

คู่มือหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายการวิจัย

เรื่อง

การวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุด้วยวิธีของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

The Measurement of Thermal Expansion using Michelson Interferometer Technique



โดย

นายเบญจพล ต้นฮู้

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCM

QC

A11.4

บ 78๑ ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 83865
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก. อ. 2551

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากทุนวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบรรณารักษ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของ โรงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 การแทรกสอดของคลื่น	4
2.2 แหล่งกำเนิดแสง	7
2.3 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	8
2.3.1 การเกิดริ้วรอยการแทรกสอด	9
2.3.2 หลักการวัดระยะทางด้วยไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	10
2.3.3 การคำนวณระยะทาง	10
2.4 การขยายตัวของวัสดุตามอุณหภูมิ	11
2.4.1 การขยายตัวความตามยาว	11
2.4.2 การขยายตัวตามพื้นที่	12
2.4.3 การขยายตัวตามปริมาตร	12
2.5 การควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ(Automatic Temperature Control)	13
2.5.1 การควบคุมแบบ ON-OFF	14
2.5.2 การควบคุมแบบ Proportional (P Control)	15
2.5.3 การเกิดการOff Set	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญา ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางการพัฒนาขั้นถัดไป
เอกสารอ้างอิง

67

68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 2.1 Tolerance class for thermocouples	31
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่1	45
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่2	47
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่3	49
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีล3ครั้งและค่าเฉลี่ย	51
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่1	52
ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่2	54
ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่3	56
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลือง3ครั้งและค่าเฉลี่ย	58
ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่1	59
ตารางที่ 4.10 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่2	61
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่3	63
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียม3ครั้งและค่าเฉลี่ย	65

รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Counter	36
รูปที่ 3.7 เลนส์ขยาย	37
รูปที่ 3.8 โปรแกรมLabview ที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ	38
รูปที่ 3.9 การจัดและปรับแนวแสง	39
รูปที่ 3.10 ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ	39
รูปที่ 3.11 โครงสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	40
รูปที่ 3.12 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	40
รูปที่ 3.13 เครื่อง Data Acquisition	41
รูปที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิลชนิด T	41
รูปที่ 3.15 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	42
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่1	47
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่2	49
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่3	51
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่1	54
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่2	56
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่3	58
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่1	61
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่2	63
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่3	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะทางความร้อน
- เพื่อศึกษาการวัดการขยายตัวของโลหะด้วยไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์
- เพื่อศึกษาระบบการวัดในงานที่มีความละเอียดสูงด้วยวิธีการทางแสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ
- ศึกษาหลักการและทฤษฎีของวิธีไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์
- สร้างระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วง 20°C ถึง 60°C
- จัดตั้งอุปกรณ์ระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะทางความร้อนด้วยวิธีไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ในการดำเนินการวิจัยได้แบ่งเป็นขั้นตอนออกเป็น

ขั้นตอนที่ 1. ศึกษาหาข้อมูล ที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 2. จัดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 3. จัดระบบที่ใช้ในการวัด และทดสอบระบบที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนที่ 4. ทดลองการวัดการขยายตัวจากวัสดุชนิดต่างๆ

ขั้นตอนที่ 5. วิเคราะห์และ สรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอน การ ดำเนินงาน	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ขั้นตอนที่ 1	←→											
ขั้นตอนที่ 2		←→										
ขั้นตอนที่ 3			←→									
ขั้นตอนที่ 4						←→						
ขั้นตอนที่ 5								←→				
ขั้นตอนที่ 6												←→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

- เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการวัดความยาวที่มีความละเอียดสูง
- เพื่อพัฒนาเทคนิคทางแสงมาใช้ประโยชน์ได้
- มีความรู้ความเข้าใจในระบบวัดทางแสงและมีทักษะความเข้าใจในการแก้ปัญหาในงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การแทรกสอดของคลื่น (Interference of Wave)

การรวมกันของคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆในตัวกลางเราเรียกว่าการแทรกสอดของแสงและเรียกเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการแทรกสอดของคลื่นว่าอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์(Interferometer)

พิจารณาคลื่นรูปไซน์สองคลื่นเคลื่อนที่ในทิศเดียวกันแทนด้วย y_1, y_2 ถ้าคลื่น y_1, y_2 ทั้งสอง มีความถี่และแอมพลิจูดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.1

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \text{ และ } y_2 = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.1)$$

เมื่อ ϕ คือความต่างเฟสระหว่างคลื่นทั้งสอง ถ้าคลื่นทั้งสองมาพบกันจะเกิดการแทรกสอดจะได้

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)] \quad (2.2)$$

จากความสัมพันธ์

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \quad (2.3)$$

จะได้ฟังก์ชันคลื่นรวม

$$y = \left(2A \cos\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.4)$$

จากสมการนี้จะได้ความสัมพันธ์ว่าคลื่นรวมจะได้เป็นรูปไซน์ที่มีความถี่และความยาวคลื่นเท่าเดิม แอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ $2A \cos\frac{\phi}{2}$ และมีเฟส $\frac{\phi}{2}$ ถ้าคลื่น y_1 และ y_2 มีเฟสตรงกัน นั่นคือ $\phi = 0$

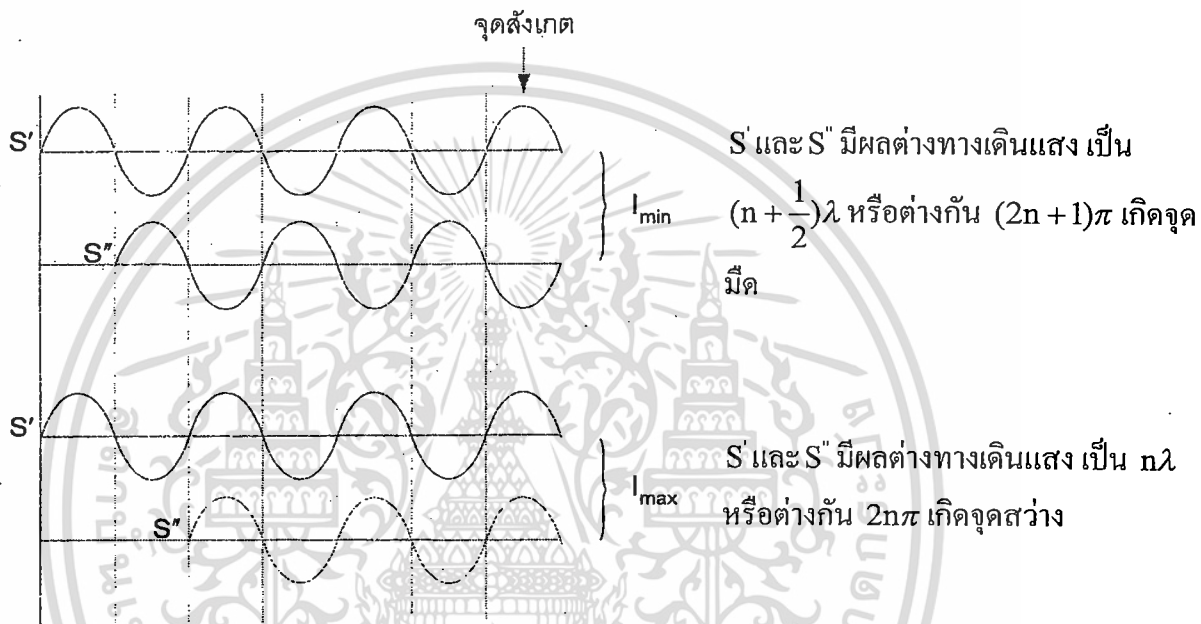
และแอมพลิจูดเท่ากับ $2A$ หรือมีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่นกรณีนี้เรียกว่า การแทรกสอดแบบเสริม (Constructive interference) โดยทั่วไปการแทรกสอดแบบเสริม จะเกิดขึ้น

เมื่อ $\cos\frac{\phi}{2} = \pm 1$ หรือ เมื่อ $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ ในทางตรงข้าม ถ้ามุม $\phi = 0, 3\pi, 5\pi, \dots$ จะทำให้

$\cos\frac{\phi}{2} = \cos\frac{\pi}{2} = 0$ เป็นผลให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมเป็นศูนย์ กรณีนี้เรียกว่าการแทรกสอดแบบ

หักล้าง (Destructive interference) เกิดขึ้นเมื่อยอดคลื่นของคลื่นหนึ่งตรงกับท้องคลื่นอีกคลื่นหนึ่ง ตามรูป 1.2 การกระจัดของคลื่นจะหักล้างกันทั้งหมด

หรือ $I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$ เมื่อ $\cos^2(\phi_1 - \phi_2)$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ดังนั้นการแทรกสอดของแสงจะทำให้แสงมีความเข้มเป็น 0 ที่จุดมืด (destructive Interference) และแสงมีความเข้มเป็น $4I_0$ ที่จุดสว่าง (constructive Interference) ในกรณีที่แสงสองลำมีเฟสตรงกัน $(\phi_1 - \phi_2) = 0$ เนื่องมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน เช่น ไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ เฟสของแสงจะต่างกันได้ถ้าแสงทั้งสองลำเดินทางถึงจุดสังเกตด้วยระยะทางเท่ากัน (โดยการปรับระยะห่างระหว่างกระจก)



รูปที่ 2.2 การแทรกสอดเสริมและหักล้างและแบบเสริมเนื่องจากผลต่างทางเดินแสง

แสงเดินทางจาก S' เดินทางถึงจุดสังเกตมีระยะทางมากกว่าจาก S'' เท่ากับ $(S' - S'')$ ระยะทางนี้เรียกว่าผลต่างทางเดินของแสง (Path difference) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส (Phase difference) $\Delta\phi$ โดย

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \Rightarrow \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (S' - S'') \tag{2.9}$$

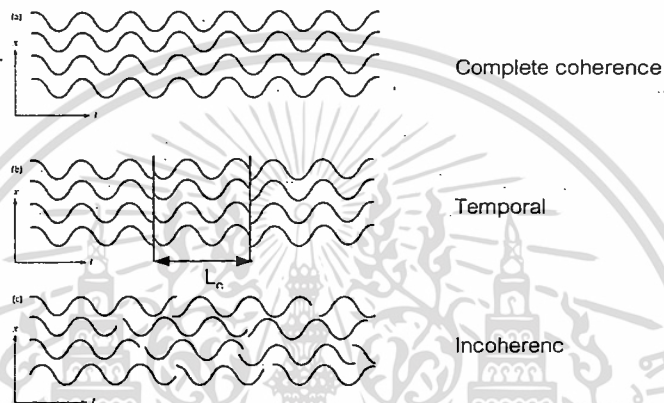


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แหล่งกำเนิดแสง

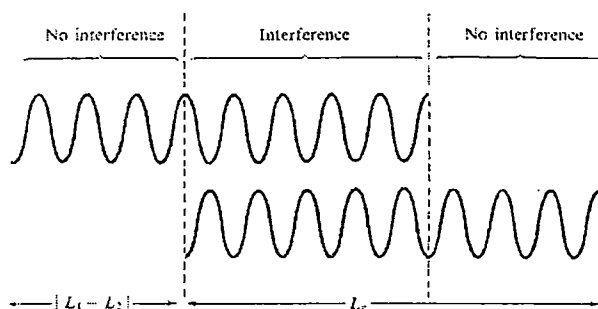
2.2.1) โคฮีเรนซ์

Coherence คือคุณสมบัติของคลื่นทั้งสองคลื่นที่มีเฟสต่างกันคงที่เช่นแสงเลเซอร์เนื่องจากอะตอมของตัวกลางเลเซอร์ถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงออกมาพร้อมกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนแสงที่เกิดจากแสงอื่นๆ เช่น หลอดไฟอะตอมจะมีการเปล่งแสงในทิศทางที่ต่างกันอย่าง Random จึงไม่มีสมบัติ Coherence เรียกว่า incoherence ตามรูป



รูปที่ 2.3 แสง โคฮีเรนซ์และอิน โคฮีเรนซ์

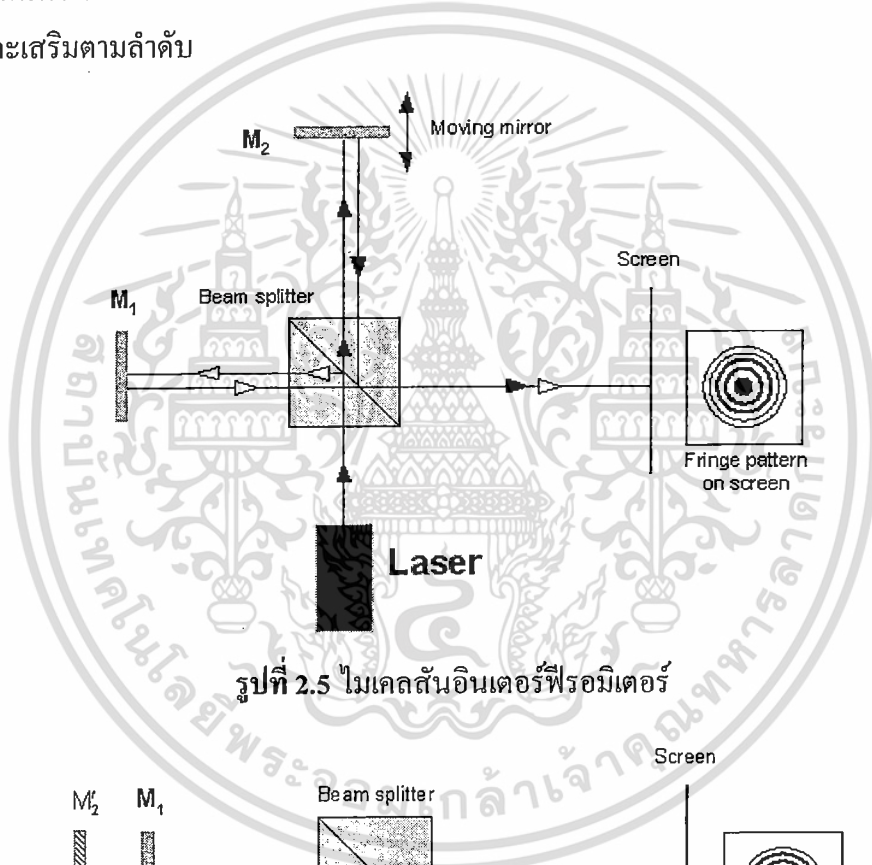
ในกรณีของการแทรกสอดที่ $(\phi_1 - \phi_2) = \text{constant in time}$ หมายถึงคลื่นทั้งสองต้องมีความถี่เดียวกันและเท่ากันแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวต้องมีขนาดเป็นอนันต์นั่นคือแหล่งกำเนิดคลื่นมีเฟสต่างกันคงที่ตลอดเวลา(Complete Coherence) ไม่มีจริงในธรรมชาติ มีแต่แหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสต่างกันคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง(Partial Coherence)เรียกช่วงเวลานี้ว่า Coherence time ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 10^{-9} - 10^{-10} วินาทีและระยะทางที่แสงเดินทางได้ในช่วงเวลา Coherence time เรียกว่า Coherence Length(L_c) ในกรณีการแทรกสอด(interference pattern) ที่จุดสังเกตใดๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดมืดเป็นจุดสว่างทุกๆ 10^{-9} วินาที(เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสง)ซึ่งจะไม่สามารถเกิดการแทรกสอดของแสง



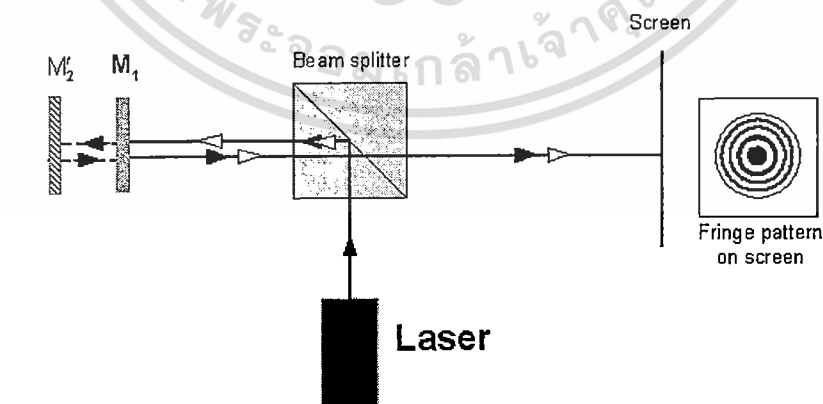
เอกสารนี้รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของโคฮีเรนซ์ โดย $(L_1 - L_2)$ ต้องน้อยกว่า L_c จึงจะเกิดการแทรกสอด ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer)

ไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 5 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง(Laser) ผ่านไปในตัวกลางแยกแสง(Beam splitter)ชนิด 50:50 ลำแสงจะแยกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน และมีความเข้มแสงเท่ากัน โดยลำแสงที่ 1 จะสะท้อนไปยังกระจก M_1 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางแยกลำแสงจากนั้นจะไปยังฉากรับแสงเช่นกันเนื่องจากลำแสงทั้งสองเดินทางเป็นระยะทางไม่เท่ากัน(เนื่องจากกระจกทั้งสองอยู่ห่างจากตัวแยกแสงไม่เท่ากัน)ลำแสงทั้งสองจึงแทรกสอดกัน โดยมีเฟสต่างกันทำให้เป็นแถบมืดและแถบสว่างเป็นวงบนฉากตามเงื่อนไขการเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและเสริมตามลำดับ

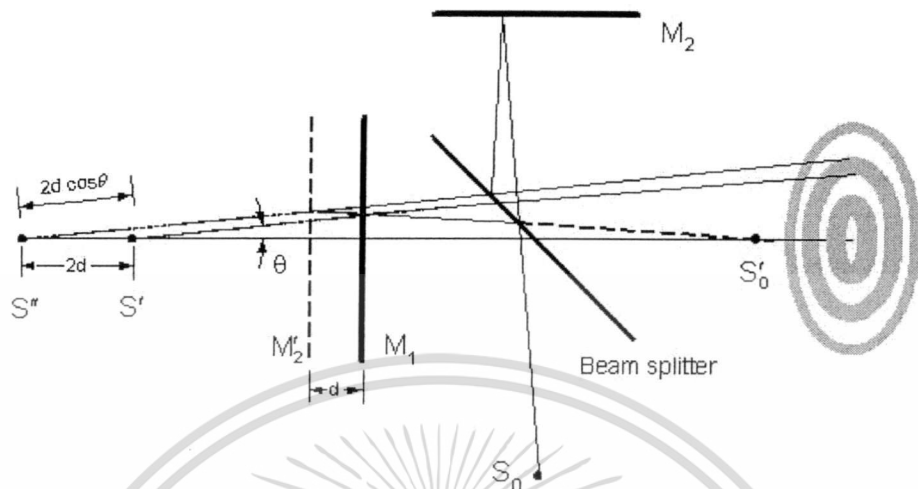


รูปที่ 2.5 ไมเคลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งภาพของกระจก M_2 แสดงให้เห็นระยะห่างระหว่างกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเกิดริ้วแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดเสมือน

2.3.1 การเกิดริ้วแทรกสอด

ในกรณีของไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ความต่างเฟสของแสงที่แทรกสอดกันถูกกำหนดโดยผลต่างทางเดินแสงซึ่งควบคุมโดยการเลื่อนระยะของกระจก M_2 ในมุมมองของผู้สังเกตจากทางด้านฉากรับแสงจะเห็นภาพของกระจก M_2 อยู่ที่ตำแหน่ง M_2' ดังรูปที่ 2.6 ถ้าจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์บานออกเล็กน้อย (โดยเลนส์ เช่น เลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์) แสงจะตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเป็นรูปกรวย เพื่อให้เห็นภาพการเกิดริ้วรอยการแทรกสอดชัดเจนขึ้น จะพิจารณาแนวแสงที่ตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเอียงทำมุมเล็กน้อยดัง รูปที่ 2.7 แสงที่สะท้อนจากกระจกจะพิจารณาเสมือนกับว่ามีแหล่งกำเนิดแสงอยู่หลังกระจกเป็นระยะเท่ากับระยะจากแหล่งกำเนิดจริงถึงกระจก ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจริง S_0 ที่สะท้อนจากกระจก M_1 เป็นระยะทาง d ดังนั้นระยะห่างระหว่างแสงกำเนิดเสมือน S' และ S'' คือ $2d$ จากรูปที่ 7 พิจารณาตำแหน่งที่เกิดริ้วรอยการแทรกสอดบนฉากมาจากลำแสงที่ทำมุม θ กับแนวระดับ (Optical axis) ดังนั้นผลต่างทางเดินแสง (Optical path difference) ของลำแสงทั้งสองคือ $\Delta x = 2d \cos \theta$ ถ้าแยกแสงมีความเข้มเท่ากัน I_0 เมื่อแทรกสอดกันจะมีความเข้ม $I = 2I_0(1 + \cos \delta)$ เมื่อผลต่างเฟส δ มีค่า

$$\delta = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \cos \theta \quad (2.10)$$

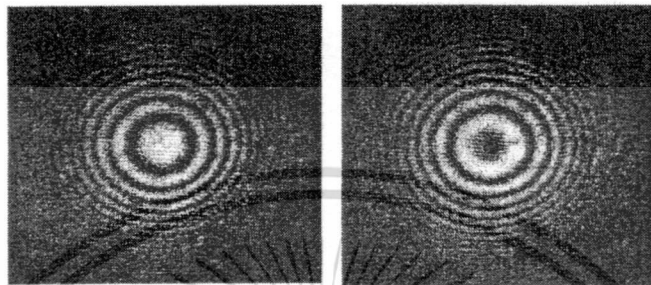
โดยจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (แถบสว่าง) เมื่อ $\delta = 2n\pi$ หรือ $2d \cos \theta = n\lambda$ และจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (แถบมืด) เมื่อ $\delta = (n + \frac{1}{2})\pi$ หรือเกิดแถบมืดเมื่อ $2d \cos \theta = (n + \frac{1}{2})\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ สำหรับริ้วแทรกสอดที่จุดกึ่งกลางคือจุดที่ $\theta = 0$ จะเป็นแถบสว่างเมื่อ

$2d = n\lambda$ หรือ $d = \frac{n\lambda}{2}$ และจะเกิดแถบมืดเมื่อ

$$2d = (n + \frac{1}{2})\lambda \text{ หรือ } 2d = (n + \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.8 ริ้วรอยการแทรกสอดจากไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

2.3.2 หลักการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

เมื่อหมุนไมโครมิเตอร์ จะทำให้กระจก M_2 เคลื่อนเข้าหรือออก ถ้ากระจกเคลื่อนเข้าไปเป็นระยะทาง $\frac{\lambda}{4}$ แสงสองลำจะเดินทางด้วยระยะทางต่างออกไป $\frac{\lambda}{2}$ ริ้วแทรกสอดตรงกลางจะเปลี่ยนจากสว่างเป็นมืดหรือจากมืดเป็นสว่างเมื่อเลื่อนกระจกต่อไปอีก $\frac{\lambda}{4}$ (รวมเป็น $\frac{\lambda}{2}$) ดังนั้นริ้วรอยการแทรกสอดจะเปลี่ยนกลับไปเป็นแบบเดิมสัญญาณจากตัววัดความเข้มแสงจะทำให้เครื่องนับริ้วการแทรกสอดนับเพิ่มขึ้น 1 และจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 เมื่อกระจกเลื่อนไปทุกๆ ระยะทาง $\frac{\lambda}{2}$ ดังนั้นระยะทางที่กระจกเลื่อนไปจะคำนวณได้จากจำนวนริ้วแทรกสอดในการวัดจากเครื่องนับ

2.3.3 การคำนวณระยะทาง

ระยะทางที่กระจกเลื่อนไปคำนวณได้โดย

$$d = N\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ d = ระยะทางที่กระจกเลื่อนไป

N = จำนวนริ้วแทรกสอดที่นับได้โดยเครื่องนับ

λ = ความยาวคลื่นแสง

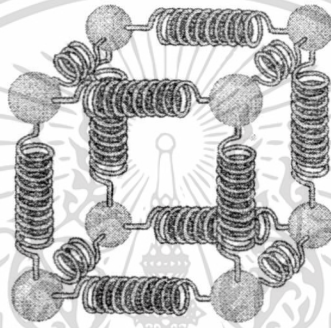
ระยะทางที่น้อยที่สุดที่ไมเคลสันสามารถวัดได้ ($N=1$) จะได้ ระยะทางเท่ากับ 316.4 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การขยายของวัสดุตัวตามอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสสารทำให้เกิดผลทางกายภาพสองอย่าง คือ การเปลี่ยนขนาดและสถานะของสสารซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดโดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนสถานะ

พิจารณาอะตอมภายในผลึกของของแข็งถูกยึดเข้าด้วยกันเป็นแถวๆอย่างเป็นระเบียบด้วยแรงไฟฟ้าโดยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมจะเสมือนกับว่ามีสปริงยึดระหว่างอะตอมไว้ซึ่งสปริงเหล่านี้แข็งแรงมากและมีอยู่ประมาณ 10^{22} เซนติเมตร³ อุณหภูมิใดๆ อะตอมของของแข็งเกิดการสั่นโดยมีแอมพลิจูดของการสั่นประมาณ 10^{-9} เซนติเมตร และความถี่การสั่นประมาณ 10^{13} เฮิตซ์



รูปที่ 2.9 อะตอมของของแข็งยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดหยุ่นที่เสมือนว่าอะตอมมีสปริงยึดติดกันอยู่

การขยายตัวของของแข็งเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นมีอยู่ 3 แบบคือการขยายตัวตามเส้นการขยายตัวตามพื้นที่และการขยายตัวตามปริมาตร

2.4.1 การขยายตัวตามความยาว

วัตถุมีความยาว l_0 ที่อุณหภูมิ t_0 ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น T จะมีความยาว l หรือมีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น $\Delta l = l - l_0$ จากการทดลองพบว่าความยาวที่เพิ่มขึ้นแปรตามความยาวเดิมและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta T = T - T_0$ ทำให้เขียนได้ว่า

$$\Delta l \propto l_0 \Delta T$$

หรือ
$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad (2.13)$$

เมื่อ α เป็นค่าคงที่เฉพาะของสารแต่ละชนิด เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น มีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม และต่อองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น องศา⁻¹ จากสมการที่ 1 ถ้าแทนค่า $\Delta l = l - l_0$ ลงในสมการ จะทำให้เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การขยายตัวตามพื้นที่

วัตถุที่มีพื้นที่ A_0 ที่อุณหภูมิ T_0 ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น T จะมีพื้นที่ A หรือมีพื้นที่เพิ่มขึ้น $\Delta A = A - A_0$ ทำนองเดียวกันกับการขยายตัวตามเส้น ถ้า ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ $T - T_0$ จะได้ว่า

$$A = A_0(1 + \beta\Delta T) \quad (2.16)$$

เมื่อ β เป็น สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามพื้นที่ ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อพื้นที่เดิมและต่อองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไปมีหน่วยเป็นองศา⁻¹ และมีความสัมพันธ์กับ α เป็น

$$\beta = 2\alpha \quad (2.17)$$

2.4.3 การขยายตัวตามปริมาตร

วัตถุที่มีปริมาตร V_0 ที่อุณหภูมิ T_0 ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น T จะมีปริมาตร V หรือมีปริมาตรเพิ่มขึ้น $\Delta V = V - V_0$ ทำนองเดียวกันกับการขยายตัวตามเส้นและ $\Delta T = T - T_0$ จะได้ว่า

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta T) \quad (2.18)$$

เมื่อ γ เป็น สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตร ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปต่อปริมาตรเดิมและต่อองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็นองศา⁻¹ และ มีความสัมพันธ์กับ α และ β เป็น

$$\gamma = 3\alpha = \frac{3}{2}\beta \quad (2.19)$$

2.5 การควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Automatic Temperature Control)

การควบคุมแบบดั้งเดิมที่เป็น Manual Control คือ ใช้นุญย์เป็นผู้ควบคุมเองทั้งหมด เช่น ปิด - เปิด วาล์วเอง, กดสวิทช์หรือปุ่มจ่ายไฟเอง ในปัจจุบัน ได้ถูกแทนที่ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติแล้วทั้งสิ้นเนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า และมีเสถียรภาพสูงกว่าการควบคุมดังกล่าวจะเป็นลักษณะของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) คือมีการวัด และส่งค่าที่วัดกลับมายังส่วนควบคุม เพื่อคำนวณและจ่ายสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์ใช้งาน โดยการควบคุมแบบอัตโนมัติ จะต้องประกอบด้วย 3 ภาคเสมอ คือ

1. ภาควัด เช่น เทอร์โมคัปเปิ้ล, หัววัดความชื้นมีหน้าที่วัดค่าที่โพรเซสแล้วส่งมายังภาคควบคุม
2. ภาคควบคุม เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิมีหน้าที่รับค่าจากภาควัด นำมาคำนวณ แล้วส่งให้ภาคจ่าย
3. ภาคจ่าย เช่น ในระบบทำความร้อน ตัวจ่ายคือ ฮีทเตอร์, ในระบบควบคุมอัตราไหล ตัวจ่ายคือ วาล์ว เป็นต้น มีหน้าที่เพิ่มหรือลดค่าที่ควบคุมอยู่ บางครั้งก็เรียกตัวจ่ายเหล่านี้ว่า Final Element

จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุม คือ

SP คือ Set point หรือค่าที่ต้องการควบคุม เช่น ต้องการต้มน้ำที่ 100°C

PV คือ Process Variable หรือค่าที่วัดมาจาก โพรเซส เช่น อุณหภูมิในถังน้ำที่อุณหภูมิปกติ เป็น 30°C

MV คือ Manipulated Variable หรือสัญญาณควบคุมที่เครื่องควบคุมคำนวณ ได้มีหน่วยเป็น $\%(0-100\%)$

E คือ Error หรือค่าผลต่างระหว่างค่าที่ต้องการควบคุมกับค่าที่วัดได้ ($E=SP-PV$)

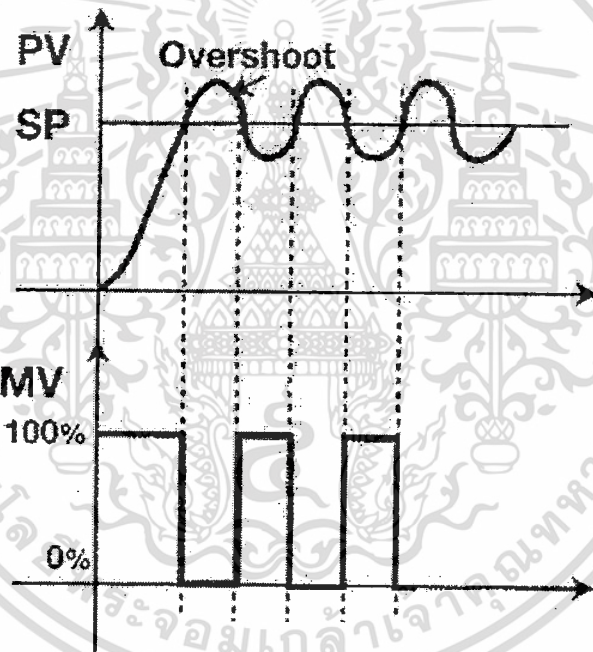
จากรูปที่ 2.10 จะพบว่าเครื่องควบคุมจะได้รับอินพุต 2 ค่า คือ PV (ค่าที่วัดจากโพรเซส) และ SP (ค่าที่ต้องการควบคุมโดยผู้ใช้งานเป็นผู้ป้อน) และมีเอาต์พุต 1 ค่า คือ MV ส่งไปที่โพรเซส เพราะฉะนั้น สิ่งที่ทำให้เครื่องควบคุมแต่ละตัวแตกต่างกัน คือ ส่วนคำนวณของเครื่องควบคุมที่อยู่ภายใน ซึ่งชี้ถึงรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน รูปแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การควบคุมแบบ ON-OFF, PID และรูปแบบใหม่ล่าสุด คือ Fuzzy Control

2.5.1 การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ Two-position Control

ในระบบควบคุมแบบ ON-OFF เครื่องควบคุมจะสั่งเอาต์พุตทำงานเพียง 2 สถานะเท่านั้น คือ ON และ OFF เป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพงดังนั้น จึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม ในกรณีที่เกิดจากการแกว่งของอุณหภูมิเป็นที่ยอมรับได้

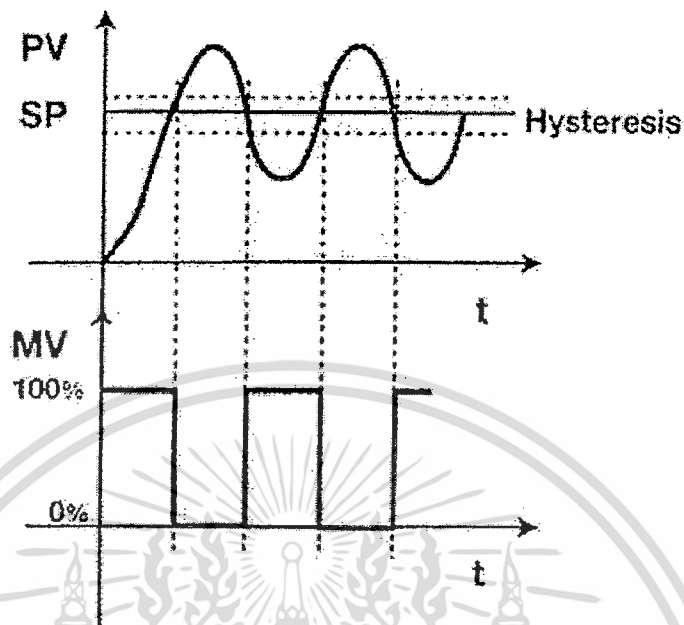
โดยสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมเป็น MV และผลต่างระหว่าง SP กับ PV เป็น E (Error) ฉะนั้นในการควบคุมแบบ ON-OFF สัญญาณ MV จะมีค่าเป็น 100% (ON) หรือ 0% (OFF) เท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่า E มีค่าเป็น + หรือเป็น - จะได้ว่า

$$\begin{aligned} MV &= 100\% \text{ (ON) เมื่อ } E > 0 \text{ (PV} < \text{SP)} \\ &= 0\% \text{ (OFF) เมื่อ } E < 0 \text{ (PV} > \text{SP)} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.10 การควบคุมแบบ ON-OFF

ในกรณีอุณหภูมิที่โปรเซสมีการกระเพื่อมที่ Set point จะมีผลทำให้เอาต์พุตของเครื่องควบคุม ON และ OFF อยู่ตลอดเวลา ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยกำหนด Hysteresis หรือ Differential gap หรือ Dead band เพื่อลดการตัด-ต่อที่เกิดขึ้น แต่ผลเสียคือจะทำให้เกิด Overshoot มากขึ้นดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การควบคุมแบบ ON-OFF โดยมี Hysteresis

ลักษณะของ ON-OFF Control คือจะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิ (Oscillation) อยู่ตลอดเวลาโดยในกรณีที่มี Hysteresis ความถี่ในการตัดต่อจะลดลง แต่ค่า overshoot จะมากขึ้น

2.5.2 การควบคุมแบบ Proportional (P Control)

ในกระบวนการควบคุมแบบ ON-OFF จะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากจะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิตลอดเวลาอันเป็นผลมาจากการ ON และ OFF ที่ตัดสินใจจากเครื่องหมายของ Error เท่านั้น นั่นคือ สำหรับ ON-OFF Control ไม่ว่า Error ที่เป็นค่าบวกจะมีค่ามากหรือน้อยเพียงใด เครื่องควบคุมก็จะจ่าย 100% เสมอจนกว่า Error จะกลับเป็นลบ จึงจะจ่าย 0% ดังนั้น ถ้าต้องการความแน่นอนในการควบคุม สัญญาณควบคุมควรจะเป็นสัดส่วน (Proportional) กับค่า Error ที่รับเข้ามา ซึ่งเป็นลักษณะการควบคุมแบบ Proportional ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (MV) กับค่า Error (E) คือ

$$MV = \frac{100}{PB} E + b \quad (2.20)$$

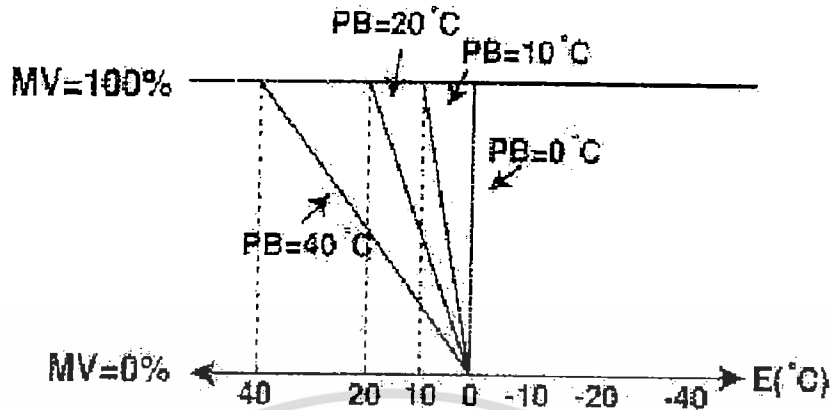
PB : Proportional Band

b : bias คือค่าเปอร์เซ็นต์เดดทูตเมื่อ E เป็น 0 (PV = SP)

ตัวควบคุมแบบ Proportional มีลักษณะเป็นแอมพลิฟายที่มีค่า gain คือ $K_p = \frac{100}{PB}$ โดย

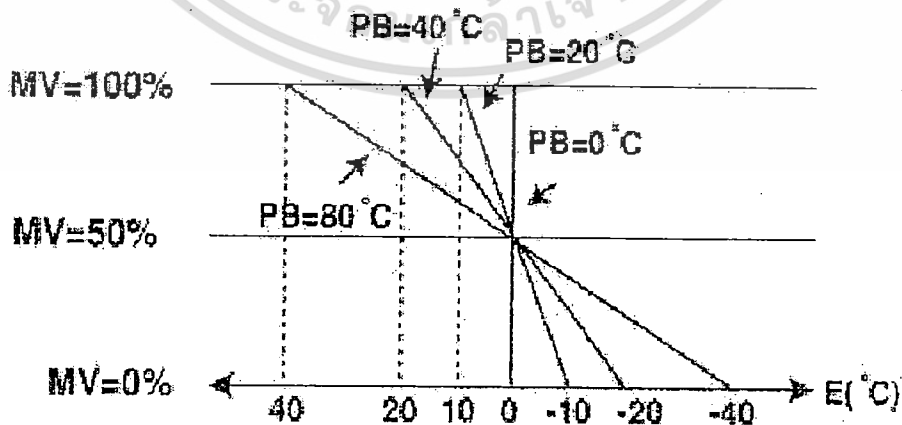
ลักษณะของ Proportional Band (PB) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Proportional Band

เช่น $SP = 100^{\circ}\text{C}$, $PB = 10^{\circ}\text{C}$ จากตารางสามารถอธิบายได้ว่า กรณี PV เพิ่มขึ้น PB คือย่าน อุณหภูมิที่สัญญาณควบคุม MV จะลดลงจาก 100% ไปเป็น 0% นั่นคือเมื่อ PV อยู่ใต้ PB MV จะเป็น 100% เสมอ เมื่อ PV อยู่เหนือ PB MV จะเป็น 0% เสมอ และ MV จะลดลงอย่างเป็นสัดส่วน เมื่อ PV อยู่ใน PB เป็น 0°C อัตราขยายเป็นอนันต์หรือเสมือนว่าการทำงานของ เครื่องควบคุมจะ กลายเป็นแบบ ON-OFF นั่นเอง ส่วนค่า bias เป็นค่าที่ต้องการให้เครื่องควบคุมจ่ายออกไปเมื่อ $E = 0$ ถ้ากำหนดให้ bias เป็น 0 ในขณะที่ $E = 0$ MV จะมีค่าเป็น 0% (OFF) ทำให้ไม่สามารถควบคุมให้ PV ไปถึง SP ได้ จึงควรตั้งค่า bias ให้เหมาะสมกับการรักษาระดับที่ SP ได้ จึงควรตั้งค่า bias ให้ เหมาะสมกับการรักษาระดับที่ SP นั้นๆ โดยทั่วไปเครื่องควบคุม อุณหภูมิจะมี bias ไว้ที่ 50% และ สามารถตั้งค่า Manual Reset ได้โดยสามารถพิจารณาลักษณะของ Proportional Band ที่ 50% ได้ตาม รูปที่ 2.13

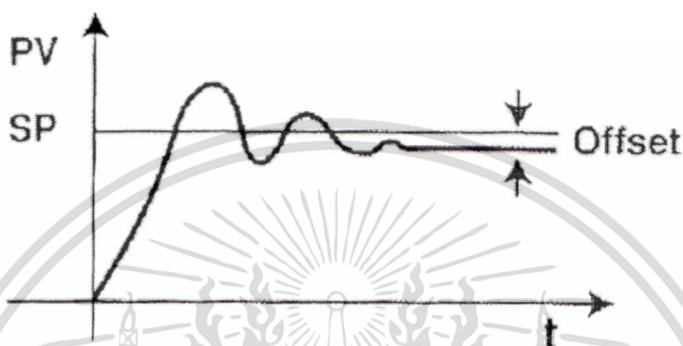


รูปที่ 2.13 Proportional Band ที่ bias = 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การเกิด Offset ของอุณหภูมิ

การเกิด Offset เป็นข้อเสียของการควบคุมแบบ Proportional ที่ PV จะนิ่งอยู่ที่ค่าหนึ่งซึ่งไม่เท่ากับ SP ซึ่งอาจนิ่งอยู่เหนือ SP หรือใต้ SP ก็ได้ โดย Offset คือค่าความแตกต่างระหว่าง SP กับ PV ที่เวลาสุดท้าย



รูปที่ 2.14 ลักษณะของการ Offset

โดยลักษณะของการเกิด Offset จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.14 ซึ่งการเกิด offset จะเกิดในระบบที่ใช้ Proportional control ที่มีค่า PB กว้าง หรือ Load มีการเปลี่ยนแปลง หรือในกรณีที่มีการรบกวน (Disturbance) เข้ามาใน โพรเซส การลด PB ให้แคบลงมาสามารถลด Offset ได้ แต่จะทำให้อุณหภูมิมีการแกว่งมากขึ้น สามารถแก้ไข Offset ได้โดยการตั้งค่า Manual Reset ซึ่งเสมือนเป็นการเลื่อน (Shift) กราฟขึ้น (หรือลง) ให้ PV ไปนิ่งที่ SP พอดี

2.5.4 การควบคุมแบบ Proportional Integral (PI Control)

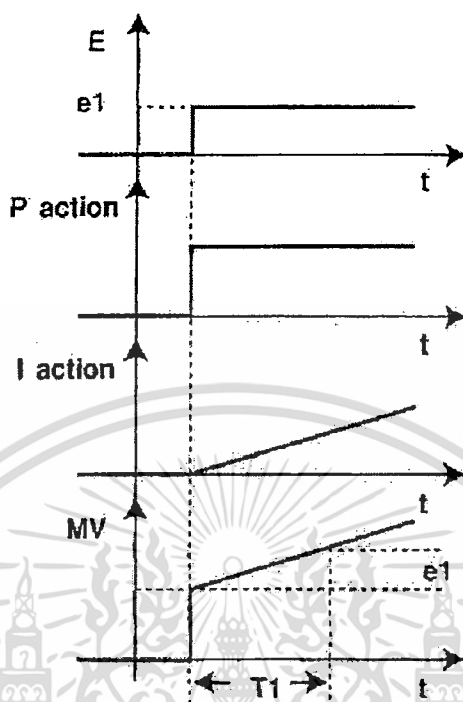
ลักษณะของ Integral จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับค่า Error (E) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.21

$$MV = \frac{1}{T_I} \int_0^t E dt \quad (2.21)$$

T_I : Integral Time

บางครั้งการควบคุมแบบ Integral เรียกว่า Reset Control ซึ่งไม่สามารถใช้งานเดี่ยว ๆ ได้จะใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ กิริยาการควบคุมแบบ PI สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.22

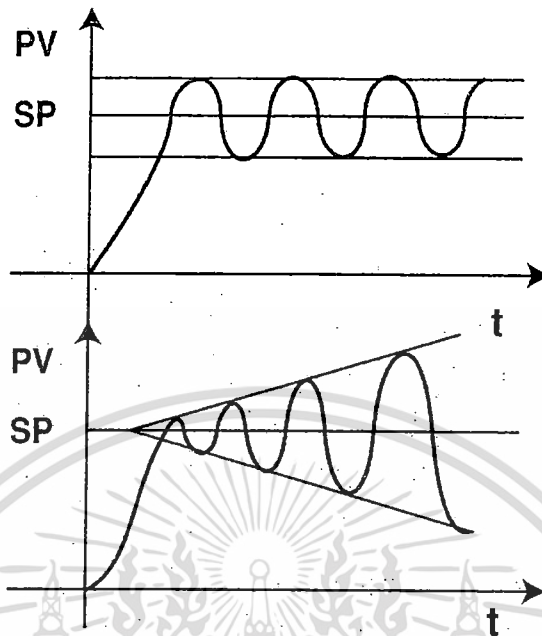
$$MV = \frac{100}{PB} E + \frac{1}{T} \int_0^t E dt \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.15 สัญญาณควบคุมของ PI control

จากรูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของ Integral action คือ สะสมค่า E เมื่อเวลาผ่านไป นั่นคือขณะที่ E มีค่าคงที่สัญญาณควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในกรณี E เป็นบวกและจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ในกรณี E เป็นลบ นั่นคือสาเหตุที่ Integral action สามารถแก้ Offset ได้และทำให้ PV ไปนิ่งที่ SP ได้ท้ายที่สุด และเมื่อลดค่า T_i ลงผลของ Reset action จะมีค่ามากขึ้นทำให้เกิดการแกว่งและ Overshoot สูงขึ้น ถ้าลดค่า T_i ต่ำเกินไปจะทำให้ระบบ Oscillate หรือ Unstable สามารถพิจารณาได้จากรูปที่

2.16



รูปที่ 2.16 การเกิด Oscillate และ Unstable เมื่อตั้งค่า T_D ต่ำเกินไป

2.5.5 การควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD Control)

ลักษณะของ Derivative จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับ ค่า Error (E)

ดังนี้

$$MV = T_D \frac{dE}{dt} \quad (2.23)$$

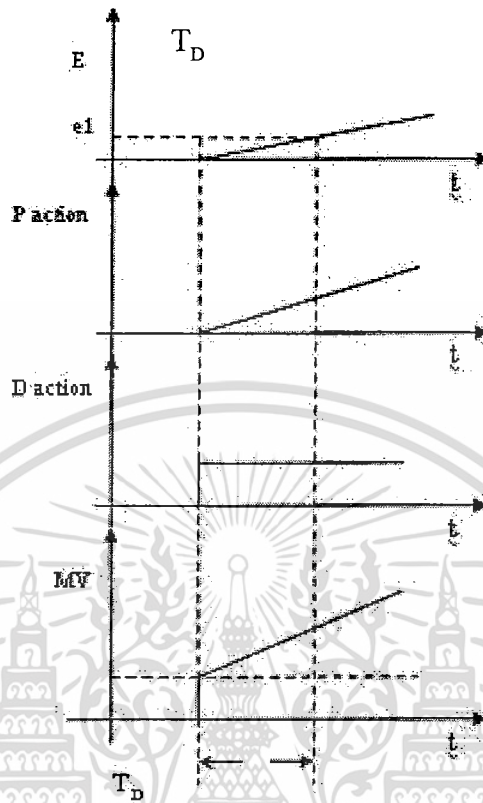
T_D = Derivative Time

ในบางครั้งจะเรียกการควบคุมแบบ Derivative ว่า Rate control ทั้งนี้ เพราะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error (E) ซึ่งจะใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ การทำงานการควบคุมแบบ PD สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$MV = \frac{100}{PB} E + T_D \frac{dE}{dt} \quad (2.24)$$

สัญญาณควบคุมจะแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของค่า Error การควบคุมชนิดนี้มีลักษณะเหมือนการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าที่โพรเซสล่วงหน้า ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่เสถียรภาพเร็วขึ้น Derivative action เหมาะสำหรับโพรเซสที่ช้า หรือมี Time lag มากๆ เมื่อเพิ่มค่า T_D ขึ้น ผลของ Rate action จะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มค่า T_D มากเกินไป จะทำให้ระบบ Oscillate ขาดเสถียรภาพ PD Control เหมาะกับ Process ที่มี Time lag มาก จะช่วยทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น ไม่เหมาะกับ Process ที่ไวหรือมีการเปลี่ยนแปลงเร็วอยู่แล้ว เช่น ระบบควบคุมการไหล (Flow) ระบบควบคุม

เอกสความีตัน (Pressure) โดยลักษณะของการควบคุมแบบ PD control จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.17 เป็นต้น การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



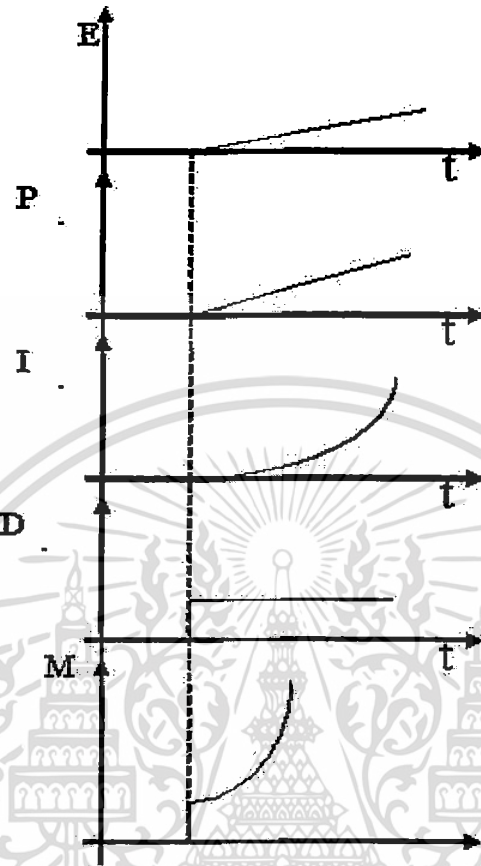
รูปที่ 2.17 สัญญาณควบคุมของ PD Control

2.5.6 การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

เป็นการรวมทริยาควบคุมแบบ Proportional, แบบ Integral และแบบ Derivative เข้าด้วยกัน สามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$MV = \frac{100}{PB} E + \frac{1}{T_I} \int_0^t E dt + \frac{dE}{dt} \quad (2.25)$$

ลักษณะการทำงานของ PID Control สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองของ PID Control

2.5.7 จุดมุ่งหมายของการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

จุดมุ่งหมายของการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ คือ พยายามรักษาค่า PV ให้มีค่าเท่ากับค่า SP อยู่ตลอดเวลา เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบ เช่น Load เปลี่ยน มี Disturbance หรือมีการเปลี่ยนค่า Set point ค่า PV จะไม่เท่ากับค่า SP (เกิด Error ขึ้น) อยู่ขณะหนึ่งแล้วเครื่องควบคุมจะต้องสามารถควบคุมให้ค่า PV เข้าสู่ Set point ให้ได้ โดยลักษณะในการนำค่า PID ที่ตั้งไว้ระบบใด ๆ อาจรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ได้เหมือนกันแต่ผลตอบสนองของระบบหนึ่งอาจเร็วกว่า และมี Overshoot น้อยกว่า นั่นแสดงว่าระบบนี้มีการควบคุมที่ดีกว่า ถึงแม้ที่เวลาสุดท้ายทั้ง 2 ระบบจะมีเสถียรภาพเหมือนกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้จุดประสงค์หลักของการควบคุมระบบใด ๆ คือเสถียรภาพหรือการรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ให้ได้ก็ตาม แต่ในความเป็นจริงการควบคุมที่ดีจะต้องมองถึงลักษณะของผลตอบสนองด้วยจึงเป็นสาเหตุที่ต้องมีการศึกษาลักษณะของโพรเซสและปรับค่า PID ให้เหมาะสมกับโพรเซสนั้นๆ เพื่อให้มีผลตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถสรุปลักษณะของการควบคุมที่ดีได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบมีเสถียรภาพ (Stable) สามารถรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ได้
2. ระบบมีการตอบสนองเร็ว
3. ระบบไม่แกว่ง มีค่า Overshoot น้อย
4. ไม่เกิด Offset ที่สภาวะสุดท้าย
5. ระบบสามารถรองรับการเกิด Disturbance หรือการเปลี่ยนค่า Set point ได้

การปรับค่า PID ที่โพรเซสหนึ่งแล้วมีผลตอบสนองที่ดี เมื่อนำค่า PID นี้ไปใช้กับอีกโพรเซสหนึ่ง อาจได้ผลตอบสนองที่ไม่ดีก็ได้ ผลของการปรับค่า PID มีดังนี้

ผลของ P action

สามารถเพิ่มผลของ P action ได้โดยลดค่า PB ลง จะมีผลทำให้

- มีค่า Offset น้อยลง
- มี Overshoot สูงขึ้น เกิดการแกว่งมากขึ้น
- ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าลดค่า PB มากเกินไป จะทำให้ระบบ Oscillate

ผลของ I action

สามารถเพิ่มผลของ I action ได้โดยลดค่า T_I ลงจะมีผลทำให้

- ไม่มี Offset
- มี Overshoot สูงขึ้น เกิดการแกว่งมากขึ้น
- ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าลดค่า T_I มากเกินไป จะทำให้ระบบ Oscillate หรือ Unstable ได้

ผลของ D action

สามารถเพิ่มผลของ D action ได้โดยเพิ่มค่า T_D ขึ้นจะมีผลทำให้

- มี Overshoot ลดลงมีคาบการแกว่งสั้นลง
- ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ไวขึ้น
- ในระบบที่เร็วอยู่แล้วจะขาดเสถียรภาพ

2.5.8 การควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบ FUZZY

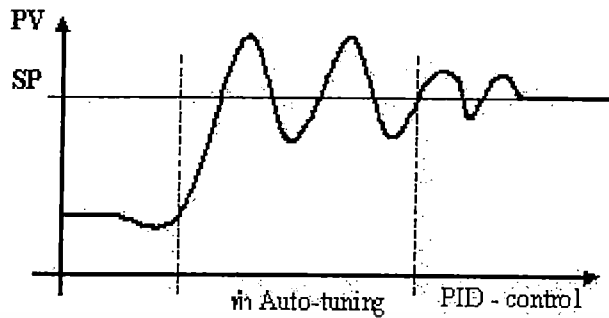
Fuzzy เป็นทฤษฎีหนึ่งทางคณิตศาสตร์ คือ Fuzzy Sets ซึ่งเป็นลักษณะของตัวเลขที่สามารถบ่งชี้ได้ถึงคุณภาพ (Quality) ไม่ใช่เพียงปริมาณ (Quantity) เพียงอย่างเดียวเหมือนตัวเลขทั่วไปที่เป็น Crisp sets ลักษณะของ Fuzzy จะมีความใกล้เคียงภาษามนุษย์มากกว่าที่จะเป็นแค่ตัวเลขตายตัวค่าหนึ่ง เช่น หากเราจะสอนคนอัตราห้วง -3m/s^2 คำว่า Fuzzy แปลว่า คลุมเครือ, ไม่แน่ชัด ถือเป็นคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้ระบุเพียงแค่ใช่หรือไม่ใช่แต่สามารถระบุความใกล้เคียงที่จะใช่หรือไม่ใช่ได้นั้นคือ ช่วงตรงกลางระหว่างใช่กับไม่ใช่ ซึ่งเป็นลักษณะของภาษามนุษย์ (Language) ที่มักใช้คำว่า ค่อยๆ , ค่อนข้าง, เล็กน้อย, เกือบ เป็นต้น

2.5.9 การควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบ Fuzzy และ PID

Fuzzy control เอาชนะข้อด้อยของ PID ได้ และสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกรณีต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบที่แตกต่างกันไป เหมือนกับการบันทึกประสบการณ์ที่เคยผ่านมาแล้ว Fuzzy Control จะปรับแต่ง PID ทางอ้อมเพื่อให้สัญญาณควบคุม MV สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างยืดหยุ่นและรวดเร็วตาม Process ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยวิธีนี้จะทำให้ Process เข้าสู่ Se point ด้วยเวลาที่สั้นที่สุด และมี Overshoot ต่ำสุด ภายใต้การรบกวนของ Disturbance ภายนอก มีเสถียรภาพเหนือกว่าการควบคุม PID แบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด PID เป็น Digital Information ต่างจาก Fuzzy ที่เป็น Language Information

2.5.10 AUTO-TUNING

เป็นฟังก์ชันที่มักมีอยู่ในเครื่องควบคุมชนิดดิจิทัล ใช้สำหรับคำนวณหาค่า PID ที่เหมาะสมกับโพรเซสโดยอัตโนมัติ เมื่อเริ่มการทำงาน Auto-Tuning เครื่องควบคุมจะทำงานเป็น ON-OFF ระยะเวลาหนึ่งทำให้ระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของโพรเซสว่าช้าหรือเร็ว, มี Overshoot สูงเท่าใด เครื่องควบคุมจะควบคุมในลักษณะ ON-OFF อยู่ประมาณ 3-5 Cycle แล้วจึงทำการคำนวณหาค่า PID ออกมาและเริ่มควบคุมระบบด้วย PID Control โดยลักษณะของการ Auto Tuning จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19

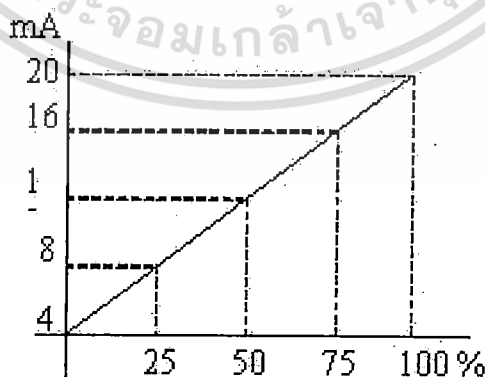


รูปที่ 2.19 การทำ Auto-Tuning

โดยทั่วไปตัวเครื่องควบคุมจะมีไฟแสดงผลขณะที่ทำ Auto-Tuning อยู่ และเมื่อทำ Auto-Tuning เสร็จไฟแสดงผลจะดับแสดงว่าเข้าสู่การทำงานแบบ PID Control แล้ว ฟังก์ชัน Auto-Tuning ช่วงอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้โดยคำนวณค่า PID ออกมาให้โดยอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณด้วยตนเอง แต่อย่างไรก็ตาม ในบางโพรเซสที่ควบคุมได้ยาก ค่าPID ที่คำนวณได้จากการทำ Auto-Tuning ก็ไม่สามารถควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพหรือมีผลตอบสนองที่ดีพอได้ จำเป็นที่ผู้ใช้งานจะต้องทำการปรับแต่งค่าPID เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

2.5.11 เอาต์พุตของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

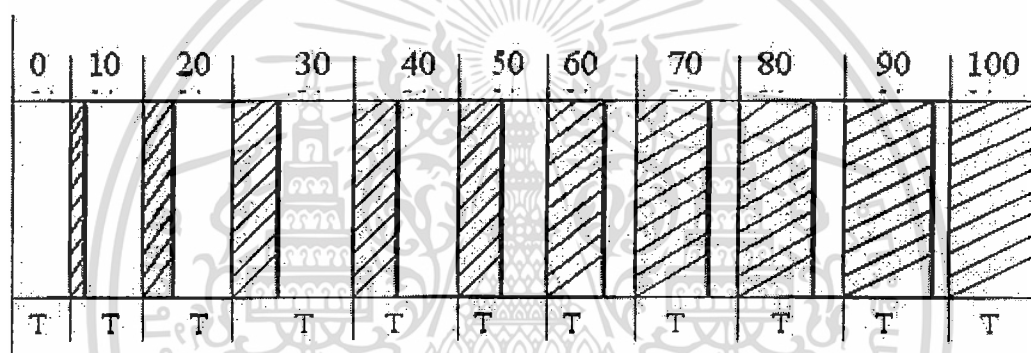
สัญญาณควบคุม (MV) จากเครื่องควบคุม เป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณตามขนาดของค่า Error ในโพรเซส โดยสัญญาณควบคุมนี้จะถูกส่งไปที่ตัวจ่าย (Final element) เพื่อทำการแก้ไข Error ที่ได้รับเข้ามา โดยสัญญาณมีลักษณะเป็นแอนะล็อก คือ 0-100% สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณมาตรฐาน พิจารณาความสัมพันธ์ได้จากรูปที่ 2.2 เช่น 4-20 mA สามารถเทียบเอาต์พุตในลักษณะของเปอร์เซ็นต์กับสัญญาณมาตรฐานได้ดังนี้



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบ เอาต์พุต 4-20 mA กับ 0-100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์ หรือพัลส์ซับ โขลิตสเตรรีเลย์ ซึ่งเป็นลักษณะของ สวิทช์ ON-OFF ที่มีเพียง 2 สถานะ คือ ON(100%) กับ OFF(0%) จะไม่สามารถส่งสัญญาณเอาต์พุต ในลักษณะของแอนะล็อกได้โดยตรง แต่จะใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ON (Duty Cycle) บนคาบคงที่แทน โดยในเครื่องควบคุมแบบ PID ที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์ หรือพัลส์ซับ โขลิตสเตรรีเลย์ จะต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งคือค่า Proportioning time หรือ Cycle time ซึ่งเป็นค่า คาบคงที่ที่จะมีช่วงเวลา ON(Duty Cycle) ตามค่าสัญญาณควบคุม นั้นแสดงว่าเมื่อสัญญาณควบคุม เป็น 100% เอาต์พุตจะ ON ตลอดคาบ และเมื่อสัญญาณควบคุมเป็น 0% เอาต์พุตจะ OFF ตลอดคาบ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมที่อยู่ระหว่าง 0-100 % ก็จะมี Duty Cycle ที่แตกต่างกันไป ดังรูปที่ 2.21

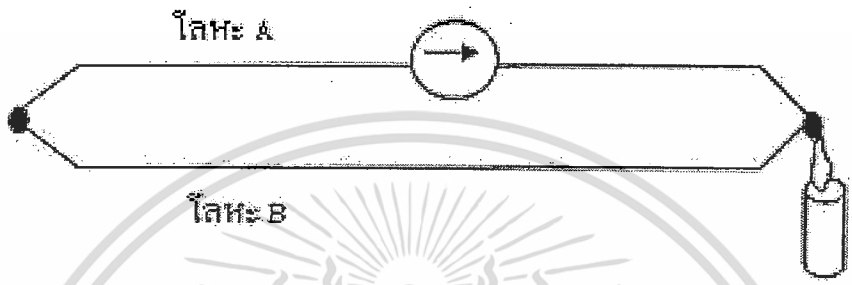


รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบ เอาต์พุตรีเลย์ กับ 0-100%

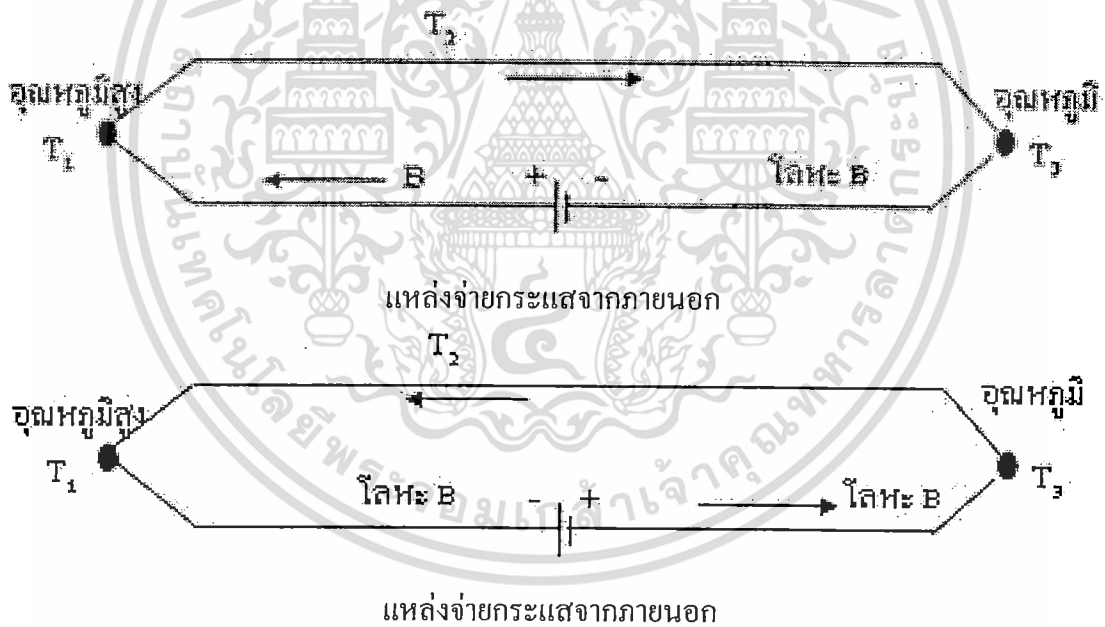
เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Transducer)[6] เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นและความร้อนโดยใช้ อิเลคตรอนเป็นตัวกลางในการทำความเย็น ซึ่งได้แนวความคิดจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ ชาวเยอรมันชื่อ Thomas Seebeck ในปี ค.ศ.1821 โดยพบว่าเมื่อนำขดลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วย โลหะต่างชนิดกัน (โลหะ A และ B) มาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมี อุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองดังรูปที่ 2.22 โดยปริมาณการไหล ของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อ คือ เมื่อจ่าย กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นผลต่างของอุณหภูมิจะมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าลดลง ผลต่างของอุณหภูมิจะน้อยลงด้วยแสดงดังรูปที่ 2.23 ต่อมาในปี ค.ศ.1834 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Jean C.A.Peltier ได้ทำการศึกษาในวงจรลักษณะเดียวกับของ Thomas Seebeck แต่ใช้ลวดที่ทำจาก วัสดุกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ บิสมัทและแอนติโมนี ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ อุณหภูมิของปลายจุดต่อมีค่าแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนและปลายอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง ซึ่งเกิดจากการรับความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไประบายความร้อนออกที่ปลายอีกด้านหนึ่ง และยัง พบว่าเมื่อกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีทิศทางที่ตรงกัน

นอกจากนี้ยังมีอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้ามกันดังแสดงตามรูปที่ 2.23 ปปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวเรียกว่า Peltier Effect และความร้อนที่ถูกเคลื่อนย้ายจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งเราเรียกว่า Peltier Heat Transfer โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้า และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุทั้งขั้วนำทั้งสองชนิด



รูปที่ 2.22 การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร



รูปที่ 2.23 แสดงการกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

จากการที่ได้กล่าวไว้ถึงหลักการข้างต้นวัสดุทั้งขั้วนำเพียงคู่เดียวจะทำให้เกิดความเย็นได้น้อยมากจึงต้องใช้วัสดุทั้งขั้วนำหลาย ๆ คู่มาต่อกันเพื่อใช้งานซึ่งเรียกว่า เพลเทียร์โมดูล (Peltier Module) ในการผลิตทำได้โดยการใช้วัสดุทั้งขั้วนำชนิดพี (P-Type Semiconductor) และชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) หลาย ๆ คู่มาต่อกันเป็นแถวย่อย และต่อปลายระหว่างวัสดุทั้งขั้วนำชนิด P และ N ด้วยแผ่นระบายความร้อนจากนั้นทำการยึดแผ่นระบายความร้อนที่ติดกับปลายของสารทั้งขั้วนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดด้วยแผ่นเซรามิก (Ceramic Plates) โดยแผ่นเซรามิก ด้านหนึ่งจะทำหน้าที่รับความร้อนและอีกด้านหนึ่งจะระบายความร้อนจากผิวหน้าของโมดูลรวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย ขนาดของเพลทีเยอร์โมดูลที่ถูกผลิตใช้งานมีตั้งแต่ 6 วัตต์ ไปจนถึง 150 วัตต์ หากต้องการปริมาณความเย็นมาก ๆ จะต้องใช้เพลทีเยอร์โมดูลหลาย ๆ แผ่นมาต่อร่วมกัน โดยจะต่ออนุกรมระหว่างโมดูล แต่การต่อแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะต่อแบบขนาน

2.5.12 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริก ความร้อนที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมอิเล็กทริกเมื่อไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน และ Peltier Heat Transfer สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าในวงจร (Joule Heat) สามารถหาได้จากสมการความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนไฟฟ้า

$$P = I^2 R \quad (2.26)$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า

R = ความต้านทานไฟฟ้า

อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนจากขั้วหนึ่งไปอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$= \frac{\Delta t}{R_T} \quad (2.27)$$

เมื่อ Δt = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างขั้วร้อนและเย็น

R_T = ความต้านทานความร้อน

Peltier Heat Transfer พบว่าการต่อวงจรไฟฟ้าในกรณีวัสดุตัวนำต่างชนิดกันจะเกิด Peltier Effect โดยมีความร้อนเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่า Peltier Heat Transfer ซึ่งหาค่าได้จากสมการ

$$\text{Peltier Heat Transfer} = \phi I = \alpha T I \quad (2.28)$$

T = อุณหภูมิของขั้วที่กำลังพิจารณาค่าความร้อนเนื่องจาก Peltier Heat Transfer

α = สัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค

การคำนวณกำลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ การหาค่าปริมาณกำลังงานไฟฟ้าที่ต้องป้อนเข้าสู่วงจรเพื่อให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างตามต้องการหาค่าได้จากสมการ

$$P = I^2 R + EI \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว 1 ขั้วที่ต่อกับตัวนำ 2 ชนิดคือ E จะได้ว่า

$$E = \int \alpha dt \quad (2.30)$$

ถ้าให้ค่า α เป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นสามารถเขียนได้ว่า

$$E = \alpha \Delta t$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

$$P = I^2 R + \alpha \Delta t I \quad (2.31)$$

การคำนวณผลการทำความเย็น ถ้าสมมุติว่าความร้อนเนื่องจากความต้านทานในวงจร (Joulean Heat, $I^2 R$) ครึ่งหนึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแต่ละขั้วและพิจารณาที่ขั้วเย็นจะได้ว่าปริมาณความร้อนที่รับจากขั้วเย็นหรือผลการทำความเย็น (Q_c) สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{\Delta T}{R_T} - \frac{I^2 R}{2} \quad (2.32)$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องระบาย ในลักษณะเดียวกันกับการทำความเย็น โดยพิจารณาที่ขั้วร้อนสามารถหาปริมาณความร้อนที่ต้องระบายออกจากขั้ว (Q_h) ได้จากสมการ

$$Q_h = \alpha T_h I - \frac{\Delta T}{R_T} + \frac{I^2 R}{2} \quad (2.33)$$

เมื่อพิจารณาด้วยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$Q_h - Q_c = P \quad (2.34)$$

ทำการตรวจสอบโดยพิจารณาเทอมซ้ายมือและขวามือของสมการดังนี้ เทอมซ้ายมือ

$$Q_h - Q_c = \alpha(T_h - T_c) + I^2 R = \alpha \Delta t I + I^2 R \quad (2.35)$$

เทอมขวามือ

$$P = \alpha \Delta t I + I^2 R \quad (2.36)$$

ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าเป็นจริงตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ การหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะสำหรับการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกคำนวณได้จากสมการ

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P} = \frac{\alpha T_c I - \frac{\Delta t}{R_T} - \frac{I^2 R}{2}}{\alpha \Delta t I + I^2 R} \quad (2.37)$$

จากสมการที่ 2.37 พบว่าเมื่อความต้านทานความร้อน (R_T) สูงมากในขณะที่ความต้านทานไฟฟ้า (R) ต่ำมาก จะทำให้ค่า $\Delta t/R_T$ และ $I^2 R$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ คือ

$$COP = \frac{\alpha T_c I}{\alpha \Delta T} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (2.38)$$

หรือมีค่าเท่ากับ COP ของ Carnot Cycle

ในการวิเคราะห์สมการ ได้ทำการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้เป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของระบบด้วยค่า A Figure of Merit (Z) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$Z = \frac{\alpha^2 RT}{R} \quad (2.39)$$

ซึ่งเมื่อค่าของ Z สูงแสดงว่าระบบมีสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะที่สูง ดังนั้นในการออกแบบระบบให้มีสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะที่สูงนอกเหนือจากการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติความต้านทานความร้อนที่สูง (ค่าการนำความร้อนต่ำ) และความต้านทานไฟฟ้าต่ำแล้ว ยังควรเลือกวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (α) ที่สูงด้วย

ตัวอย่าง จงคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งทำงานที่อุณหภูมิด้านเย็นและด้านร้อนเท่ากับ 293K และ 347 K ตามลำดับ โดยอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเท่ากับ 303 K โดยกำหนดให้

- สัมประสิทธิ์ของซีเบ็คเท่ากับ 0.044 V/K
- ความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 2.545 Ω
- ความต้านทานความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 2.178 K/ Ω
- กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.5 แอมแปร์

วิธีทำ

ผลการทำความเย็น

$$\begin{aligned} Q_c &= \alpha T_c I - \frac{\Delta t}{R_T} - \frac{I^2 R}{2} \\ &= 0.044 \times 293 \times 3.5 - \frac{54}{2.1} + \frac{3.5^2 \times 2.545}{2} \\ &= 5.54 \text{ W} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อนระบาย

$$\begin{aligned} Q_h &= \alpha T_h I - \frac{\Delta t}{R_T} - \frac{I^2 R}{2} \\ &= 0.044 \times 347 \times 3.5 - \frac{54}{2.178} + \frac{3.5^2 \times 2.545}{2} \\ &= 45.02 \text{ W} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้

$$P = Q_h - Q_c = 45.02 - 5.54 = 39.48 \text{ W}$$

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ

$$COP = \frac{Q_c}{P} = \frac{5.54}{39.48} = 0.14$$

เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำเย็นได้โดยอาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวัสดุกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่ปลายต่อเชื่อมกัน ส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทจากปลายจุดต่อด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนา และประยุกต์นำมาใช้สำหรับการทำความเย็นในงานต่าง ๆ เนื่องจากมีข้อดี คือ น้ำหนักเบา และมีขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตาม เทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อเสีย คือ ไม่เหมาะสมกับการทำงานกับน้ำและสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะในระบบมีค่าที่ต่ำ ซึ่งแนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการประยุกต์นำมาใช้งาน คือ การหาแหล่งพลังงานที่ได้เปล่าเช่น ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานเพื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนระบบ Thermocouple [7] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิโดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ T ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T ทำจากทองแดงและสายลบทำจากConstantan ในสภาพการใช้งานปกติสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง -184°C แต่อุณหภูมิทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่นๆคือประมาณเพราะที่อุณหภูมิสูงกว่า 370°C อัตราการเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเพิ่มมากขึ้นเป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษและสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum , Oxidizing , reducing หรือ inert ได้ดี การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไปได้จึงไม่เหมาะกับงานลักษณะนี้จากการทดลองใช้งานใน 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสีจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 %จากมวลของเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้มีความยืดหยุ่นสูงจึงทำให้มีขนาดเล็กให้เลือกใช้เพื่อลดหรือขจัด thermal loading effect ที่จะมีต่อสิ่งที่ต้องการวัดอุณหภูมิที่มีขนาดเล็กๆด้วยการยอมรับของเทอร์โมคัปเปิลได้เลือกใช้ Class A โดยแสดงค่าเกณฑ์การยอมรับของแต่ละClass[8]ในตารางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Tolerance class for thermocouples

Table 2 Tolerance class for thermocouples (reference junction at 0 ^o c)			
	Class 1	Class 2	Class 3
Tolerance (±)	0.5 ^o c or 0.4%	1 ^o c or 0.75%	1 ^o c or 1.5%
Temperature limits for Validity of tolerances			
Type T	-40 ^o c to 350 ^o c	-40 ^o c to 350 ^o c	-200 ^o c to 40 ^o c
Tolerance (±)	1.5 ^o c or 0.4%	2.5 ^o c or 0.75%	2.5 ^o c or 1.5%
Temperature limits for Validity of tolerances			
Type E	-40 ^o c to 800 ^o c	-40 ^o c to 800 ^o c	-200 ^o c to 400 ^o c
Type J	-40 ^o c to 750 ^o c	-40 ^o c to 750 ^o c	-
Type K	-40 ^o c to 1000 ^o c	-40 ^o c to 1000 ^o c	-200 ^o c to 40 ^o c
Type N	-40 ^o c to 1000 ^o c	-40 ^o c to 1000 ^o c	-200 ^o c to 40 ^o c
Tolerance (±)	1 ^o c plus 0.3% of (t-1100) ^o c	1.5 ^o c or 0.25%	4 ^o c or 0.5 %
Temperature limits for Validity of tolerances			
Type R or S	0 ^o c to 1600 ^o c	0 ^o c to 1600 ^o c	-
Type B	-	600 ^o c to 1700 ^o c	600 ^o c to 1700 ^o c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

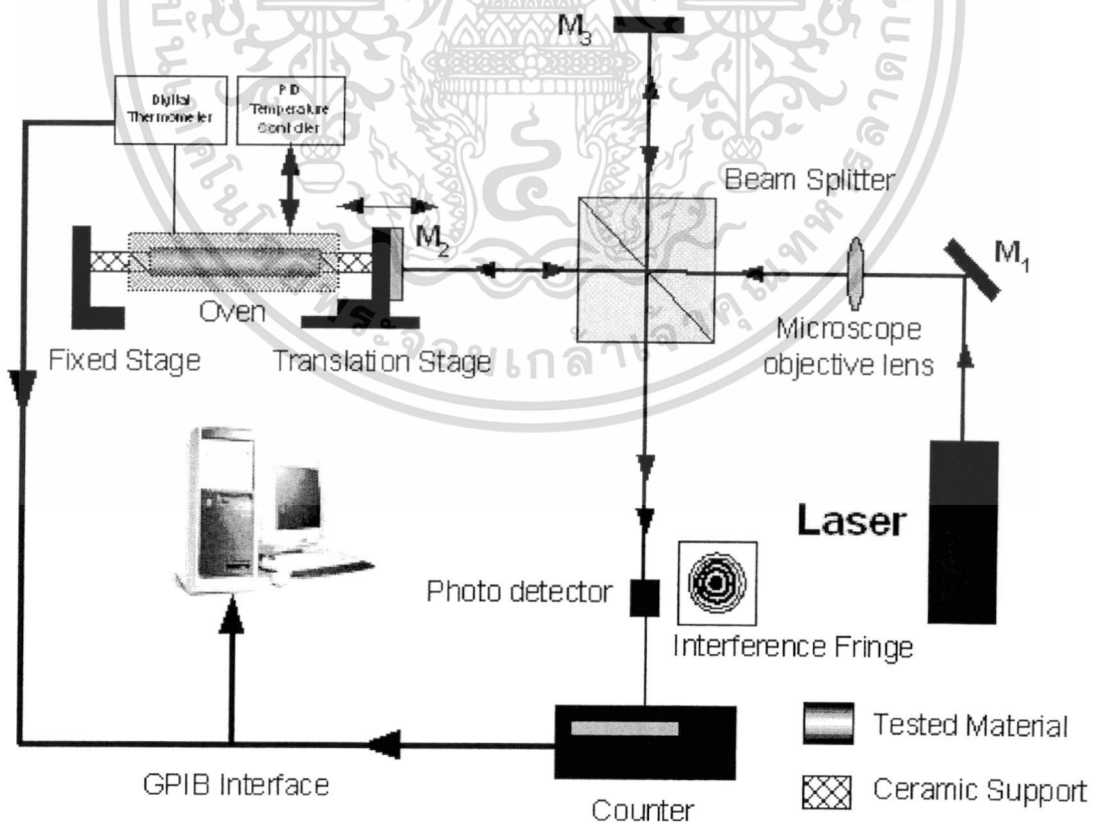
ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุด้วยไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ รายละเอียดส่วนต่างๆในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 การออกแบบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

ในการออกแบบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะมีรายละเอียดของการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาและออกแบบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

ในการศึกษาระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวซึ่งระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ แสดงบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

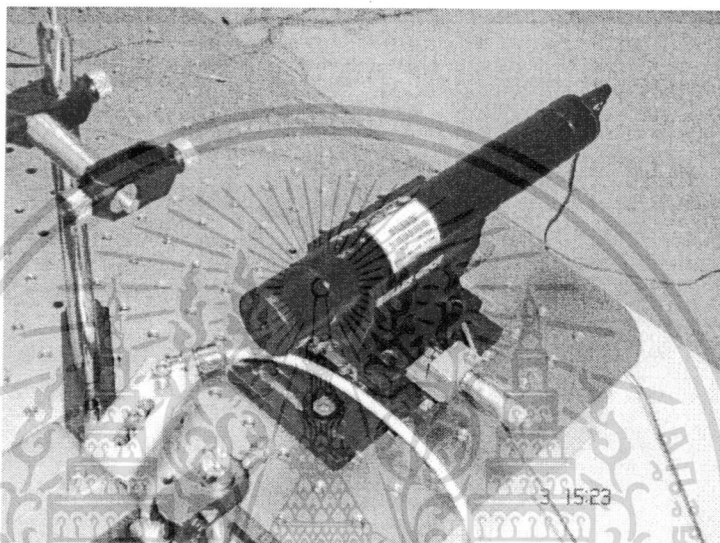
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Laser) จะเดินเข้าสู่กระจกสะท้อน M_1 แล้วสะท้อนเข้าสู่เลนส์หนา (Microscope objective lens) แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางแยกแสง (Beam splitter) ชนิด 50:50 ลำแสงจะแยกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกันและมีความเข้มแสงเท่ากัน โดยลำแสงส่วนที่ 1 เป็นลำแสงที่เกิดจากการส่งผ่านของตัวกลางแยกแสงจะเคลื่อนที่ไปสะท้อนที่กระจก M_2 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังหัววัดแสง (Photo detector) ลำแสงส่วนที่ 2 เป็นลำแสงที่เกิดจากการสะท้อนของตัวกลางแยกแสงจะเคลื่อนที่ไปสะท้อนที่กระจก M_3 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางแยกแสงแล้วเคลื่อนที่ไปที่หัววัดแสง (Photo detector) เช่นกัน เนื่องจากลำแสงทั้งสองมีการเคลื่อนที่เป็นระยะทางไม่เท่ากัน (เนื่องจากกระจกทั้งสองอยู่ห่างจากตัวแยกแสงไม่เท่ากัน) จึงทำให้ลำแสงทั้งสองเกิดการแทรกสอดกัน โดยมีเฟสต่างกันทำให้เกิดลักษณะการแทรกสอดเป็นแถบมืดและแถบสว่างที่หัววัดแสง ตามเงื่อนไขการเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและเสริมตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงร็วรอยการแทรกสอดจะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานตัวอย่างได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะทำการวัดด้วยเครื่อง Data Acquisition รุ่น 34970A ของบริษัท Hewlett Packard บันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ทำการทดสอบเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งการขยายตัวของวัสดุเมื่อชิ้นงานที่ทำการทดสอบได้รับความร้อนจะทำให้ระยะทางของกระจกทั้งสองที่อยู่ห่างกันมีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เกิดร็วรอยการแทรกสอดเปลี่ยนแปลงเป็นร็วมืดและสว่างสลับกันเข้าสู่หัววัดแสง โดยหัววัดแสงจะทำหน้าที่รับความเข้มของแสงที่ได้จากการแทรกสอดแล้วแสดงจำนวนร็วรอยการแทรกสอดที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A ของบริษัท Hewlett Packard แล้วทำการเก็บข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Labview

3.1.2 การจัดแนวแสงสำหรับระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

ในการจัดตั้งระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ จะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์ในการจัดระบบดังต่อไปนี้

- แหล่งกำเนิดแสง(Light source)

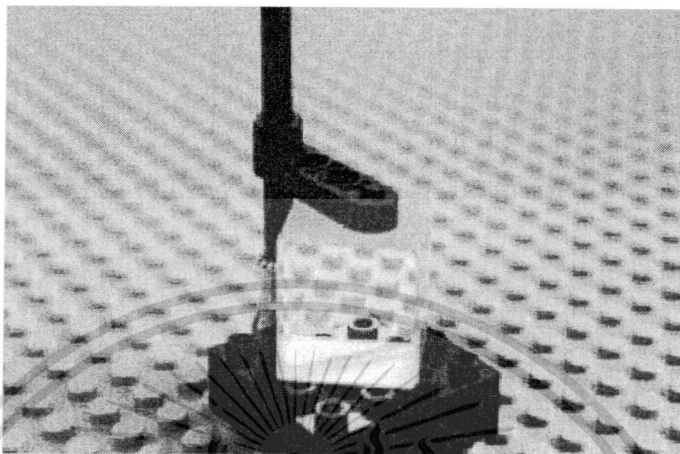


รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง

ในการทดลองได้ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวกำเนิดแสง เนื่องจากแสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์มากและลำแสงมีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขและหลักการแทรกสอดของแสง โดยในงานวิจัยนี้ใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรและมีกำลัง 1mW ของบริษัท Melles Griot เป็นแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

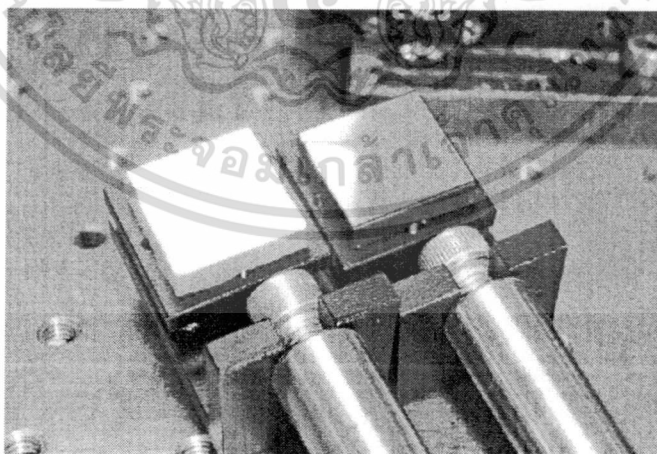
- ตัวแยกแสง (Beam splitter)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตัวแยกแสง

ตัวแยกแสงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกลำแสงเป็นลำแสงสะท้อนและลำแสงส่งผ่าน โดยความเข้มแสงของลำแสงทั้งสองจะเท่ากัน โดยหน้าที่ของตัวแยกแสงจะทำหน้าที่ในการแบ่งแสงออกเป็น 2 ส่วนเพื่อที่จะให้แสงทั้งสองเดินทางไปยังสะท้อนที่กระจกสะท้อนที่มีระยะทางแตกต่างกัน

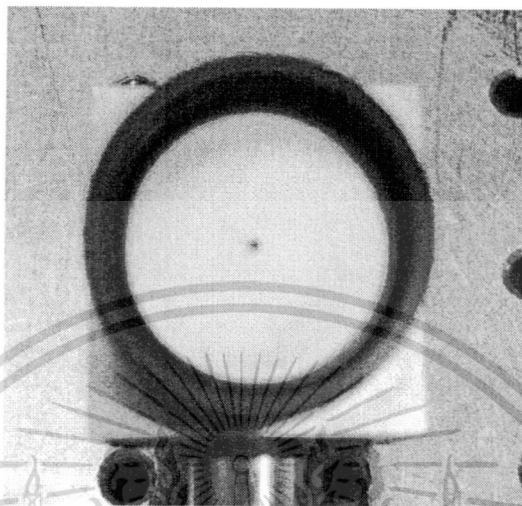
- กระจกสะท้อน



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์กระจกสะท้อน

กระจกสะท้อนเป็นอุปกรณ์ในการใช้การสะท้อนลำแสงสองลำที่แยกออกจากกันจากตัวแยกแสงให้กลับมารวมกันที่ฉากรับแสงโดยกระจกสะท้อนนี้เป็นกระจกที่มีการเคลือบโลหะไว้ที่เอกสารด้านหลังของกระจกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หัววัดแสง



รูปที่ 3.5 หัววัดแสง

หัววัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับความเข้มแสงจากการแทรกสอด โดยหัววัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัววัดแสงที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ

- เครื่อง Universal Counter

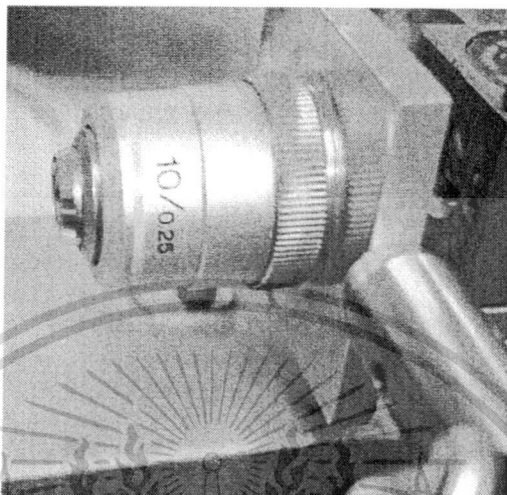


รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Counter

เครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A ของบริษัท Hewlett Packard เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับหัววัดแสง โดยจะมีหน้าที่ในการนับจำนวนร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยเครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A สามารถวัดค่าความถี่และจำนวนร็วรอยการการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลนส์ขยาย



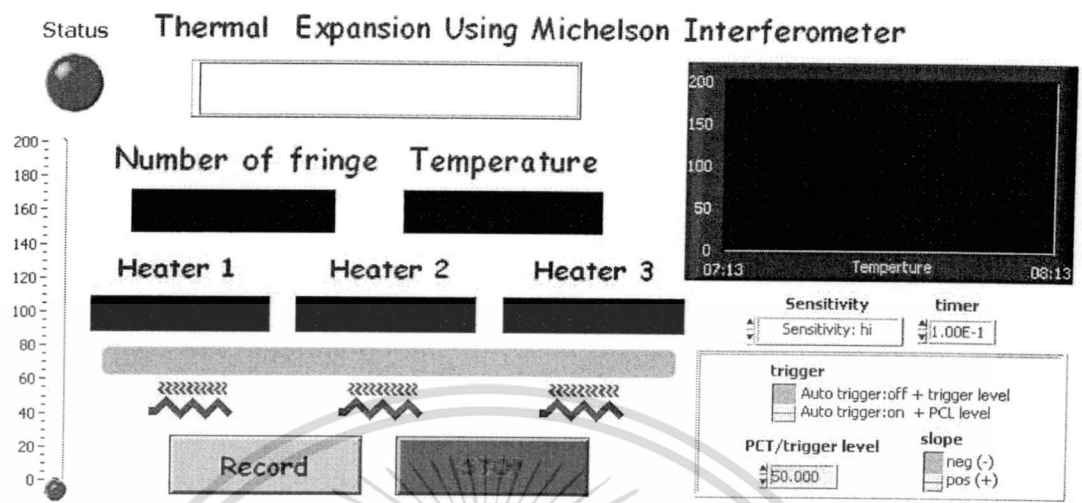
รูปที่ 3.7 เลนส์ขยาย

เลนส์ขยายเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายแสงจากการแทรกสอด เพื่อให้สามารถพิจารณา
ร็วรอยการแทรกสอดได้ง่ายขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเลนส์ขยายที่มีการขยาย 10 เท่าของภาพจริง

3.1.3 การเก็บข้อมูลจากระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

การเก็บข้อมูลจากระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ จะทำการเก็บค่า
อุณหภูมิและจำนวนร็วรอยการแทรกสอด ซึ่งการเก็บค่าอุณหภูมิสามารถเก็บค่าได้จากเครื่อง Data
Acquisition รุ่น 34970A ของบริษัท Hewlett Packard เข้าสู่การ์ดIEEE-488(GPIB Card) และ
จำนวนร็วรอยการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเก็บค่าได้จากเครื่อง Universal Counter รุ่น
53132A ของบริษัท Hewlett Packard เข้าสู่การ์ดIEEE-488(GPIB Card) แล้วข้อมูลจากเครื่องทั้ง 2
จะทำการบันทึกโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 โปรแกรมLabviewที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

3.2 การทดสอบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

เมื่อทำการจัดแนวแสงและจัดระบบการเก็บข้อมูลในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ฟรอมิเตอร์ สำหรับระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุเรียบร้อยแล้ว ต่อไปเป็นกระบวนการทดสอบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ฟรอมิเตอร์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบก่อนประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ โดยการทดสอบระบบแบ่งเป็นทั้งหมด 2 ส่วนดังนี้

3.2.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ฟรอมิเตอร์

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการวัดบนโต๊ะป้องกันการสั่นสะเทือนเพื่อลดการสั่นสะเทือนและทำการตรวจสอบความถูกต้องของแนวแสง เมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ โดยจากสมการ

$$d = n \frac{\lambda}{2}$$

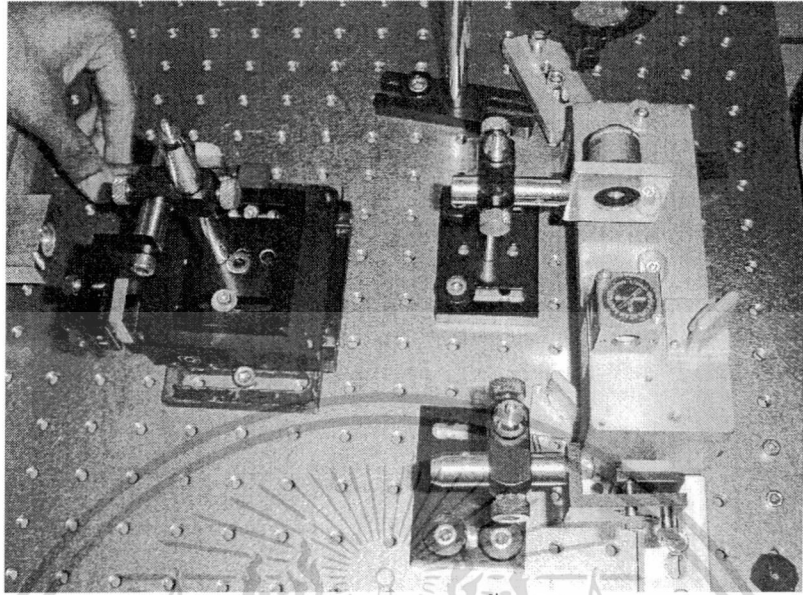
เมื่อ $d = 500 \mu\text{m}$ (ไมโครเมตรหมุนครบ 1 รอบที่ความละเอียด $10 \mu\text{m}$)

$$n = \frac{2 \times 500 \times 10^{-6}}{632.8 \times 10^{-9}}$$

$$n = 1,580 \text{ fring}$$

ซึ่งที่เครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A จะต้องแสดงค่าได้เท่ากับ 1,580 จึงจะถูกต้อง

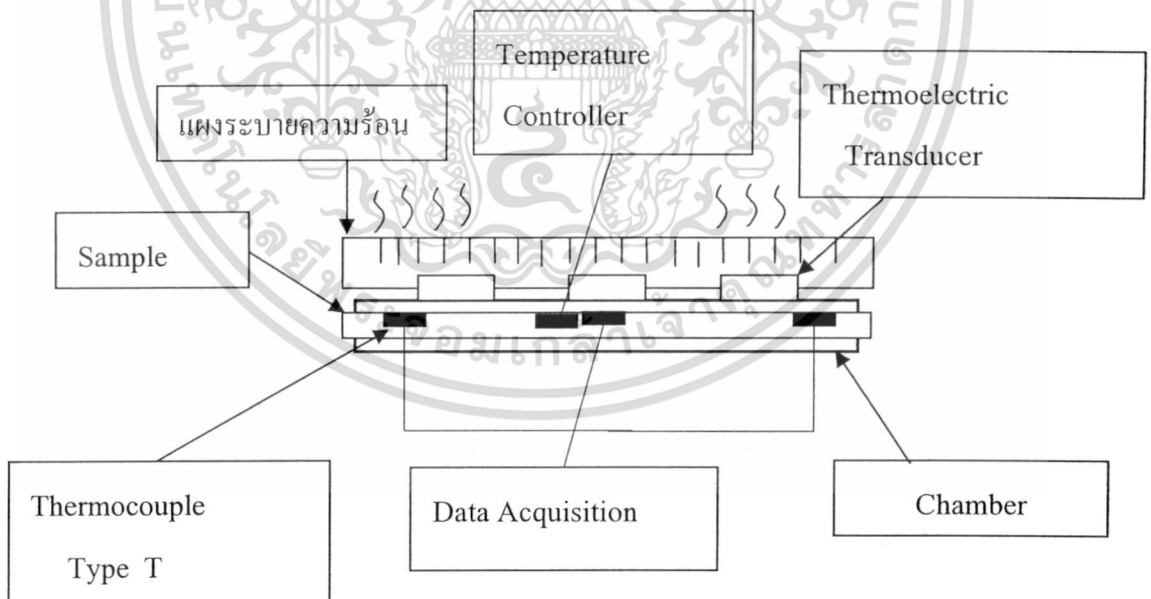
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การจัดและปรับตั้งแนวแสง

3.2.2 ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิ

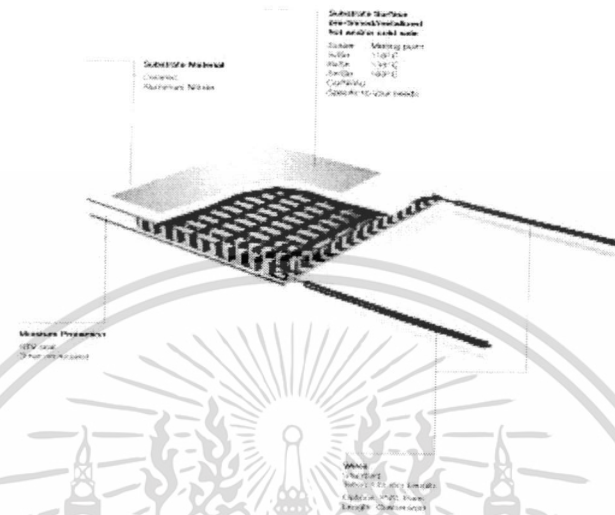
ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิและจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่



รูปที่ 3.10 ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

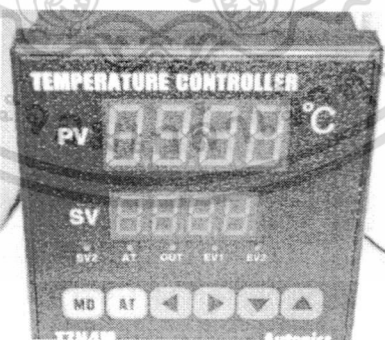
-เทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Thermoelectric Transducer)



รูปที่ 3.11 โครงสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นและความร้อนโดยใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวกลางในการทำความเย็น
 ดังรูปที่ 3.11

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.12 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยลักษณะการทำงานจะเป็นการตัดต่อของรีเลย์ในการจ่ายกระแสและตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่อง Data Acquisition



รูปที่ 3.13 เครื่อง Data Acquisition

เครื่อง Data Acquisition รุ่น 34970A ของบริษัท Hewlett Packard เป็นเครื่องที่ใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน โดยเครื่อง Data Acquisition รุ่น 34970A สามารถใช้วัดค่าอุณหภูมิได้ถึง 20 ช่อง, วัดค่าความต้านทาน, แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าได้ด้วย

-เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)

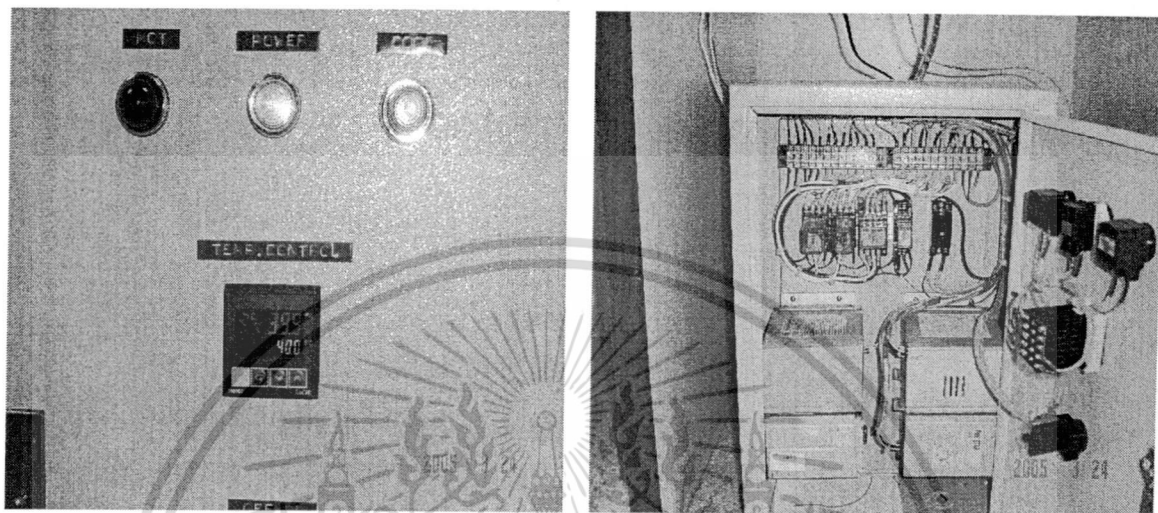


รูปที่ 3.14 เทอร์โมคัปเปิลชนิดแบบ T

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิโดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ T ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)



รูปที่ 3.15 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เป็นไปตามที่กำหนดโดยอาศัยหลักการ
ทำงานของระบบควบคุมแบบ PID Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร็วรอยการแทรกสอดกับการขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ

ในการทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุจะทำการทดลองโดยพิจารณาจากจำนวนร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุก 1 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความยาวที่เปลี่ยนแปลง (ΔL) ต่อความยาวเริ่มต้น (L_0) กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT)

จากความสัมพันธ์

$$d = \frac{n\lambda}{2} \quad (4.1)$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (4.2)$$

สามารถคำนวณหาค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น เมื่อ $d = \Delta L$ (ความยาวที่เปลี่ยนแปลง)

$$\Delta L = \frac{n\lambda}{2} \quad (4.3)$$

เมื่อ n = จำนวนร็วรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

λ = ความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิด

จากสมการที่ 3.2 จะได้ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ทำการทดสอบ ΔL เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ΔT และจากความยาวเดิมคือ L_0 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ และ ΔT เป็นเชิงเส้น

จาก $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T \quad (4.4)$$

เมื่อทำการเทียบสมการที่ 3.4 กับ ความสัมพันธ์เชิงเส้น $y = mx + c$ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta L}{L_0}$ กับ ΔT และมีค่าความชัน (Slope) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ (α)

4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในทางฟิสิกส์จะมีลักษณะเป็นตาราง และทำการพล็อตกราฟของข้อมูล แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวแปร ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาหาความสัมพันธ์ทางกราฟที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือความสัมพันธ์กำลังหนึ่งพิจารณาได้ดังต่อไปนี้ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือความสัมพันธ์กำลังหนึ่ง หมายถึงเมื่อตัวแปรอิสระจะพล็อตบนแกนนอนเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วยแล้วแปรตามจะพล็อตบนแกนตั้งเปลี่ยนค่าไป m ใดๆ (เมื่อ m คือตัวเลขใดๆ) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ในทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$y = mx + c \quad (4.5)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ

c คือ จุดตัดแกน y

4.1.3 การหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนในการวัด

ค่าเฉลี่ยของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุแต่ละชนิดทั้งหมด n ครั้ง ซึ่งจะมี ความสัมพันธ์คือ

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n} \quad (4.6)$$

และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D) มีความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.7)$$

ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด (Uncertainty or standard error of mean) มีความสัมพันธ์คือ

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

จากความสัมพันธ์ที่ 3.6-3.8 จะได้ค่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ได้จากการวัดทั้งหมด n ครั้ง คือ

$$\text{ค่าจากการวัด } n \text{ ครั้ง} = \bar{x} \pm \sigma_x \quad (4.9)$$

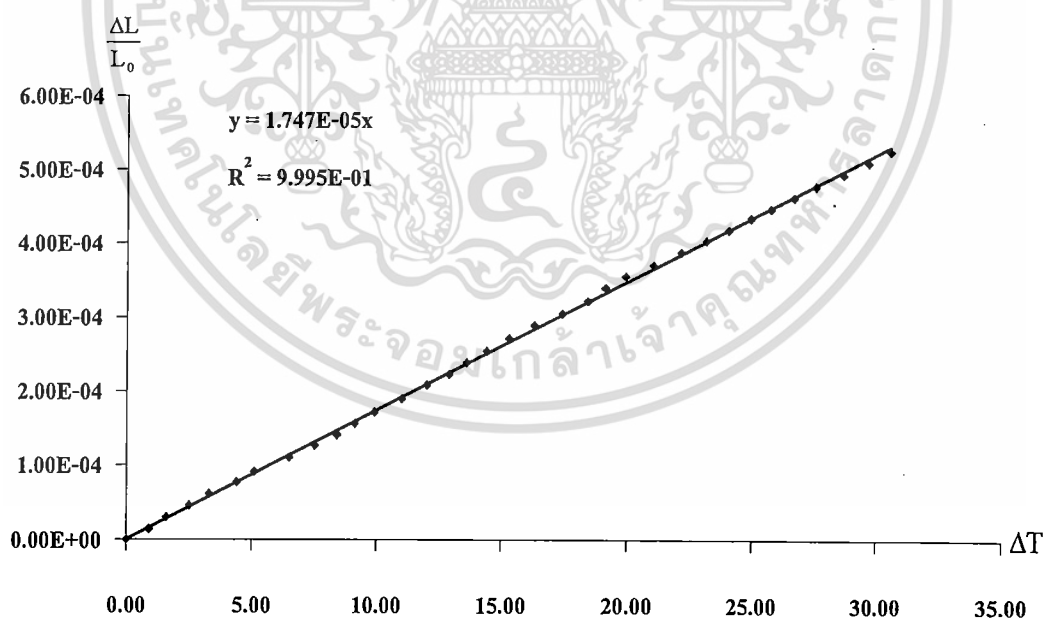
4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ โดยใช้วัสดุสแตนเลส

ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุสแตนเลสที่ความยาว 200 mm. ซึ่งทำการศึกษาการยืดตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยได้ทำการทดสอบอุณหภูมิซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสที่วัดครั้งที่ 1

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
27.30	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
28.20	9.00	0.90	2.85E-06	1.42E-05
28.90	19.00	1.60	6.01E-06	3.01E-05
29.80	29.00	2.50	9.18E-06	4.59E-05
30.60	39.00	3.30	1.23E-05	6.17E-05
31.70	49.00	4.40	1.55E-05	7.75E-05
32.40	58.00	5.10	1.84E-05	9.18E-05
33.80	70.00	6.50	2.21E-05	1.11E-04
34.80	80.00	7.50	2.53E-05	1.27E-04
35.70	89.00	8.40	2.82E-05	1.41E-04
36.40	99.00	9.10	3.13E-05	1.57E-04
37.20	109.00	9.90	3.45E-05	1.72E-04
38.30	120.00	11.00	3.80E-05	1.90E-04
39.30	132.00	12.00	4.18E-05	2.09E-04
40.20	141.00	12.90	4.46E-05	2.23E-04
40.90	151.00	13.60	4.78E-05	2.39E-04
41.70	161.00	14.40	5.09E-05	2.55E-04
42.60	172.00	15.30	5.44E-05	2.72E-04
43.60	183.00	16.30	5.79E-05	2.90E-04
44.70	193.00	17.40	6.11E-05	3.05E-04
45.70	204.00	18.40	6.45E-05	3.23E-04
46.40	215.00	19.10	6.80E-05	3.40E-04

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
47.20	225.00	19.90	7.12E-05	3.56E-04
48.30	235.00	21.00	7.44E-05	3.72E-04
49.40	246.00	22.10	7.78E-05	3.89E-04
50.40	256.00	23.10	8.10E-05	4.05E-04
51.30	265.00	24.00	8.38E-05	4.19E-04
52.20	275.00	24.90	8.70E-05	4.35E-04
53.00	283.00	25.70	8.95E-05	4.48E-04
53.90	293.00	26.60	9.27E-05	4.64E-04
54.80	303.00	27.50	9.59E-05	4.79E-04
55.90	313.00	28.60	9.90E-05	4.95E-04
56.90	323.00	29.60	1.02E-04	5.11E-04
57.80	333.00	30.50	1.05E-04	5.27E-04



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.1 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 1.747 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $1.747 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสตีลครั้งที่ 1

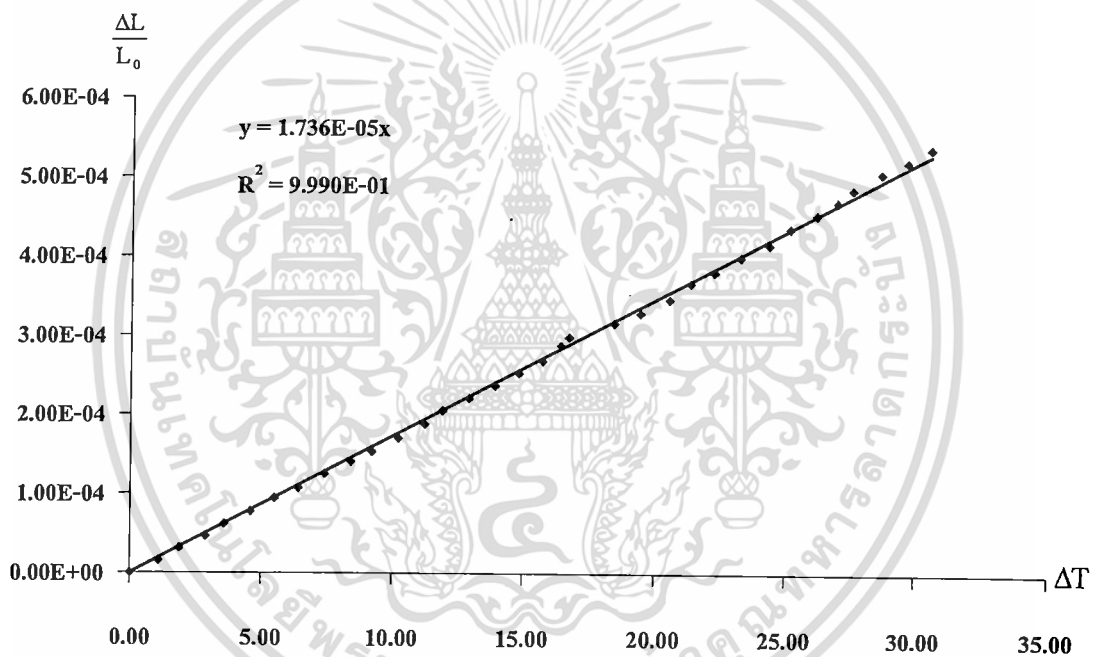
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่ 2

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
27.30	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
28.40	10.00	1.10	3.16E-06	1.58E-05
29.20	20.00	1.90	6.33E-06	3.16E-05
30.20	29.00	2.90	9.18E-06	4.59E-05
30.90	39.00	3.60	1.23E-05	6.17E-05
31.90	49.00	4.60	1.55E-05	7.75E-05
32.80	60.00	5.50	1.90E-05	9.49E-05
33.70	68.00	6.40	2.15E-05	1.08E-04
34.70	79.00	7.40	2.50E-05	1.25E-04
35.70	89.00	8.40	2.82E-05	1.41E-04
36.50	97.00	9.20	3.07E-05	1.53E-04
37.50	108.00	10.20	3.42E-05	1.71E-04
38.50	119.00	11.20	3.77E-05	1.88E-04
39.20	130.00	11.90	4.11E-05	2.06E-04
40.20	140.00	12.90	4.43E-05	2.21E-04
41.20	150.00	13.90	4.75E-05	2.37E-04
42.10	160.00	14.80	5.06E-05	2.53E-04
43.00	170.00	15.70	5.38E-05	2.69E-04
43.70	182.00	16.40	5.76E-05	2.88E-04
44.00	189.00	16.70	5.98E-05	2.99E-04
45.70	200.00	18.40	6.33E-05	3.16E-04
46.70	208.00	19.40	6.58E-05	3.29E-04
47.80	219.00	20.50	6.93E-05	3.46E-04
48.60	232.00	21.30	7.34E-05	3.67E-04
49.50	241.00	22.20	7.63E-05	3.81E-04
50.50	253.00	23.20	8.00E-05	4.00E-04
51.60	263.00	24.30	8.32E-05	4.16E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
52.40	276.00	25.10	8.73E-05	4.37E-04
53.40	287.00	26.10	9.08E-05	4.54E-04
54.20	297.00	26.90	9.40E-05	4.70E-04
54.80	307.00	27.50	9.71E-05	4.86E-04
55.90	320.00	28.60	1.01E-04	5.06E-04
56.90	329.00	29.60	1.04E-04	5.20E-04
57.80	340.00	30.50	1.08E-04	5.38E-04



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสสตีลครั้งที่ 2

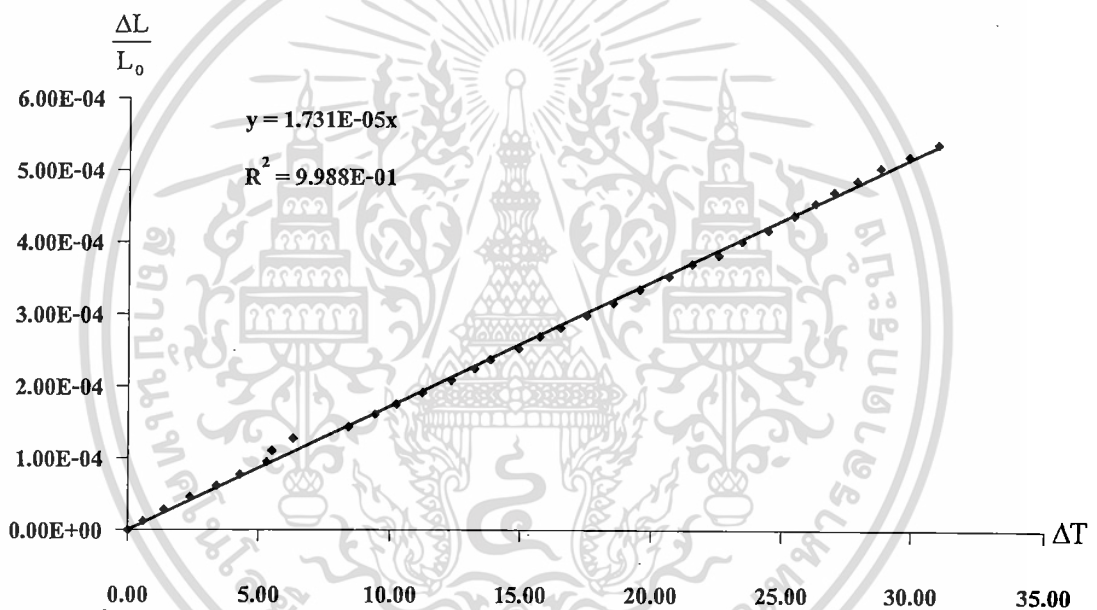
จากรูปที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 1.736 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $1.736 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสสตีลครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสตีลครั้งที่ 3

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
27.50	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
28.10	8.00	0.60	2.53E-06	1.27E-05
28.90	18.00	1.40	5.70E-06	2.85E-05
29.90	29.00	2.40	9.18E-06	4.59E-05
30.90	39.00	3.40	1.23E-05	6.17E-05
31.80	49.00	4.30	1.55E-05	7.75E-05
32.80	60.00	5.30	1.90E-05	9.49E-05
33.00	70.00	5.50	2.21E-05	1.11E-04
33.80	81.00	6.30	2.56E-05	1.28E-04
35.90	91.00	8.40	2.88E-05	1.44E-04
36.90	102.00	9.40	3.23E-05	1.61E-04
37.70	111.00	10.20	3.51E-05	1.76E-04
38.70	121.00	11.20	3.83E-05	1.91E-04
39.80	132.00	12.30	4.18E-05	2.09E-04
40.70	142.00	13.20	4.49E-05	2.25E-04
41.30	150.00	13.80	4.75E-05	2.37E-04
42.40	160.00	14.90	5.06E-05	2.53E-04
43.20	170.00	15.70	5.38E-05	2.69E-04
44.00	178.00	16.50	5.63E-05	2.82E-04
45.00	189.00	17.50	5.98E-05	2.99E-04
46.00	200.00	18.50	6.33E-05	3.16E-04
47.00	212.00	19.50	6.71E-05	3.35E-04
48.10	223.00	20.60	7.06E-05	3.53E-04
49.00	234.00	21.50	7.40E-05	3.70E-04
50.00	242.00	22.50	7.66E-05	3.83E-04
50.90	254.00	23.40	8.04E-05	4.02E-04
51.90	264.00	24.40	8.35E-05	4.18E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
52.90	277.00	25.40	8.76E-05	4.38E-04
53.70	288.00	26.20	9.11E-05	4.56E-04
54.40	298.00	26.90	9.43E-05	4.71E-04
55.30	308.00	27.80	9.75E-05	4.87E-04
56.20	319.00	28.70	1.01E-04	5.05E-04
57.30	329.00	29.80	1.04E-04	5.20E-04
58.40	340.00	30.90	1.08E-04	5.38E-04



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสสตีลครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 1.731 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $1.731 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสสตีล ครั้งที่ 3

จากผลการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสสตีล ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $1.732 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสสตีลดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสสตีล 3 ครั้ง และค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น $\times 10^{-5}$ (α) / $^\circ\text{C}$
1	1.747
2	1.736
3	1.731
เฉลี่ย	1.738

จากตารางที่ 4.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของสแตนเลสสตีลของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสสตีลเฉลี่ยเท่ากับ $1.738 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 4.51×10^{-8} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 1.00×10^{-7} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสแตนเลสสตีลทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ $(1.738 \pm 0.010) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ โดยใช้วัสดุทองเหลือง

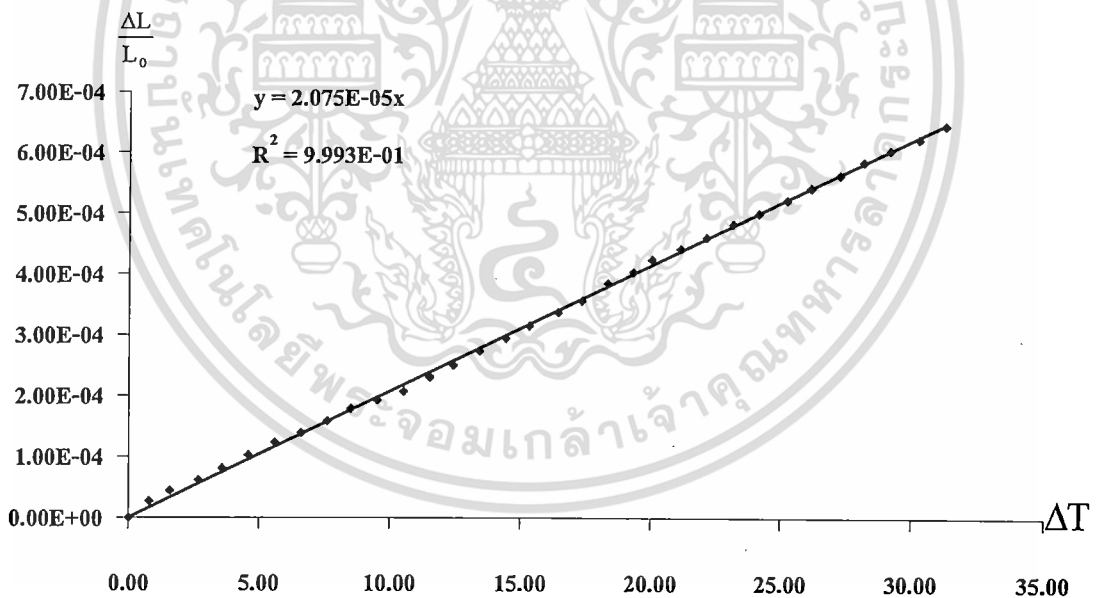
ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุประเภททองเหลืองที่มีความยาว 200 mm. ซึ่งทำการศึกษาการยืดตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยได้ทำการทดสอบอุณหภูมิซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 1

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
28.20	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
29.00	17.00	0.80	5.38E-06	2.69E-05
29.80	28.00	1.60	8.86E-06	4.43E-05
30.90	39.00	2.70	1.23E-05	6.17E-05
31.80	51.00	3.60	1.61E-05	8.07E-05
32.80	65.00	4.60	2.06E-05	1.03E-04
33.80	78.00	5.60	2.47E-05	1.23E-04
34.80	88.00	6.60	2.78E-05	1.39E-04
35.80	100.00	7.60	3.16E-05	1.58E-04
36.70	113.00	8.50	3.58E-05	1.79E-04
37.70	122.00	9.50	3.86E-05	1.93E-04
38.70	131.00	10.50	4.14E-05	2.07E-04
39.70	146.00	11.50	4.62E-05	2.31E-04
40.60	158.00	12.40	5.00E-05	2.50E-04
41.60	173.00	13.40	5.47E-05	2.74E-04
42.60	186.00	14.40	5.89E-05	2.94E-04
43.50	199.00	15.30	6.30E-05	3.15E-04
44.60	213.00	16.40	6.74E-05	3.37E-04
45.50	225.00	17.30	7.12E-05	3.56E-04
46.50	243.00	18.30	7.69E-05	3.84E-04
47.50	255.00	19.30	8.07E-05	4.03E-04
48.20	268.00	20.00	8.48E-05	4.24E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L/L_0$
49.30	279.00	21.10	8.83E-05	4.41E-04
50.30	291.00	22.10	9.21E-05	4.60E-04
51.30	305.00	23.10	9.65E-05	4.83E-04
52.30	316.00	24.10	1.00E-04	5.00E-04
53.40	330.00	25.20	1.04E-04	5.22E-04
54.30	343.00	26.10	1.09E-04	5.43E-04
55.40	356.00	27.20	1.13E-04	5.63E-04
56.30	370.00	28.10	1.17E-04	5.85E-04
57.30	382.00	29.10	1.21E-04	6.04E-04
58.40	394.00	30.20	1.25E-04	6.23E-04
59.40	408.00	31.20	1.29E-04	6.45E-04



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 1

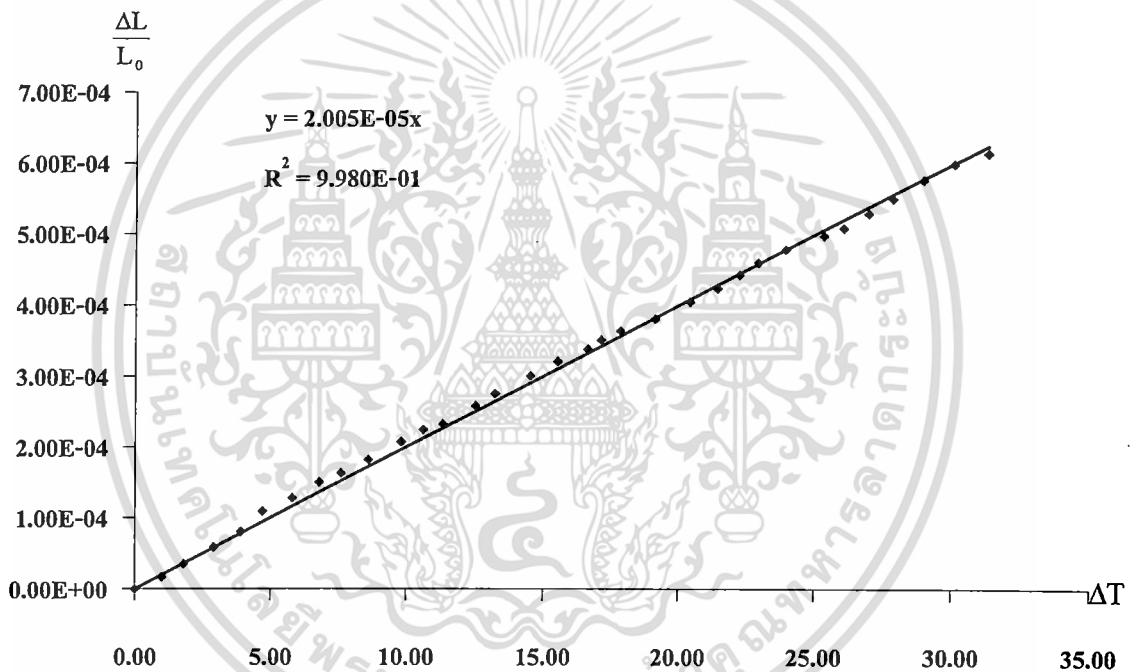
จากรูปที่ 4.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 2.075 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $2.075 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 2

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
28.40	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
29.40	11.00	1.00	3.48E-06	1.74E-05
30.20	22.00	1.80	6.96E-06	3.48E-05
31.30	37.00	2.90	1.17E-05	5.85E-05
32.30	51.00	3.90	1.61E-05	8.07E-05
33.10	69.00	4.70	2.18E-05	1.09E-04
34.20	81.00	5.80	2.56E-05	1.28E-04
35.20	95.00	6.80	3.01E-05	1.50E-04
36.00	103.00	7.60	3.26E-05	1.63E-04
37.00	115.00	8.60	3.64E-05	1.82E-04
38.20	131.00	9.80	4.14E-05	2.07E-04
39.00	142.00	10.60	4.49E-05	2.25E-04
39.70	147.00	11.30	4.65E-05	2.33E-04
40.90	163.00	12.50	5.16E-05	2.58E-04
41.60	174.00	13.20	5.51E-05	2.75E-04
42.90	190.00	14.50	6.01E-05	3.01E-04
43.90	203.00	15.50	6.42E-05	3.21E-04
45.00	214.00	16.60	6.77E-05	3.39E-04
45.50	222.00	17.10	7.02E-05	3.51E-04
46.20	230.00	17.80	7.28E-05	3.64E-04
47.50	241.00	19.10	7.63E-05	3.81E-04
48.80	256.00	20.40	8.10E-05	4.05E-04
49.80	268.00	21.40	8.48E-05	4.24E-04
50.60	280.00	22.20	8.86E-05	4.43E-04
51.30	291.00	22.90	9.21E-05	4.60E-04
52.30	303.00	23.90	9.59E-05	4.79E-04
53.70	315.00	25.30	9.97E-05	4.98E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
54.40	322.00	26.00	1.02E-04	5.09E-04
55.30	335.00	26.90	1.06E-04	5.30E-04
56.20	348.00	27.80	1.10E-04	5.51E-04
57.30	365.00	28.90	1.15E-04	5.77E-04
58.40	379.00	30.00	1.20E-04	6.00E-04
59.60	389.00	31.20	1.23E-04	6.15E-04



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 2

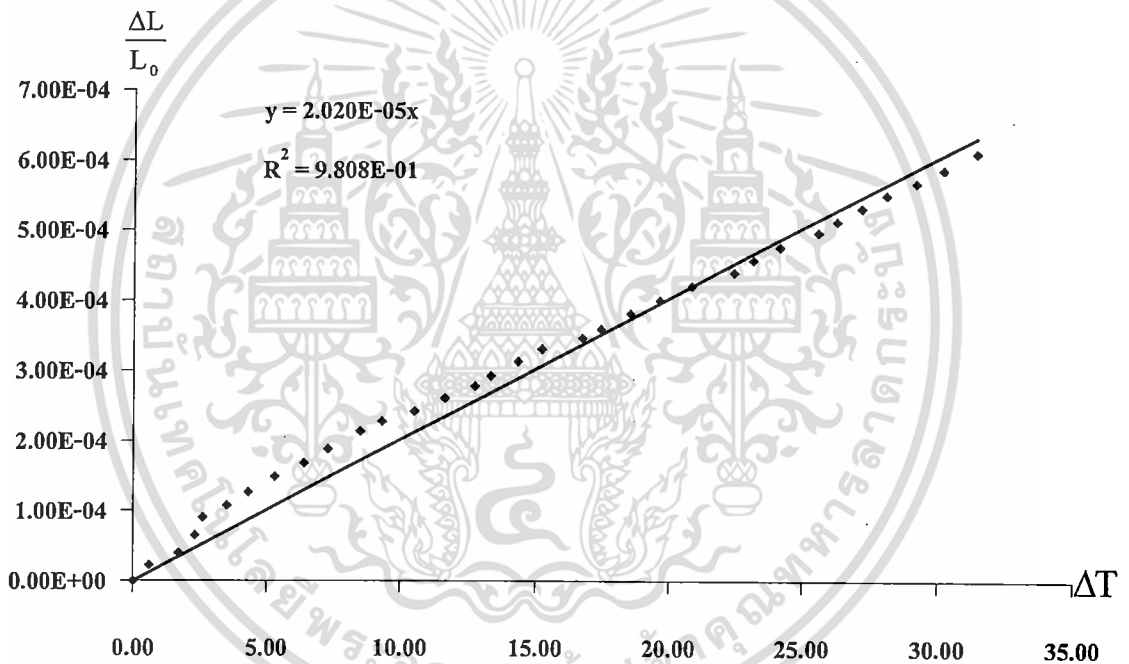
จากรูปที่ 4.5 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 2.005 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $2.005 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 3

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
28.20	0.00	0.00	0.00E+00	0.00E+00
28.80	14.00	0.60	4.43E-06	2.21E-05
29.90	25.00	1.70	7.91E-06	3.96E-05
30.50	41.00	2.30	1.30E-05	6.49E-05
30.80	57.00	2.60	1.80E-05	9.02E-05
31.70	68.00	3.50	2.15E-05	1.08E-04
32.50	80.00	4.30	2.53E-05	1.27E-04
33.50	94.00	5.30	2.97E-05	1.49E-04
34.60	106.00	6.40	3.35E-05	1.68E-04
35.50	119.00	7.30	3.77E-05	1.88E-04
36.70	135.00	8.50	4.27E-05	2.14E-04
37.50	144.00	9.30	4.56E-05	2.28E-04
38.70	153.00	10.50	4.84E-05	2.42E-04
39.80	165.00	11.60	5.22E-05	2.61E-04
40.90	176.00	12.70	5.57E-05	2.78E-04
41.50	185.00	13.30	5.85E-05	2.93E-04
42.50	198.00	14.30	6.26E-05	3.13E-04
43.40	209.00	15.20	6.61E-05	3.31E-04
44.90	219.00	16.70	6.93E-05	3.46E-04
45.60	227.00	17.40	7.18E-05	3.59E-04
46.70	241.00	18.50	7.63E-05	3.81E-04
47.80	253.00	19.60	8.00E-05	4.00E-04
49.00	266.00	20.80	8.42E-05	4.21E-04
50.60	278.00	22.40	8.80E-05	4.40E-04
51.30	289.00	23.10	9.14E-05	4.57E-04
52.30	301.00	24.10	9.52E-05	4.76E-04
53.70	314.00	25.50	9.93E-05	4.97E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L/L_0$
54.40	324.00	26.20	1.03E-04	5.13E-04
55.30	336.00	27.10	1.06E-04	5.32E-04
56.20	348.00	28.00	1.10E-04	5.51E-04
57.30	359.00	29.10	1.14E-04	5.68E-04
58.30	371.00	30.10	1.17E-04	5.87E-04
59.50	386.00	31.30	1.22E-04	6.11E-04



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 2.020 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $2.020 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 3

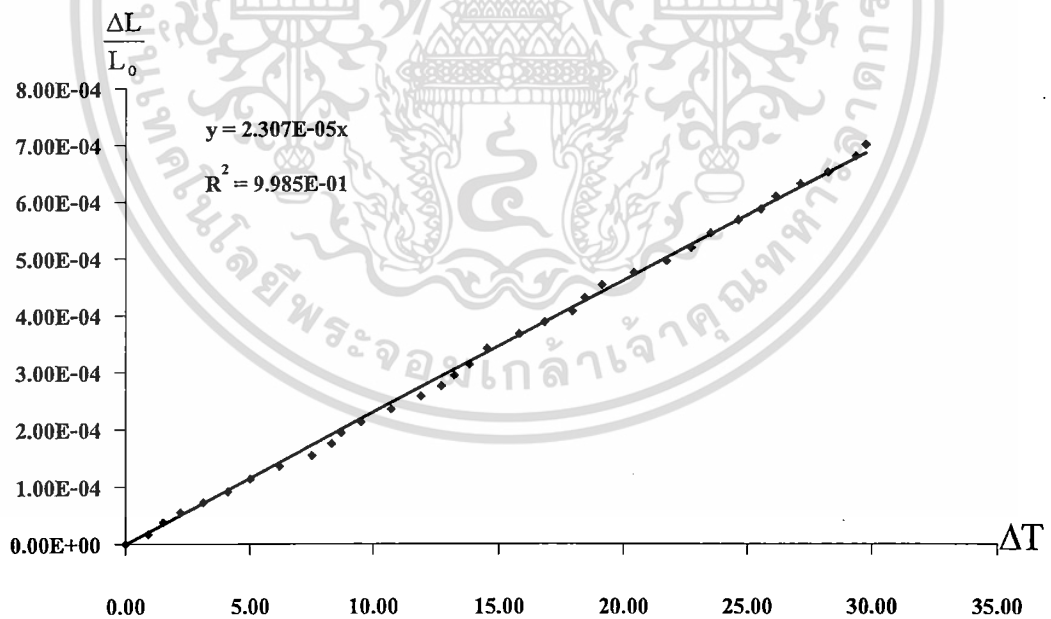
จากการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $2.03 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลืองดังนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลือง 3 ครั้ง และค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น $\times 10^{-5}$ (α) / $^\circ\text{C}$
1	2.075
2	2.005
3	2.020
เฉลี่ย	2.033

จากตารางที่ 4.8 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลืองของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองเฉลี่ยเท่ากับ $2.033 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 3.69×10^{-7} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 2.130×10^{-7} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ $(2.033 \pm 0.021) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

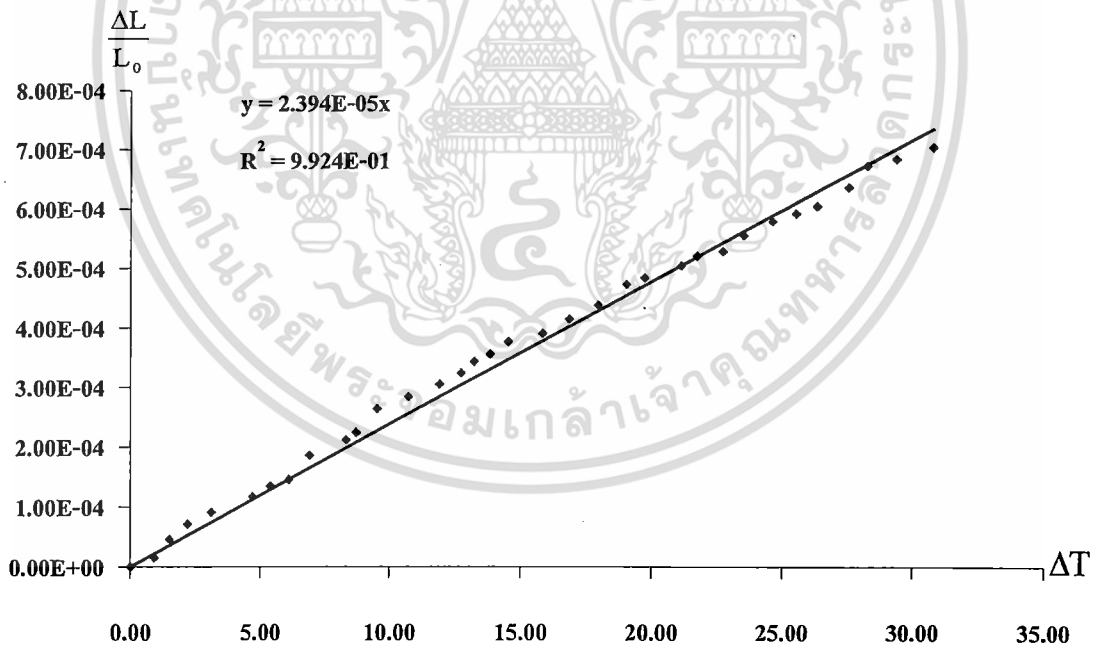
Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L/L_0$
46.20	286.00	19.10	9.05E-05	4.52E-04
47.50	300.00	20.40	9.49E-05	4.75E-04
48.80	313.00	21.70	9.90E-05	4.95E-04
49.80	328.00	22.70	1.04E-04	5.19E-04
50.60	344.00	23.50	1.09E-04	5.44E-04
51.70	359.00	24.60	1.14E-04	5.68E-04
52.60	371.00	25.50	1.17E-04	5.87E-04
53.20	385.00	26.10	1.22E-04	6.09E-04
54.20	399.00	27.10	1.26E-04	6.31E-04
55.30	412.00	28.20	1.30E-04	6.52E-04
56.40	430.00	29.30	1.36E-04	6.80E-04
56.80	443.00	29.70	1.40E-04	7.01E-04



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temp. Average(T)	Count(n)	ΔT	ΔL	$\Delta L / L_0$
48.20	319.00	21.10	1.01E-04	5.05E-04
48.80	329.00	21.70	1.04E-04	5.20E-04
49.80	334.00	22.70	1.06E-04	5.28E-04
50.60	351.00	23.50	1.11E-04	5.55E-04
51.70	366.00	24.60	1.16E-04	5.79E-04
52.60	374.00	25.50	1.18E-04	5.92E-04
53.40	382.00	26.30	1.21E-04	6.04E-04
54.60	402.00	27.50	1.27E-04	6.36E-04
55.30	425.00	28.20	1.34E-04	6.72E-04
56.40	432.00	29.30	1.37E-04	6.83E-04
57.80	445.00	30.70	1.41E-04	7.04E-04



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.8 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 2.394 \times 10^{-5} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $2.394 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียมดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียม 3 ครั้งและค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น $\times 10^{-5}$ (α) / $^\circ\text{C}$
1	2.307
2	2.394
3	2.310
เฉลี่ย	2.334

จากตารางที่ 4.12 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียมของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมเฉลี่ยเท่ากับ $2.32 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 4.93×10^{-7} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 2.84×10^{-7} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ $(2.334 \pm 0.052) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$