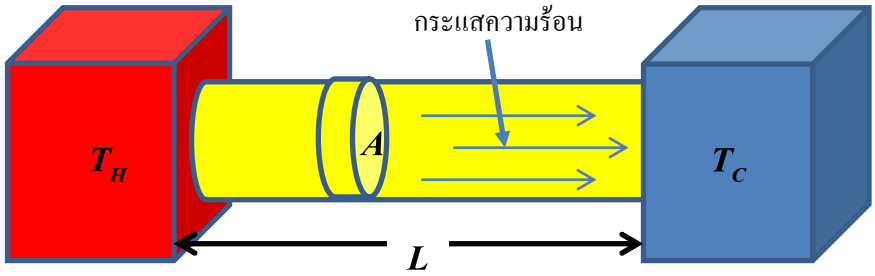
สาร	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
เอทานอล	108.9	857
แนพทาลีน	149	154.79
แอมโมเนีย	329.41	1376.47
น้ำ	334.8	2256
โซเดียมคลอไรด์	478.63	3538.46

2.2 การถ่ายโอนพลังงานความร้อน [2 – 3]

พลังงานความร้อนที่มีการถ่ายโอนมีหลายลักษณะ เช่น พลังงานความร้อนจากแท่งโลหะที่มีอุณหภูมิสูง ความร้อนจากน้ำและจากกระแสอากาศ ตลอดจนรังสีความร้อนจากหลอดไฟ นอกจากนี้พลังงานความร้อนก็ยังถ่ายโอนระหว่างตัวกลางหรือสารต่างๆ อยู่ตลอดเวลา โดยกรรมวิธีการถ่ายโอนพลังงานความร้อนจะสิ้นสุดได้ก็ต่อเมื่อมีสมดุลความร้อนเกิดขึ้น กลไกของการถ่ายโอนพลังงานความร้อนมีด้วยกัน 3 วิธี คือ การนำความร้อน (heat conduction) การพาความร้อน (heat convection) และการแผ่รังสี (radiation)

2.2.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนระหว่าง 2 ระบบ โดยผ่านตัวกลางอันหนึ่ง ซึ่งโดยปกติถือว่าไม่มีส่วนใดของตัวกลางเคลื่อนที่ไปกับพลังงานความร้อนของการถ่ายโอน แต่เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปสู่โมเลกุลหนึ่งซึ่งอยู่ติดกันไปเรื่อยๆ จากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ รูปที่ 2.1 แสดงแท่งวัตถุนำความร้อนที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A และยาว L ปลายด้านซ้ายของแท่งวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากับ T_H และปลายด้านขวาของแท่งวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากับ T_C ซึ่ง T_H มีอุณหภูมิสูงกว่า T_C ดังนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทจากปลายด้านซ้ายไปยังปลายด้านขวาของแท่งวัตถุ



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนในสภาพคงตัวเนื่องจากการนำความร้อนในแท่งวัตถุที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งแท่ง [2]

เมื่อความร้อน Q ถูกถ่ายโอนผ่านแท่งวัตถุในช่วงเวลา Δt อัตราการไหลของความร้อนจะมีค่าเท่ากับ $\frac{Q}{\Delta t}$ เรียกอัตรานี้ว่า กระแสความร้อน (heat current, H) กระแสความร้อนนี้แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ตัดขวาง A และผลต่างอุณหภูมิ $(T_H - T_C)$ และแปรผกผันกับความยาว L เรียกค่าคงตัวของการแปรผันนี้ว่า สภาพนำความร้อน (thermal conductivity, k) อัตรากระแสของความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$H = \frac{Q}{\Delta t} = kA\frac{T_H - T_C}{L} \tag{2.3}$$

กำหนดให้ H = กระแสความร้อน (J/S)

Q = พลังงานความร้อน (J)

t = เวลา (s)

A = พื้นที่ภาคตัดขวาง (m^2)

$T_H - T_C$ = ผลต่างของอุณหภูมิ (K)

L = ความยาว (m)

k = สภาพนำความร้อน (W/m-K)

สำหรับกรณีที่พิจารณาอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป dT ในช่วงความหนาน้อยยิ่ง (infinitesimal thickness) dx โดยมีเกรเดียนต์อุณหภูมิเป็น $\frac{dT}{dx}$ จะได้กฎการนำความร้อน (law of heat conduction) หรือบางทีเรียกว่ากฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's heat conduction law) ดังนี้

$$H = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \tag{2.4}$$

กำหนดให้ H = กระแสความร้อน (J/S)

k = สภาพนำความร้อน (W/m-K)

A = พื้นที่ภาคตัดขวาง (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ = เกรเดียนต์อุณหภูมิ (K/m)

2.2.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสสาร ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนจึงมักเกิดขึ้นในบรรยากาศและมหาสมุทร รวมทั้งภายในโลกและดวงอาทิตย์ การพาความร้อนแบ่งตามการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวกลางได้ 2 แบบ ดังนี้

- **การพาความร้อนอย่างอิสระ** เป็นการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่ไปเพราะมีความหนาแน่นต่างกัน เช่น การเกิดลม เป็นต้น

- **การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ** เป็นการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางถูกทำให้เคลื่อนที่โดยแรงภายนอก เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีเป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยมิต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานเหมือนกับการนำความร้อนและการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -273 °C หรือ 0 K ย่อมมีการแผ่รังสี โดยอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุเป็นไปตามสมการ

$$R = \sigma A e T^4 \tag{2.5}$$

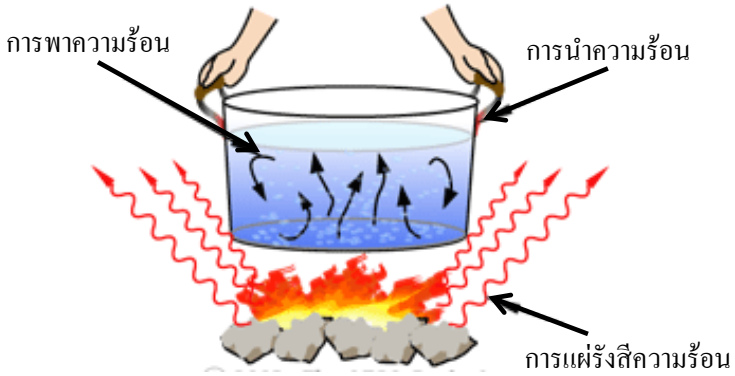
กำหนด R = อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิววัตถุ (W)

A = พื้นที่ภาคตัดขวาง (m^2)

σ = ค่าคงตัวชเตฟาน-โบลต์ซมันน์ = 5.6×10^{-8} ($W/m^2\text{-}K^4$)

e = สภาพเปล่งรังสี

T = อุณหภูมิ (K)



รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนพลังงานความร้อน [3]

รูปที่ 2.2 แสดงการแผ่รังสีจากกองไฟทำให้เกิดความร้อนที่ก้นหม้อน้ำด้านนอก โลหะทำให้เกิดการนำความร้อนเข้าสู่ภายในหม้อ ทำให้น้ำที่อยู่เบื้องล่างร้อนและขยายตัว เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นต่ำลงจึงลอยขึ้นสู่ข้างบน น้ำเย็นที่อยู่ด้านบนซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจึงเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ เมื่อน้ำเย็นที่เคลื่อนลงมาได้รับความร้อนเบื้องล่าง ก็จะลอยขึ้นหมุนวนเป็นวัฏจักรต่อเนื่องกันไป ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรการพาความร้อน (covection circulation)

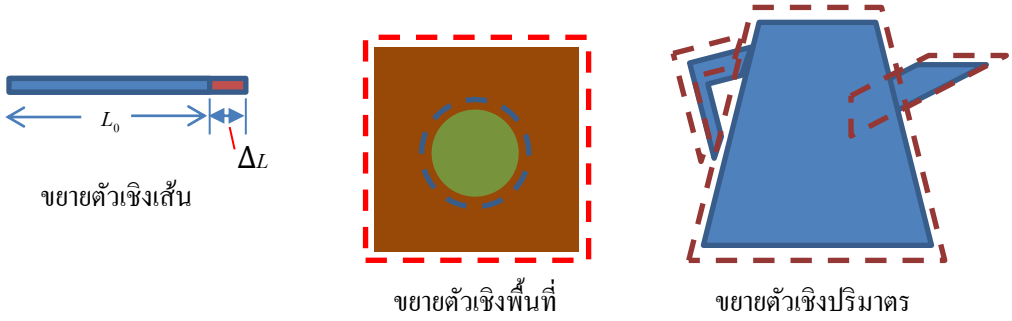
2.3 การขยายตัวทางความร้อนของของแข็ง [4]

วัตถุเมื่อได้รับความร้อน (อุณหภูมิเพิ่มขึ้น) จะขยายตัว ผลของการขยายตัวทางความร้อนจะทำให้ความยาวหรือพื้นที่ภาคตัดขวางหรือปริมาตรของวัตถุเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ในทางกลับกัน ถ้าวัตถุคายความร้อนออก (อุณหภูมิของวัตถุลดลง) วัตถุจะหดตัว ผลของการหดตัวทำให้ความยาวหรือพื้นที่ภาคตัดขวางหรือปริมาตรของวัตถุเปลี่ยนแปลงลดน้อยลง ยกตัวอย่างเช่น ตัวสะพานต้องมีข้อต่อและฐานรองรับพิเศษเผื่อไว้สำหรับกรณีที่วัตถุเกิดการขยายตัว และขวดที่มีน้ำเต็มและปิดฝาไว้แน่นจะร้าว เมื่อร้อน เป็นต้น โดยสมบัติที่สำคัญเกี่ยวกับการขยายตัวของของแข็งมีดังนี้

1) ของแข็งชนิดเดียวกันที่มีความยาวเริ่มต้นเท่ากัน เมื่อได้รับความร้อนและทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่าๆ กัน ก็จะมีส่วนขยายตัวเพิ่มขึ้นเท่ากัน หรือเมื่ออุณหภูมิลดลงในปริมาณที่เท่าๆ กันแล้วก็จะมีส่วนหดตัวลงเท่ากัน

2) ของแข็งต่างชนิดกันที่มีความยาวเริ่มต้นเท่ากัน เมื่อได้รับความร้อนและทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่าๆ กัน ก็จะมีส่วนขยายตัวเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน หรือเมื่ออุณหภูมิลดลงในปริมาณที่เท่าๆ กันแล้วก็จะมีส่วนหดตัวลงไม่เท่ากัน

การขยายตัวทางความร้อนของของแข็งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน และการขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบการขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น พื้นที่ และปริมาตรของโลหะตามลำดับ [4]

2.3.1 การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน

การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน คือ การที่วัตถุนั้นได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นแล้วเกิดการขยายตัวออกไปทางด้านใดด้านหนึ่งตามความยาว เช่น แท่งโลหะมีความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน คือ ความยาวของวัตถุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากความยาวเดิม L_0 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 องศา ยกตัวอย่าง เช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของทองแดงมีค่าเท่ากับ 17.7×10^{-6} $^{\circ}C^{-1}$ หมายความว่า ทองแดงยาว 1 m ที่อุณหภูมิ 0 $^{\circ}C$ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 1 $^{\circ}C$ จะมีความยาวเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 17.7×10^{-6} m

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะชนิดต่างๆ

วัสดุ	α (10^{-6} K^{-1})
อะลูมิเนียม	23.4
ทองแดง	17.7
สแตนเลส	15.1
ทองเหลือง	20.0
เหล็ก	12.0

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ กำหนดให้

วัตถุเดิมยาว L_0 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น T องศา มีความยาวเพิ่มขึ้น $L_T - L_0$ หน่วย

วัตถุเดิมยาว 1 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา มีความยาวเพิ่มขึ้น $\frac{L_T - L_0}{L_0 \cdot T}$ หน่วย

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนหรือ $\alpha = \frac{L_T - L_0}{L_0 \cdot T}$

$$\alpha = \frac{L_T - L_0}{L_0 \Delta T} = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \tag{2.6}$$

กำหนดให้ α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน (K^{-1})
ΔL = ความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (m)
L_0 = ความยาวเดิมของวัตถุ (m)
ΔT = อุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (K)

2.3.2 การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน

การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน คือ การที่พื้นที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งของวัตถุมีพื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะแผ่นบางมีพื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อร้อนขึ้น

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน (coefficient of area thermal expansion) คือ พื้นที่ของวัตถุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากพื้นที่เดิม A_0 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 องศา ยกตัวอย่างเช่น สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อนของเหล็กกล้าแผ่นบางเท่ากับ 23.8×10^{-6} °C^{-1} หมายความว่า เหล็กกล้าแผ่นบางมีพื้นที่ผิวเดิม 1 m^2 ที่ 0 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 1 °C พื้นที่ของแผ่นเหล็กกล้าจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 2.38×10^{-6} m^2

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ กำหนดให้
วัตถุเดิมมีพื้นที่ A_0 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น T องศา มีพื้นที่เพิ่มขึ้น $A_T - A_0$ หน่วย
วัตถุเดิมมีพื้นที่ 1 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา มีพื้นที่เพิ่มขึ้น $\frac{A_T - A_0}{A_0 \cdot T}$ หน่วย
ดังนั้นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อนหรือ $\beta = \frac{A_T - A_0}{A_0 \cdot T}$

$$\beta = \frac{A_T - A_0}{A_0 \Delta T} = \frac{\Delta A}{A_0 \Delta T} = \frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial T} \tag{2.7}$$

กำหนดให้ β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่เนื่องจากความร้อน (K^{-1})
ΔA = พื้นที่ของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (m^2)
A_0 = พื้นที่เดิมของวัตถุ (m^2)
A_T = พื้นที่ของวัตถุ ณ อุณหภูมิใดๆ (m^2)
ΔT = อุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (K)

โดยที่ $A = L^2$ แทนในสมการที่ (2.7) จะได้ $\beta = \frac{1}{L^2}\frac{\partial L^2}{\partial T} = \frac{1}{L^2}\left(\frac{\partial L^2}{\partial L}\cdot\frac{\partial L}{\partial T}\right) = \frac{2L}{L^2}\left(\frac{\partial L}{\partial T}\right) = 2\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)$

และเนื่องจาก $\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} = \frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}$ ดังนั้น

$$\beta = 2\alpha \tag{2.8}$$

2.3.3 การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน

การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน คือ การที่ปริมาตรของวัตถุทั้งก้อนเพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุได้รับความร้อน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน (coefficient of volumetric thermal expansion) คือ ปริมาตรของวัตถุที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากปริมาตรเดิม V_0 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย เมื่อวัตถุนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 องศา

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ กำหนดให้
วัตถุเดิมมีปริมาตร V_0 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น T องศา มีปริมาตรเพิ่มขึ้น $V_T - V_0$ หน่วย
วัตถุเดิมมีปริมาตร 1 หน่วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา มีปริมาตรเพิ่มขึ้น $\frac{V_T - V_0}{V_0 \cdot T}$ หน่วย
ดังนั้นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อนหรือ $\gamma = \frac{V_T - V_0}{V_0 \cdot T}$

$$\gamma = \frac{V_T - V_0}{V_0 \Delta T} = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T} = \frac{1}{V}\frac{\partial V}{\partial T} \tag{2.9}$$

กำหนดให้ γ = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรเนื่องจากความร้อน (K^{-1})
ΔV = ปริมาตรของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (m^3)
V_0 = ปริมาตรเดิมของวัตถุ (m^3)
V_T = ปริมาตรของวัตถุ ณ อุณหภูมิใดๆ
ΔT = อุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง (K)

โดยที่ $V = L^3$ แทนในสมการที่ (2.9) จะได้ $\gamma = \frac{1}{L^3}\frac{\partial L^3}{\partial T} = \frac{1}{L^3}\left(\frac{\partial L^3}{\partial L}\cdot\frac{\partial L}{\partial T}\right) = \frac{3L^2}{L^3}\left(\frac{\partial L}{\partial T}\right) = 3\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}\right)$

และเนื่องจาก $\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} = \frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial T}$ ดังนั้น

$$\gamma = 3\alpha \tag{2.10}$$

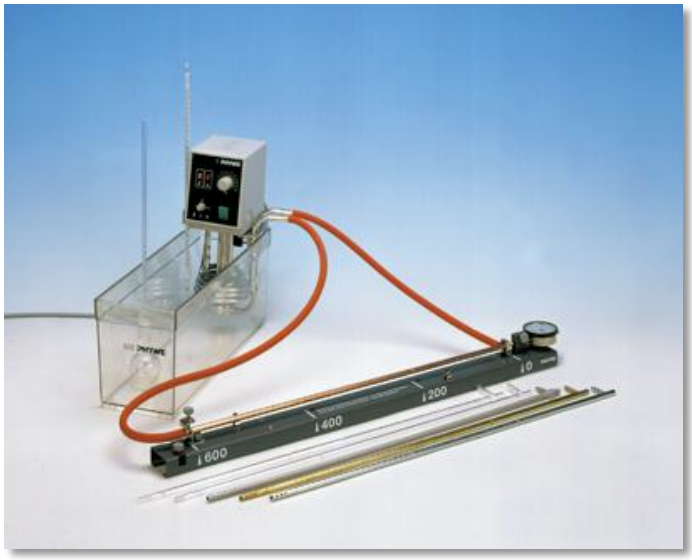
2.4 เทคนิคและการทดลองที่เกี่ยวกับหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโลหะ

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะ มีความจำเป็นต่อการนำมาพิจารณาในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม การสร้างเครื่องมือ การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมต่องานต่างๆ จึงมีการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการหาค่านี้ด้วยวิธีและเทคนิคต่างๆ อย่างหลากหลาย อีกทั้งยังมีการสร้างชุดการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะนำมาขายให้แก่โรงเรียน มหาวิทยาลัย และหน่วยงานทางการศึกษา เพื่อนำไปประกอบกับกระบวนการจัดการเรียนการสอนให้แก่นักเรียนและนักศึกษาจะได้เห็นภาพจริงของการขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะ ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างเป็นมาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าวิธีการและเทคนิคที่นิยมใช้โดยทั่วไปจากชุดทดลองและเครื่องมือที่มีขายตามท้องตลาดของบริษัทชั้นนำ ได้แก่ PHYWE, Lambda และ NETZSCH รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างชุดทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในศึกษาและออกแบบชุดทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะที่ทางผู้วิจัยสร้างขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยขอนำเสนอวิธีการการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะที่ทำการค้นคว้ามาดังต่อไปนี้

2.4.1 ชุดการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้เกจวัดความยาว [5-6]

- **หลักการของชุดการทดลอง**

จากรูปที่ 2.4 แสดงชุดการทดลองที่อาศัยเกจวัดความยาวเป็นเครื่องมือในการวัดความยาวของแท่งโลหะที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ ชุดการทดลองประกอบด้วย แท่งโลหะที่จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดน้ำร้อนซึ่งจะส่งผ่านน้ำร้อนให้เคลื่อนที่สู่แท่งโลหะทำให้อุณหภูมิของแท่งโลหะเพิ่มขึ้น ปลายแท่งโลหะจะต่อเข้ากับเกจวัดความยาว เริ่มต้นแท่งโลหะจะสัมผัสเกจวัดความยาวที่ตั้งค่าไว้ที่ศูนย์ ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อแท่งโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้แท่งโลหะขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น แท่งโลหะที่ขยายตัวนี้จะไปดันเกจวัดความยาวให้มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งก็คือค่าความยาวของแท่งโลหะที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นสามารถนำค่าความยาวของแท่งโลหะที่เปลี่ยนไปมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของแท่งโลหะได้



รูปที่ 2.4 ชุดการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้เกจวัดความยาว (PHYWE) [5]

รูปที่ 2.5 ชุดเครื่องมือหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้เกจวัดความยาว (Lambda) [6]

จากรูปที่ 2.5 แสดงชุดเครื่องมือที่อาศัยเกจวัดความยาวเป็นเครื่องมือในการวัดความยาวของแท่งโลหะที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ ชุดเครื่องมือนี้ประกอบด้วยแท่งโลหะที่จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นถูกนำใส่เข้าไปภายในท่อทรงกระบอกโดยปลายด้านหนึ่งถูกยึดอยู่กับฐาน และปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อเข้ากับเกจวัดความยาว โดยที่ท่อทรงกระบอกจะเป็นพื้นที่กักความร้อนที่แท่งโลหะจะได้รับจาก

แหล่งกำเนิดความร้อนแบบใช้ไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดความร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิได้ 0 – 80 °C และต่อกับเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ เริ่มต้นแท่งโลหะจะสัมผัสเกจวัดความยาวที่ตั้งค่าไว้ที่ศูนย์ ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อแท่งโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้แท่งโลหะขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้น แท่งโลหะที่ขยายตัวนี้จะไปดันเกจวัดความยาวให้มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งก็คือค่าความยาวของแท่งโลหะที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นสามารถนำค่าความยาวของแท่งโลหะที่เปลี่ยนไปมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนของแท่งโลหะได้

- **ลักษณะการใช้งานเกจวัดความยาว**

- วัดความยาวของโลหะที่เปลี่ยนไป
- ความละเอียดในการวัดอยู่ในช่วง 0.001 – 0.01 mm
- พิสัยในการวัดอยู่ในช่วง 5 – 20 mm
- ลักษณะของหัววัดต้องเลือกให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่จะทำการวัด
- หัววัดจะต้องสัมผัสกับชิ้นงานที่จะทำการวัด

- **ข้อดีของเกจวัดความยาว**

- ติดตั้งและใช้งานง่าย
- มีความเที่ยงตรงในการวัด
- มีความไวต่อการกดทับ และสัมผัสกับวัตถุ

- **ข้อด้อยของเกจวัดความยาว**

- ต้องเลือกหัววัดให้สัมพันธ์กับวัสดุที่จะทำการวัด
- ไม่ควรใช้แรงในการวัดหรือกดสัมผัสหัววัดมากเกินไป
- ต้องใช้อุปกรณ์จับยึด และมีข้อจำกัดในการใช้งานมาก
- มีราคาแพง ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงในการวัด

2.4.2 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน [7]

รูปที่ 2.6 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ (NETZSCH) [7]

- **หลักการของชุดเครื่องมือ**

จากรูปที่ 2.6 แสดงเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ (dilatometer) มีหลักการในการใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุกล่าวคือ นำชิ้นวัสดุที่ต้องการทดสอบมาตัดให้ได้ขนาดตามที่เครื่องมือกำหนดแล้วใส่เข้าไปในช่องสำหรับใส่ชิ้นวัสดุตัวอย่าง หลังจากนั้นเปิดเครื่องเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้กำหนดไว้ ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นชิ้นวัสดุตัวอย่างจะมีการขยายตัว เครื่องก็จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนให้ตามช่วงของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบ ช่วงอุณหภูมิที่เครื่องใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยปกติจะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1000 °C และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะอยู่ในช่วง 20 – 500 °C เพราะเป็นช่วงที่ไม่เกินอุณหภูมิของ quartz inversion ซึ่งอาจจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุแตกต่างกันไป

- **ลักษณะการใช้งานเครื่อง dilatometer**

- สามารถวัดได้ทั้งชิ้นงานดิบและชิ้นงานที่ผ่านการเผา
- ชิ้นงานที่ทำการวัดต้องตัดหรือทำให้มีขนาดตามที่เครื่องมือกำหนดไว้
- สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนทั้งเชิงเส้น เชิงพื้นที่ และเชิงปริมาตร

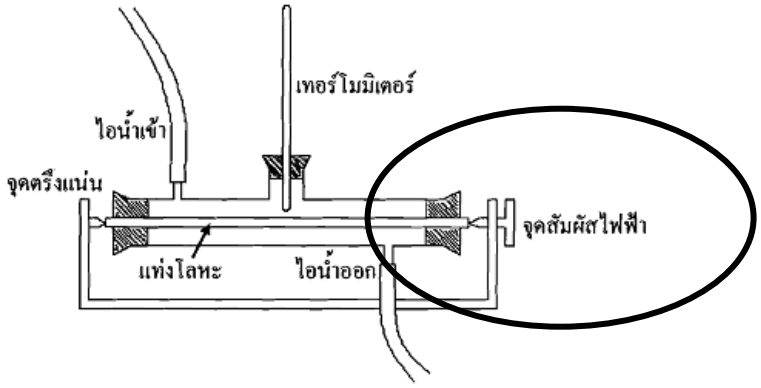
- **ข้อดีของเครื่อง dilatometer**

- ติดตั้งและใช้งานง่าย
- เครื่องมีความเที่ยงตรงในการวัดสูง
- สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุได้หลายชนิด เช่น โลหะ พลาสติก เซรามิก เป็นต้น

- **ข้อด้อยของเครื่อง dilatometer**

- เครื่องมือมีราคาสูง
- มีข้อจำกัดของขนาดชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบ
- ค่าใช้จ่ายในการใช้งานต่อการวัดสูง

2.4.3 ชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้จุดสัมผัสไฟฟ้า [8]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างชุดทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้จุดสัมผัสไฟฟ้า [8]

- **หลักการของชุดการทดลอง**

จากรูปที่ 2.7 ชุดทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้จุดสัมผัสไฟฟ้า (electrical contract) มีลักษณะการทำงาน กล่าวคือ การใช้หลักการของจุดสัมผัสไฟฟ้า เป็นเสมือนกับสวิตซ์ปิด – เปิด สัญญาณไฟฟ้า ในการนำมาใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะจำเป็นจะต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ อีก ได้แก่ โวลต์มิเตอร์ และไมโครมิเตอร์เพื่อใช้ในการวัด วิธีการวัดก็คือ เมื่อแท่งโลหะได้รับความร้อนจะขยายตัวออกและไปแตะกับจุดสัมผัสไฟฟ้า ทำให้เข็มของ

โวลต์มิเตอร์ขยับ หลังจากนั้นให้ทำการอ่าค่าจากไมโครมิเตอร์ที่จุดสัมผัสไฟฟ้า แล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ

- **ลักษณะการใช้งานจุดสัมผัสไฟฟ้า**

- เป็นสวิตซ์ระหว่างไมโครมิเตอร์กับแท่งโลหะ

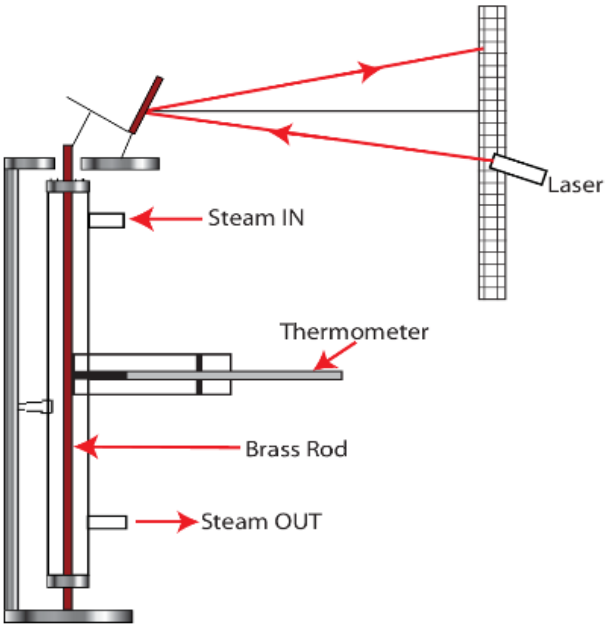
- **ข้อดีของการใช้งานจุดสัมผัสไฟฟ้า**

- มีความละเอียดในการวัดเนื่องจากใช้ไมโครมิเตอร์
- มีความไวต่อการสัมผัสระหว่างจุดสัมผัสไฟฟ้ากับโลหะทำให้เห็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้เร็ว

- **ข้อด้อยของจุดสัมผัสไฟฟ้า**

- มีความยุ่งยากในการติดตั้งชุดอุปกรณ์ เช่น ชุดให้ความร้อนโลหะ ชุดวัดการขยายตัวโดยระบบไฟฟ้า
- เครื่องมือที่ใช้ในชุดการทดลองมีราคาสูงขึ้นอยู่กับคุณภาพ

2.4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยสมบัติการสะท้อนของแสง [9]



รูปที่ 2.8 ชุดทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยสมบัติการสะท้อนของแสง [9]

- **หลักการของชุดการทดลอง**

จากรูปที่ 2.8 แสดงชุดทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะ ที่นำหลักการเรื่องการสะท้อนของแสงเข้ามาช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อน โดยจะทำการยึดแท่งโลหะไว้ด้านหนึ่ง แล้วอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับกระจกเงาราบที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนแสง เมื่อแท่งโลหะได้รับความร้อนจะขยายตัวแล้วจะไปดันให้กระจกเงาราบนั้นมีมุมเปลี่ยนไป แสงที่เดินทางมาจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกระจกเงาราบก็จะสะท้อนไปยังฉากรับ เมื่อโลหะขยายตัวมุมของกระจกเงาราบเปลี่ยนแปลงตามการขยายตัวของแท่งโลหะ ส่งผลให้ตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบกับฉากก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน โดยอาศัยกฎการสะท้อนของแสงและค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงระยะภาพที่เกิดบนฉาก สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อนได้

- **ลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์**

- แสงจะตกกระทบที่กระจกเงาราบแล้วสะท้อนไปยังฉากรับ
- เมื่อแท่งโลหะขยายตัวจะทำให้มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของแสงเปลี่ยนไป
- มีการให้ความร้อนเข้าและออกจากแท่งโลหะเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ

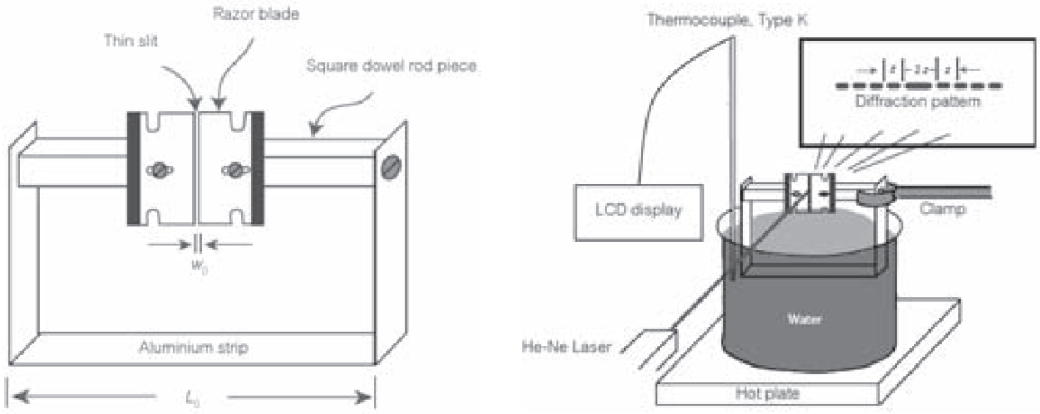
- **ข้อดีของการใช้งานของอุปกรณ์**

- เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อนอีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยการสะท้อนของแสง

- **ข้อด้อยของการใช้งานของอุปกรณ์**

- กระจกเงาราบอาจมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลต่อการสะท้อนของแสง ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้มาก
- การวัดอุณหภูมิมีการวัดเพียงแค่จุดเดียว ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ให้กับแท่งโลหะ
- ฐานในการยึดแท่งโลหะไม่มั่นคงส่งผลให้แท่งโลหะมีการขยับเมื่อทำการให้ความร้อนแก่ระบบ

2.4.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้สลิตเดี่ยว [10]



รูปที่ 2.9 ชุดทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้สลิตเดี่ยว [10]

- **หลักการของชุดการทดลอง**

จากรูปที่ 2.9 ชุดทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของโลหะโดยใช้สลิตเดี่ยว มีลักษณะการทำงาน กล่าวคือ เครื่องมือชุดนี้เป็นการอาศัยการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว เพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อน โดยเริ่มต้นจากการนำแผ่นโลหะมาทำการดัดให้เป็นรูปตัวยูฉากแบบสมมาตร แล้วทำขายึดติดกับใบมีดโกนสองใบให้เป็นสลิตเดี่ยว แล้วนำไปใส่ลงในภาชนะที่บรรจุน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อทำการฉายแสงไปยังสลิตเดี่ยวจะเกิดแผนภาพเลี้ยวเบนแสงขึ้นที่ฉาก ต่อมาเมื่อโลหะได้รับความร้อนจะขยายตัวออก ส่งผลให้ความกว้างของสลิตเดี่ยวเพิ่มขึ้นตามความยาวของโลหะที่เพิ่มขึ้น แผนภาพเลี้ยวเบนแสงที่เกิดขึ้นบนฉากก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน นำค่าที่ได้จากการวัดแถบการเลี้ยวเบนบนฉากไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อน

- **ลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์**

- แสงจะเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยวไปเกิดแผนภาพการเลี้ยวเบนบนฉาก
- เมื่อโลหะขยายตัวจะทำให้ความกว้างของสลิตเดี่ยวเปลี่ยนไป ส่งผลให้แผนภาพเกิดการเปลี่ยนแปลง
- การให้ความร้อนแก่โลหะโดยการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงสู่แท่งโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

- **ข้อดีของการใช้งานของอุปกรณ์**

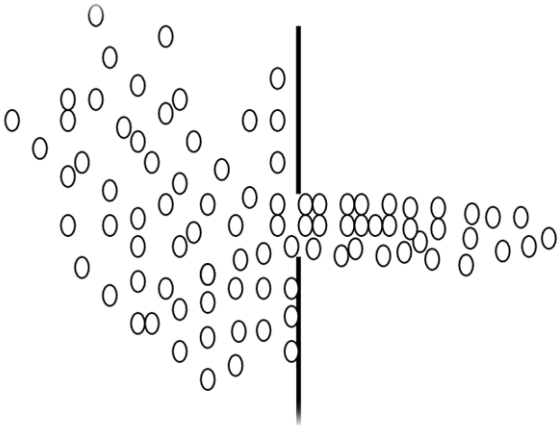
- เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเนื่องจากความร้อนอีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยสมบัติของแสง

- **ข้อด้อยของการใช้งานของอุปกรณ์**

- ต้องนำโลหะมาดัดเสียรูปร่าง
- ตัวจับใบมีดโกนอาจจะไม่ขนานกันเนื่องจากการดัดโลหะในข้างต้น ส่งผลต่อการเลี้ยวเบนแสงที่เกิดบนฉาก
- การจับยึดโลหะไม่มั่นคงส่งผลให้โลหะมีการขยับเมื่อทำการให้ความร้อนแก่ระบบ
- การวัดอุณหภูมิมีการวัดเพียงจุดเดียว ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่ให้กับแท่งโลหะ

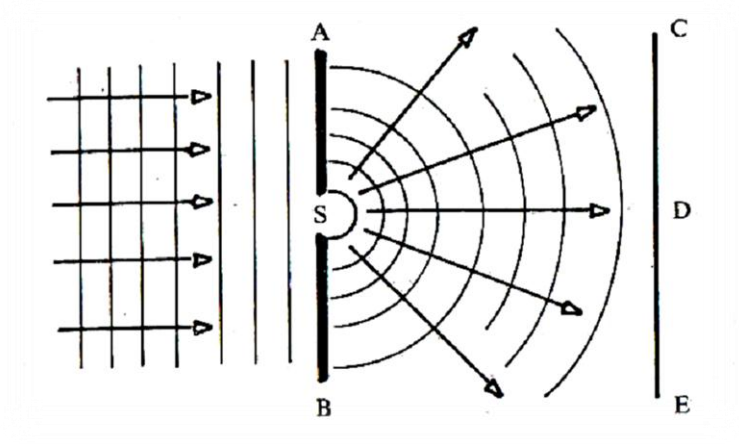
2.5 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตเดี่ยว [11 - 12]

ปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งของคลื่น คือ การเลี้ยวเบน (diffraction) การเลี้ยวเบนจะปรากฏให้เห็นเมื่อคลื่นถูกกีดขวาง สิ่งกีดขวางอาจเป็นฉากซึ่งมีรูเปิดเล็กๆ หรือช่องแคบที่จะปล่อยให้คลื่นผ่านไปได้ หรือเป็นวัตถุขนาดเล็ก เช่น ลวด หรือแผ่นกลม ซึ่งกั้นคลื่นบางส่วนไม่ให้ผ่านไป ถ้าเป็นกลุ่มอนุภาควิ่งมาชนฉากที่มีรูเปิดเล็กๆ ส่วนที่อยู่ตรงกับรูเปิดก็จะผ่านไปได้ และจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดิมโดยไม่ถูกรบกวน ส่วนอื่นจะถูกกั้นเอาไว้ หรือถ้าเอาวัตถุมาขวางทางเดินของอนุภาค มันจะกั้นเฉพาะอนุภาคส่วนที่มาชนกับวัตถุ อนุภาคส่วนอื่นๆ จะเคลื่อนที่ไปโดยไม่ถูกรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



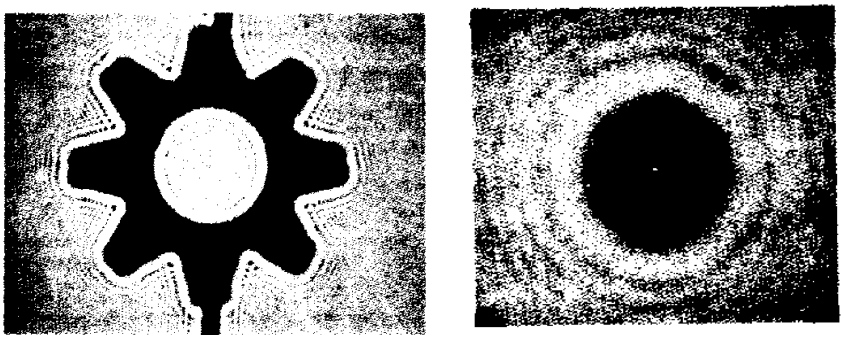
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านช่องแคบ [11]

อย่างไรก็ดีเราทราบจากประสบการณ์โดยเฉพาะในกรณีคลื่นเสียงและคลื่นบนผิวน้ำว่า คลื่นสามารถจะกระจายไปรอบๆ สิ่งกีดขวางได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์นี้จะยิ่งเด่นชัดขึ้นเมื่อขนาดของช่องแคบหรือสิ่งกีดขวางมีค่าเข้าใกล้ความยาวของช่วงคลื่น



รูปที่ 2.11 การเลี้ยวเบนของคลื่น [11]

แสงยังมีการเลี้ยวเบนรอบมุมของวัตถุทึบแสง ถ้าวางวัตถุทึบแสงไว้ระหว่างฉากกับจุดกำเนิดแสงที่สว่างมาก จะเห็นขอบของเงาวัตถุนั้นบนฉากพร่ามัวเป็นแถบมืดแถบสว่างสลับกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 ที่เป็นเช่นนี้เพราะแสงเกิดการเลี้ยวเบนทำให้เกิดการแทรกสอดเป็นแถบมืดและแถบสว่าง



(ก) วัตถุรูปดาว (ข) วัตถุทรงกลมตัน

รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านวัตถุทึบแสง [11]

จากรูปที่ 2.12 (ก) ถ้าให้แสงที่มีความสว่างมากผ่านวัตถุรูปดาว จะทำให้เกิดแถบมืดและแถบสว่างที่ขอบในและขอบนอกของรูปดาวปรากฏบนฉาก เพราะคลื่นแสงที่เลี้ยวเบนจากขอบในและขอบนอก

ของรูปดาวเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดแสงใหม่ จึงเกิดการแทรกสอดกันเองทำให้เกิดแถบสว่างและแถบมืดทั้งขอบนอกและขอบในของวัตถุรูปดาว

จากรูป 2.12 (ข) แสดงการเลี้ยวเบนของแสงโดยให้แสงที่มีความสว่างมากผ่านทรงกลมตัน ทำให้เกิดเงาของทรงกลมปรากฏบนฉาก และเกิดแถบมืดแถบสว่างที่ขอบเนื่องจากการเลี้ยวเบนของแสง ที่จุดศูนย์กลางของเงาทรงกลมจะเป็นจุดสว่าง เพราะแสงที่เลี้ยวเบนผ่านขอบของทรงกลมตันจะเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดใหม่ตามหลักการของฮอยเกนส์ จึงให้คลื่นแสงไปพบกันที่จุดศูนย์กลางของเงาทรงกลมบนฉาก ทำให้เกิดการแทรกสอดกันในลักษณะเสริมจึงเห็นเป็นจุดสว่างขึ้น

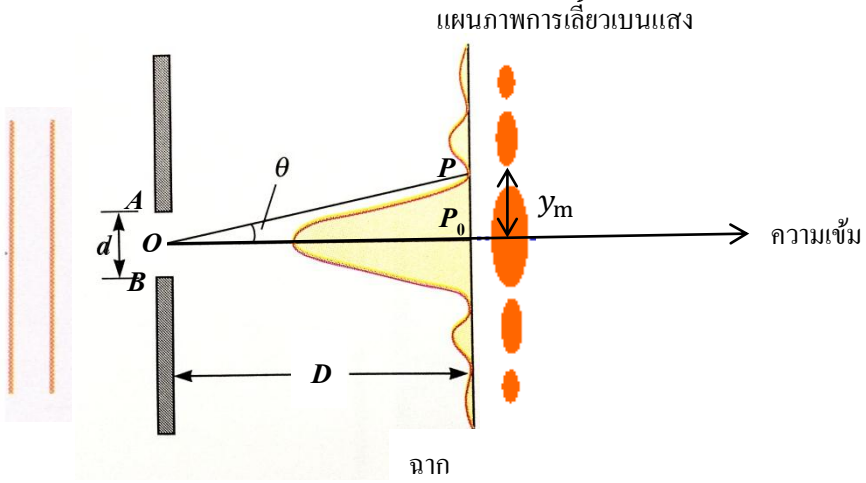
การแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ (double slit) ซึ่งทอมัส ยัง (Thomas Young) ได้ศึกษาว่าจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าแสงเคลื่อนที่ตามวิถีตรงจากช่องสลิตคู่ แท้จริงแล้วแสงได้แผ่ออกไปจากช่องแต่ละช่องในลักษณะของการเลี้ยวเบน โดยเปรียบเสมือนว่าช่องสลิตสองช่องนั้นเป็นแหล่งต้นทางแสงตามหลักของฮอยเกนส์ (Huygens' principle)

ในที่นี้จะกล่าวถึงปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องสลิตเดี่ยว แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของชุดรังสีที่ไปถึงฉากอันหนึ่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งการเกิดของแบบอย่างการเลี้ยวเบน

1) **การเลี้ยวเบนเฟรแนล (Fresnel diffraction)** เป็นการเลี้ยวเบนที่มีแบบอย่างเกิดขึ้นบนฉากอันหนึ่ง ณ ตำแหน่งซึ่งถือว่าอยู่ใกล้กับตำแหน่งของช่องเล็กยาวเดี่ยว โดยชุดรังสีที่ตกกระทบฉากอันดังกล่าวแล้วเกิดการแทรกสอดขึ้นนั้นมีลักษณะไม่เป็นลำขนาน การเลี้ยวเบนชนิดนี้เรียกกันตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส คือ โอกูสแตง – ชอง เฟรแนล (Augustin – Jean Fresnel "พ.ศ.2331 – 2370")

2) **การเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction)** ซึ่งเรียกตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน คือ โยเซฟ ฟอน เฟรานโฮเฟอร์ (Joseph von Fraunhofer "พ.ศ.2330 – 2369") แบบอย่างการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์เกิดขึ้นบนฉากอันหนึ่งที่ถือว่าอยู่ไกลจากช่องเล็กยาวเดี่ยวที่แสงผ่านมาก หรือไม่ก็จัดเลนส์นูนอันหนึ่งรับแสงจากช่องเล็กยาวเดี่ยวช่องนั้น เพื่อให้ชุดรังสีที่ไปถึงฉากอันดังกล่าวมีลักษณะเป็นลำขนาน

ในทางปฏิบัติมักใช้เลนส์นูนช่วยทำให้เป็นแสงขนานและช่วยลดระยะของฉาก โดยการย่นระยะภาพให้ใกล้เข้ามา



รูปที่ 2.13 แบบอย่างการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ [12]

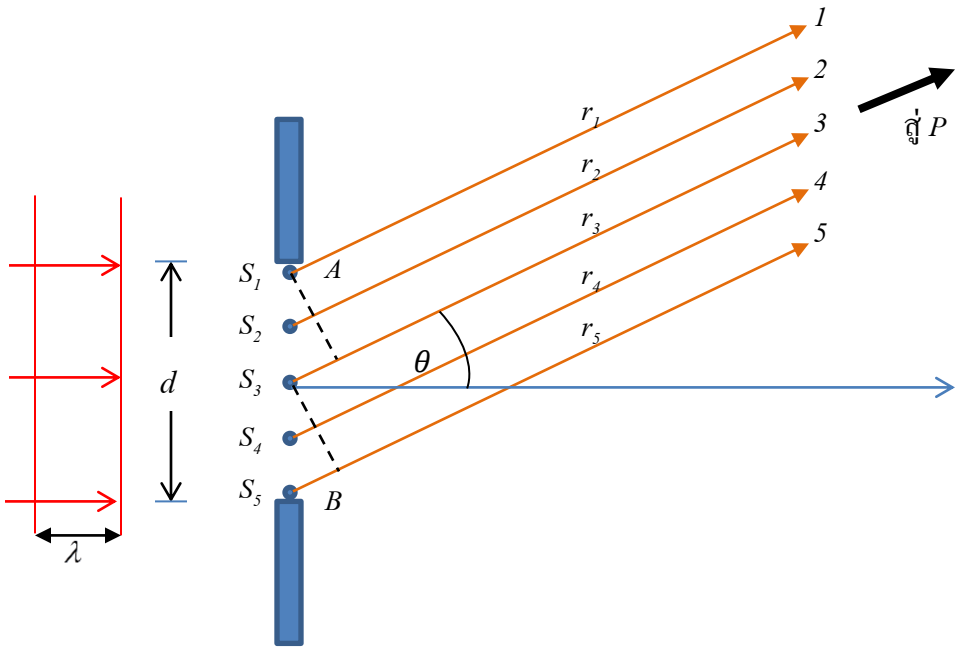
สมมติคลื่นแสงระนาบเอกรงค์คลื่นหนึ่ง ซึ่งมีความยาวคลื่น λ แผ่ผ่านตั้งฉากกับระนาบช่องสลิตเดี่ยว (AB) ที่มีความกว้าง d แล้วเกิดแบบอย่างการเลี้ยวเบนเฟรานโฮเฟอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยมีริ้วสว่างกลาง (central bright fringe) ริ้วหนึ่งซึ่งเป็นริ้วที่สว่างที่สุดและมีความกว้างประมาณ 2 เท่าของริ้วสว่างรองอื่นๆ ลดหลั่นกันไป ระหว่างริ้วสว่างคู่หนึ่งเหล่านั้นก็คั่นด้วยริ้วมืดริ้วหนึ่ง

สาเหตุที่ทำให้เกิดริ้วสว่างและริ้วมืดในกรณีของช่องสลิตเดี่ยว กล่าวคือ หลักการของฮอยเกนส์เกี่ยวกับคลื่นทุติยภูมิ (secondary wave) ที่เป็นผลจากคลื่นปฐมภูมิ (primary wave) โดยการกำหนดให้ทุกตำแหน่งในช่วงความกว้างของช่องสลิตเดี่ยว (AB) ซึ่งมีคลื่นแสงคลื่นหนึ่งแผ่ผ่านช่องนี้ เป็นตำแหน่งของต้นทางแสงอาพันธ์เอกรงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และสามารถพิจารณาได้ดังนี้

1) สมมติแหล่งต้นทางแสงทุติยภูมิอยู่ ณ S_1, S_2, S_3, S_4 และ S_5 โดยที่ต่างก็อยู่ห่างถัดกันเท่ากับ $\frac{d}{4}$

2) ถ้าผลต่างวิถี $(\Delta r) = |r_3 - r_1| = |r_5 - r_3| = \frac{\lambda}{2}$ ย่อมจะเกิดการแทรกสอดหักล้าง ณ ตำแหน่ง P จะได้

$$\frac{d}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \qquad \text{หรือ} \qquad d\sin\theta = \lambda$$



รูปที่ 2.14 รังสีขนานจากช่องเล็กยาวเดียวไปสู่ตำแหน่ง P [12]

3) ถ้า $(\Delta r) = |r_2 - r_1| = |r_3 - r_2| = |r_4 - r_3| = |r_5 - r_4| = \frac{\lambda}{2}$ ก็จะเกิดการแทรกสอดหักล้าง ณ ตำแหน่ง P เช่นเดียวกัน

$$\frac{d}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \qquad \text{หรือ} \qquad d\sin\theta = 4\lambda$$

4) ในทำนองเดียวกัน ถ้าสมมติตำแหน่งของแหล่งต้นทางแสงทุติยภูมิ ณ ช่องเล็กยาวเดี่ยวให้อยู่ห่างกัน $\frac{d}{6}, \frac{d}{8}, \frac{d}{10}, \ldots$ แล้วพิจารณาในลักษณะคล้ายกัน ก็จะได้ความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันดังต่อไปนี้

$$d\sin\theta = 3\lambda\,,\ d\sin\theta = 4\lambda\,,\ d\sin\theta = 5\lambda\,, \ldots$$

ดังนั้นเขียนความสัมพันธ์เกี่ยวกับภาวะแทรกสอดหักล้าง ณ ตำแหน่ง P คือ

$$d\sin\theta = m\lambda \tag{2.11}$$

เมื่อ $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$

กำหนดให้ d = ความกว้างของช่องสลิตเดี่ยว (m)

θ = มุมระหว่างช่องสลิตเดี่ยวกับจุด P (เรเดียน)

m = ลำดับของตำแหน่งแทรกสอดหักล้าง

λ = ความยาวคลื่น (m)

สำหรับระยะที่ตำแหน่งริ้วมืดริ้วหนึ่ง (P) อยู่ห่างจากตำแหน่งกลาง (P_0) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มแสงมากที่สุด ระยะ y_m ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะได้

$$y_m = D\tan\theta \tag{2.12}$$

กำหนดให้ y_m = ระยะจากตำแหน่งกลางถึงริ้วมืดใดๆ (m)

D = ระยะจากช่องสลิตเดี่ยวถึงฉาก (m)

θ = มุมระหว่างช่องสลิตเดี่ยวกับจุด P (เรเดียน)

เมื่อ θ เป็นมุมเล็กๆ จะได้ว่า $\tan\theta \approx \sin\theta$ จะได้

$$y_m = \frac{D}{d} m\lambda \tag{2.13}$$

กำหนดให้ y_m = ระยะจากตำแหน่งกลางถึงริ้วมืดใดๆ (m)

D = ระยะจากช่องสลิตเดี่ยวถึงฉาก (m)

d = ความกว้างของช่องสลิตเดี่ยว (m)

m = ลำดับของตำแหน่งแทรกสอดหักล้าง

λ = ความยาวคลื่น (m)

2.6 สมบัติของโลหะที่นำมาศึกษา

ในงานวิจัยนี้โลหะที่นำมาศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม และสแตนเลส ซึ่งโลหะเหล่านี้สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด มีราคาถูก และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม

2.6.1 ทองแดง [13 - 15]

ทองแดง (Cu) เป็นโลหะชนิดแรกๆ ที่มนุษย์นำมาใช้งาน จากหลักฐานพบว่ามนุษย์มีการถลุงทองแดงขึ้นมาทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ แม้ว่าทองแดงจะมีปริมาณน้อยมากในเปลือกโลก ซึ่งมีเพียง 0.0001 % เมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ โลหะทองแดงนอกจากจะเป็นโลหะอิสระ

แล้ว ยังพบแร่ทองแดงในรูปของซัลไฟด์ ออกไซด์ คาร์บอนเนต ซัลเฟต และซิลิเกต โดยส่วนมากจะเป็นซัลไฟด์ในสินแร่ เช่น copper pyrite หรือ chalcopyrite ($CuFeS_2$), chalocite (Cu_2S) หรือ copper glance, malachite green [$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$], azurite blue [$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$], bornite ($3Cu_2S \cdot Fe_2S_3$) หรือ peacock ore และ melaconite (CuO)

ปกติสินแร่ทองแดง ที่มีทองแดงประมาณ 4% หรือมากกว่า จะถูกนำมาหลอมละลายในขั้นตอนการถลุงได้ทองแดงหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แต่สินแร่ที่ปริมาณทองแดงน้อยจะถูกนำมาผ่านกระบวนการแยกโลหะด้วยน้ำ (hydro-metallurgical process) เมื่อได้ทองแดงหลอมเหลวจะทำการแยกทองแดงออกมา

รูปที่ 2.15 ทองแดงหลอมเหลวที่ได้จากการถลุงทองแดง [13]

ในการเผาสินแร่ที่อุณหภูมิต่ำ กำมะถันจะถูกทำให้เป็นออกไซด์ (SO_2) ในรูปของก๊าซ เช่นเดียวกับสารหนูและพลวง ดังปฏิกิริยา

$$2CuFeS_2 + O_2 \longrightarrow Cu_2S + 2FeS + SO_2$$

$$S_2 + O_2 \longrightarrow SO_2$$

$$4As + 3O_2 \longrightarrow As_2O_3$$

$$4Sb + 3O_2 \longrightarrow 2Sb_2O_3$$

สารประกอบคอปเปอร์ซัลไฟล์และสารประกอบเหล็กซัลไฟล์ ถูกทำให้เป็นออกไซด์ดังปฏิกิริยา

$$2Cu_2S + 3O_2 \longrightarrow 2Cu_2O + 2SO_2$$

$$2FeS + 3O_2 \longrightarrow 2FeO + 2SO_2$$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านโค๊กและซิลิกา (SiO_2) จะถูกนำเข้าสู่เตาหลอมเหลวแบบพ่นลม และรวมตัวกับ FeO เปลี่ยนเป็นเหล็กซิลิเกต ($FeSiO_3$) ดังสมการ

$$FeO+SiO_2 \longrightarrow FeSiO_3 \text{ (slag)}$$

$$Cu_2O+FeS \longrightarrow Cu_2S+FeO$$

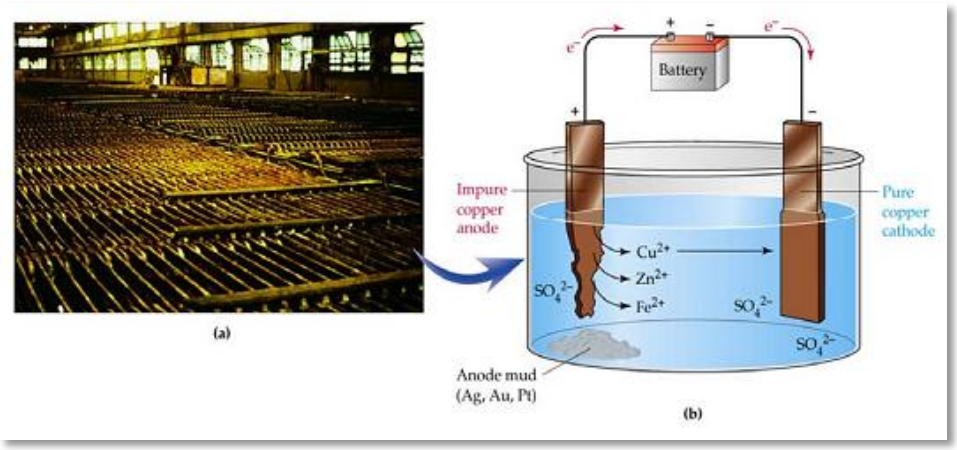
Cu_2S จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ Cu_2O

$$2Cu_2S+3O_2 \longrightarrow 2Cu_2O+2SO_2$$

และ Cu_2O จะทำปฏิกิริยากับ Cu_2S ได้โลหะทองแดงหลอมเหลวออกมา

$$2Cu_2O+Cu_2S \longrightarrow 6Cu+SO_2$$

เมื่อแข็งตัวและต้องการทำให้บริสุทธิ์มากขึ้น ต้องแยกโดยใช้เซลล์อิเล็กโตรไลติก ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การทำให้ทองแดงบริสุทธิ์มากขึ้น ด้วยอิเล็กโตรไลซิส [13]

สมบัติและประโยชน์ของทองแดง

ทองแดงมีความเหนียว สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนต่อการแตกหัก และยังมีสมบัติเด่นด้านทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะน้ำทะเลและกรดได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อด้อยตรงที่มีความแข็งแรงต่ำ จึงมีขอบเขตจำกัดในการใช้งาน

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของทองแดง รหัส copper UNS C11000 [15]

Physical Properties	Metric	English
Density	8.89 g/cc	0.321 lb/in³
Thermal Properties	**Metric**	**English**
Heat of Fusion	205 J/g	88.2 BTU/lb
CTE, linear	17.7 µm/m-°C	9.83 µin/in-°F
	@Temperature 20.0 - 300 °C	@Temperature 68.0 - 572 °F
Specific Heat Capacity	0.385 J/g-°C	0.0920 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	300 W/m-K	2080 BTU-in/hr-ft²-°F
	@Temperature -268.8 °C	@Temperature -451.8 °F
Melting Point	1065 - 1083 °C	1949 - 1981 °F
Solidus	1065 °C	1949 °F
Liquidus	1083 °C	1981 °F
Softening Point	360 °C	680 °F
Processing Properties	**Metric**	**English**
Annealing Temperature	475 - 750 °C	887 - 1380 °F
Hot-Working Temperature	750 - 875 °C	1380 - 1610 °F
Recrystallization Temperature	18.3 °C	65.0 °F
Component Elements Properties	**Metric**	**English**
Copper, Cu	99.9 %	99.9 %
Oxygen, O	0.040 %	0.040 %
Descriptive Properties		
Color	Reddish metallic	

ในการปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรงของทองแดง ไม่นิยมใช้กรรมวิธีทางความร้อน แต่ทำโดยขึ้นรูปเย็นหรือการผสมธาตุอื่นลงไป ทำให้เกิดโลหะผสมทองแดงหลายกลุ่ม ได้แก่

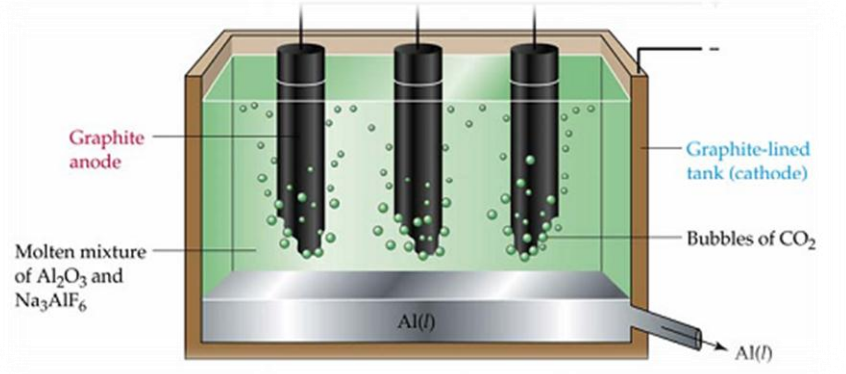
- นาก เกิดจากการผสมระหว่างทองแดงบริสุทธิ์กับทองคำ
- ทองเหลือง เกิดจากการผสมทองแดงกับสังกะสี
- ทองสำริด (ทองบรอนซ์) เป็นการผสมทองแดงกับโลหะอื่นนอกจากสังกะสี เช่น ทองแดงผสมดีบุก ทองแดงผสมอะลูมิเนียม ฯลฯ

ตัวอย่างของวัสดุที่ทำมาจากโลหะผสมของทองแดง คือ เหรียญกษาปณ์ทองแดงผสมนิกเกิล เรียกว่า คิวโปรนิกเกิล ซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในการผลิตเหรียญสีเงินที่ใช้ในระดับสากล 99.9% มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก โลหะทองแดงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่มีรหัส UNS C11000 จัดเป็นโลหะทองแดงบริสุทธิ์มีสีแดงอมส้ม มีความเป็นมันวาว เหนียวและแข็ง มีการนำไฟฟ้าได้ดี สมบัติทางกายภาพของทองแดงแสดงในตารางที่ 2.4

2.6.2 อะลูมิเนียม [13 – 14, 16]

อะลูมิเนียม (Al) มักจะค้นพบในธรรมชาติในลักษณะของแร่บอกไซด์ (bauxite, $Al_2O_3 \cdot H_2O$) มีน้ำหนักเบา จึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ทนทานต่อการเกิดเป็นสนิมและการผุกร่อน ไม่มีพิษต่อร่างกาย ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหาร การตกแต่งงานเฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน อีกทั้งยังทำชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด ขีปนาวุธ อุปกรณ์ในรถยนต์ ตลอดจนชิ้นส่วนอากาศยาน เพื่อลดน้ำหนักให้น้อยลงจะได้ประหยัดเชื้อเพลิง ที่สำคัญซื้อหาได้ง่ายในท้องตลาดและราคาไม่แพง ตัวอย่างธาตุที่นำมาผสมกับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ได้แก่ ทองแดง สังกะสี แมงกานีส ซิลิกอน และแมกนีเซียม

ปัจจุบันได้เตรียมอะลูมิเนียมจากบอกไซด์ที่มีซิลิกา เหล็กออกไซด์ และไททาเนียมออกไซด์ปนอยู่ โดยนำสินแร่ดังกล่าวไปต้มกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนซิลิกาให้เป็นซิลิเกตที่ละลายได้ดี และเปลี่ยนอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นอะลูมิเนียมไอออน แล้วเติมกรดลงไปเพื่อให้เกิดตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อเผาตะกอนจะได้อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปราศจากน้ำ ซึ่งจะถูกรีดิวส์เป็นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการฮอลล์ (Hall process) รูปที่ 2.17 แสดงเซลล์อิเล็กโตรไลติกแบบฮอลล์โดยใช้คลีโอไลท์ (cryolite, Na_3AlF_6) เป็นตัวทำละลายอะลูมิเนียมออกไซด์ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปแยกด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 การผลิตอะลูมิเนียมจากอิเล็กโตรไลซิส Hall process [13]

สมการที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดและแอโนด มีดังนี้

แอโนด (ออกซิเดชัน) : $3[2O^{2-} \longrightarrow O_2(g)+4e^-]$

แคโทด (รีดักชัน) : $4[Al^{3+}+3e^- \longrightarrow Al(l)]$

ปฏิกิริยารวม : $2Al_2O_3 \longrightarrow 4Al(l)+3O_2(g)$

ใช้ก๊าซออกซิเจนที่ได้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนแอโนด ได้คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนโลหะอะลูมิเนียมจะหลอมเหลวจมสู่ด้านล่างและไหลออกสู่ด้านนอก

สมบัติและประโยชน์ของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (light metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติหลายประการ ดังนี้

- มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง
- มีความเหนียวมาก จุดหลอมเหลวต่ำ และค่าการนำไฟฟ้า ประมาณ 65%
- นำความร้อนสูง
- ทนทานต่อการเกิดสนิม และการกัดกร่อน
- ราคาไม่แพง หาซื้อง่าย

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม (aluminum 6063) [16]

Physical Properties	Metric	English
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in³
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.00000299 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.00000299 ohm-cm @Temperature 68.0 °F
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	23.4 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.0 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F
Specific Heat Capacity	0.900 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	218 W/m-K	1510 BTU-in/hr-ft²-°F
Melting Point	616 - 654 °C	1140 - 1210 °F
Solidus	616 °C	1140 °F
Liquidus	654 °C	1210 °F
Component Elements Properties	Metric	English
Aluminum, Al	<= 97.5 %	<= 97.5 %
Chromium, Cr	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Copper, Cu	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Iron, Fe	<= 0.35 %	<= 0.35 %
Magnesium, Mg	0.45 - 0.90 %	0.45 - 0.90 %
Manganese, Mn	<= 0.10 %	<= 0.10 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Silicon, Si	0.20 - 0.60 %	0.20 - 0.60 %

อะลูมิเนียมมีสีขาวเหมือนเงิน เนื้อเป็นมันวาวงดงามไม่หมองง่าย อาจดึงเป็นเส้นลวดขนาดเล็กหรือตีเป็นแผ่นบางๆ และทำปฏิกิริยากับกรดและด่างบางชนิดเท่านั้น เมื่อผสมโลหะอื่นบางชนิดลงไปในเนื้ออะลูมิเนียมจะได้โลหะผสมซึ่งแข็งแรง ทนทาน และเหนียวกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มาก ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- อัลนิโค (alnico) เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียม นิเกิล และโคบอลต์ ใช้ทำแม่เหล็ก
- คอรันดัม (corundum) เป็นสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม ที่มีความแข็งรองจากเพชร ใช้ในอุตสาหกรรมการตัด
- แมกนาเลียม (magnalium) เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมกับแมกนีเซียม ใช้ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า

โลหะอะลูมิเนียมที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นอะลูมิเนียมรหัส 6063 มีลักษณะเป็นมันวาว มีส่วนผสมของอะลูมิเนียม 97.5% มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ไม่เกิน 2.5% โดยน้ำหนัก สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมรหัส 6063 แสดงดังตารางที่ 2.5

2.6.3 สแตนเลส [17 – 18]

สแตนเลสหรือเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (น้อยกว่า 2%) ของน้ำหนัก มีส่วนผสมของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% กำเนิดขึ้นในปี พ.ศ.1903 เมื่อนักวิทยาศาสตร์พบว่าการเติมนิเกิล โมบิดินัม ไททาเนียม ไนโอเนียม หรือโลหะอื่นแตกต่างกันไปตามชนิดของคุณสมบัติเชิงกลและการใช้งาน ลงในเหล็กกล้าธรรมดาจะทำให้เหล็กกล้ามีความต้านทานการเกิดสนิมได้

ประเภทหลักๆ ของสแตนเลส แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ดังนี้

- ออสเตนิติก (austenitic) แม่เหล็กดูดไม่ติด นอกจากส่วนผสมของโครเมียม 18% แล้ว ยังมีนิเกิลที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ส่วนออสเตนิติกที่มีโครเมียมผสมอยู่สูง 20% ถึง 25% และนิกเกิล 1% ถึง 20% จะสามารถทนการเกิดออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงได้ ซึ่งใช้ในส่วนประกอบของเตาหลอม ท่อนำความร้อน และแผ่นกันความร้อนในเครื่องยนต์

- เฟอร์ริติก (ferritic) แม่เหล็กดูดติด มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ และมีโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก คือ ประมาณ 13% หรือ 17%

- มาร์เทนซิติก (martensitic) แม่เหล็กดูดติด โดยทั่วไปจะมีโครเมียมผสมอยู่ 12% และมีส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปานกลาง นำไปใช้ทำส้อม มีด เครื่องมือตัด และเครื่องมือวิศวกรอื่นๆ ซึ่งต้องการคุณสมบัติเด่นในด้านการต้านทานการสึกกร่อนและความแข็งแรงทนทาน

- ดูเพล็กซ์ (duplex) แม่เหล็กดูดติด มีโครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์ มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 18 - 28% และนิเกิล 4.5 - 8% นำไปใช้งานที่มีคลอรีนสูงเพื่อป้องกันมิให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากแรงกดดัน (stress corrosion cracking resistance)

- เหล็กกล้าชุบแข็งแบบตกผลึก (precipitation hardening steel) มีโครเมียมผสมอยู่ 17 % และมีนิเกิล ทองแดง และไนโอเบียมผสมอยู่ด้วย เนื่องจากเหล็กชนิดนี้สามารถชุบแข็งได้ในคราวเดียว จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปั๊ม หัววาล์ว และส่วนประกอบของอากาศยาน

สแตนเลสสตีลที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ออสเตนิกและเฟอร์ริติก ซึ่งคิดเป็น 95% ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และองค์กร The American Iron and Steel Institute (AISI) ได้แบ่งประเภทของสแตนเลสสตีล ดังนี้

- เบอร์ 304 เป็นสแตนเลสสตีลพื้นฐาน ที่ใช้ในการตกแต่งเพื่อความสวยงาม ชนิดนี้ง่ายต่อการขึ้นรูปและป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี

- เบอร์ 304L เป็นสแตนเลสสตีลเบอร์ 304 ที่ใช้คาร์บอนเป็นส่วนประกอบน้อยลงมา ใช้ในงานการเชื่อมอย่างกว้างขวาง

- เบอร์ 316 ถูกออกแบบให้มาป้องกันการเกิดสนิมได้เป็นอย่างดี ถูกใช้ในงานอุตสาหกรรมหนักและสถานที่ใกล้ทะเล

- เบอร์ 316L เป็นสแตนเลสสตีลเบอร์ 316 ที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนน้อยลงมา

- เบอร์ 430 เป็นสแตนเลสสตีลที่ใช้โครเมี่ยมเป็นส่วนประกอบ 100% และมีโอกาสเกิดสนิมน้อยกว่าเบอร์ 300 นิยมใช้ตกแต่งภายใน

สมบัติและประโยชน์ของสแตนเลส

สมบัติและประโยชน์ของสแตนเลสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ คุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติเชิงกล และการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของสแตนเลสในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความร้อนและความสามารถทนความร้อน มีข้อสังเกต 3 ประการ คือ

- การที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีอัตราความคืบดี เมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 °C
- การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลาง ทำให้สแตนเลสเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน (คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี (เครื่องถ่ายความร้อน)
- การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลาง จึงสามารถใช้ความยาวมากๆ ได้ โดยใช้ตัวเชื่อมน้อย (เช่น ในการทำหลังคา)

2) คุณสมบัติเชิงกล

สแตนเลสโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของเหล็กประมาณ 70 - 80% จึงทำให้มีคุณสมบัติของเหล็กที่สำคัญ 2 ประการ คือ ความแข็งและความแกร่ง

3) ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นฟิล์มออกไซต์บนผิวโลหะ หรือออกไซต์ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไปจะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์และทำให้เกิดสภาพพื้นผิวเหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่าเป็นสนิม แต่สแตนเลสมีโครเมียมผสมอยู่ 10.5% ขึ้นไป ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มออกไซต์บนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปกลายเป็นฟิล์มปกป้อง (passive layer) ที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อนซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ภาวะการเสื่อมงาน (passivity) ฟิล์มปกป้องนี้จะมีขนาดบางมาก และมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่นและทำหน้าที่ปกป้องสแตนเลสจากการกัดกร่อนทั้งมวล หากนำไปผลิตแปรรูปหรือใช้งานในสภาพเหมาะสม เมื่อเกิดมีการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา ความคงทนของฟิล์มปกป้องเป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของสแตนเลส นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อน ได้แก่ ความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็นกรด ปริมาณสารละลายคลอไรต์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มปริมาณโครเมียมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของสแตนเลส การเติมนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนโดยทั่วไปให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วนโมลิบดินัมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม

ในทางปฏิบัติสแตนเลสชนิดเฟอร์ริติกมีการใช้งานจำกัดในสภาพการกัดกร่อนปานกลางและในสภาพชนบท ทั้งชนิดเฟอร์ริติกและออสเตนิติกสามารถใช้ทำอุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือนได้ แต่เนื่องจากชนิดออสเตนิติกสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีและทำความสะอาดง่าย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม นอกจากนี้ชนิดออสเตนิติกยังทนการกัดกร่อนจากสารเคมีหลายประเภท ได้แก่ กรด อัลคาลายด์ เป็นต้น ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการผลิตต่างๆ

สแตนเลสที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นสแตนเลสรหัส 314 มีลักษณะเป็นมันวาว แข็ง สมบัติทางกายภาพของสแตนเลสรหัส 314 แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของสแตนเลส (stainless steel 314) [18]

Physical Properties	Metric	English
Density	7.80 g/cc	0.282 lb/in³
Electrical Properties	**Metric**	**English**
Electrical Resistivity	0.0000770 ohm-cm	0.0000770 ohm-cm
Magnetic Permeability	1.02	1.02

Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	15.1 µm/m-°C	8.39 µin/in-°F
	@Temperature 0.000 - 315 °C	@Temperature 32.0 - 599 °F
Specific Heat Capacity	0.500 J/g-°C	0.120 BTU/lb-°F
	@Temperature 0.000 - 100 °C	@Temperature 32.0 - 212 °F
Component Elements Properties	**Metric**	**English**
Carbon, C	0.25 %	0.25 %
Chromium, Cr	<= 26 %	<= 26 %
Iron, Fe	47 %	47 %
Manganese, Mn	2.0 %	2.0 %
Nickel, Ni	<= 22 %	<= 22 %
Phosphorous, P	0.045 %	0.045 %
Silicon, Si	<= 3.0 %	<= 3.0 %
Sulfur, S	0.030 %	0.030 %