

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ
ด้วยไมโครสแตนด์อินเทอร์ฟีโรมิเตอร์



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A Measurement of Linear Thermal Expansion Coefficient Using
Michelson Interferometer**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor
Of Science**

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุด้วย
 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
นักศึกษา นายสุทธิชัย พรศักดิ์หาญ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาดีคดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.สุรชาติ กมลคิลก

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติ ให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
กรรมการ	ผศ.ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์	ผศ.ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์
กรรมการ	ผศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม	ผศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาดีคดา	ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาดีคดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ กมลคิลก	อ.สุรชาติ กมลคิลก

.....
 (รองศาสตราจารย์ วิชาญ เดชิตีระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุด้วย ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
นักศึกษา	นายสุทธิชัย พรศักดิ์หาญ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดคา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ กมลดีดิก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะด้วยเทคนิคไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ซึ่งมีเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่วนควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะจะถูกวัดโดยไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วยความละเอียด 316 นาโนเมตร ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 °C ถึง 60 °C ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม, ทองเหลือง และอะลูมิเนียมอัลลอยมีค่า $(1.738 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $(20.33 \pm 0.21) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ และ $(23.37 \pm 0.29) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Special Project Title	A Measurement of Linear Thermal Expansion Coefficient Using Michelson Interferometer
Name	Mr.Suttichai Pornsakhan
Department	Applied Physics
Program	Applied Physics
Academic Year	2005
Special Project Advisor	Asst. Prof.Dr. Warawoot Thowladda
Special Project co-Advisor	Mr.Surachart Kamoldilok

ABSTRACT

This special project proposes a method for measuring a linear thermal expansion coefficient of metal using Michelson's interferometer. The developed linear thermal expansion coefficient measurement system consists of 2 parts: Michelson's interferometer and temperature control system. Helium-neon laser wavelength of 632.8 nm was used as a light source in the Michelson's interferometer. Thermoelectric transducers were used as heat source in the temperature control system. The temperature of a tested material could be controlled by PID temperature controller. Linear thermal expansion of metal was measured by Michelson's interferometer with resolution of 316 nm within temperature range between 20°C and 60°C. From the experiments found that the stainless steel, brass and aluminum alloy have linear thermal expansion coefficient of $(1738 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $(2033 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ and $(2337 \pm 0.29) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณา จาก ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และอาจารย์สุรชาติ กมลฉิลก ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและข้อเสนอแนะต่างๆ ทั้งใน ส่วนเทคนิคการวัดและการดำเนินงาน แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีและประโยชน์อันเกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดาอันเป็นที่รักและเคารพ ตลอดจนครอบครัวอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆให้กับข้าพเจ้า

สุทธิชัย พรศักดิ์หาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	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
2.2.1 โคฮีเรนซ์	7
2.3 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	8
2.3.1 การกีดกันรบกวนการแทรกสอด	9
2.3.2 หลักการวัดระยะทางด้วยไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์	10
2.3.3 การคำนวณระยะทาง	10
2.4 การขยายตัวของวัสดุตามอุณหภูมิ	11
2.4.1 การขยายตัวเชิงความยาว	11
2.4.2 การขยายตัวเชิงพื้นที่	12
2.4.3 การขยายตัวเชิงปริมาตร	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 การเกิดการ Off Set	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5.4 การควบคุมแบบ Proportional Integral (PI Control)	17
2.5.5 การควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD Control)	19
2.5.6 การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID Control)	20
2.5.7 จุดมุ่งหมายของการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ	21
2.5.8 การควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบFUZZY	23
2.5.9 การควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบFUZZY และPID	23
2.5.10 AUTO-TUNING	23
2.5.11 เอาต์พุตของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	24
2.5.12 เทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	25
2.5.13 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 การออกแบบระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ	32
3.1.1 ศึกษาและออกแบบระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ	32
3.1.2 การจัดแนวแสงสำหรับระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ	34
3.1.3 ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิ	37
3.2 การทดสอบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ	41
3.2.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์พีซี	41
3.2.2 ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิ	42
3.3 การเก็บข้อมูลจากระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ	42
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	44
4.1 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์พีซี	44
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรีวรอยการแทรกสอดกับการขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ	44
4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.1.3 การหาค่าเฉลี่ยและความไม่แน่นอนในการวัด	45
4.1.4 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	45
4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิม	46
4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง	54
4.4 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
5.3 แนวทางการพัฒนา	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 2.1 Tolerance class for thermocouples	31
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 1	47
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 2	49
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 3	51
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ครั้งและค่าเฉลี่ย	53
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 1	55
ตารางที่ 4.6 ผลการวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 2	57
ตารางที่ 4.7 ผลการวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 3	59
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลือง 3 ครั้งและค่าเฉลี่ย	61
ตารางที่ 4.9 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 1	63
ตารางที่ 4.10 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 2	65
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิครั้งที่ 3	67
ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียม 3 ครั้งและค่าเฉลี่ย	69

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะการซ้อนทับของคลื่น	5
รูปที่ 2.2 การแทรกสอดเสริมและหักล้างและแบบเสริมเนื่องจากผลต่างทางเดินแสง	6
รูปที่ 2.3 แสงโคฮีเรนต์และอิน โคฮีเรนต์	7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของโคฮีเรนต์	8
รูปที่ 2.5 ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์	8
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งภาพของกระจก M_2 แสดงให้เห็นระยะห่างระหว่างกระจก	9
รูปที่ 2.7 การเกิดริ้วรอยแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดเสมือน	9
รูปที่ 2.8 ริ้วรอยการแทรกสอดจากไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์	10
รูปที่ 2.9 การเรียงตัวของอะตอมของของแข็งชี้ให้เห็นด้วย แรงยึดเหนี่ยวที่เสมือนว่าจะคอมมิสปริงยึดติดกันอยู่	11
รูปที่ 2.10 การควบคุมแบบ ON-OFF	14
รูปที่ 2.11 การควบคุมแบบ ON-OFF โดยมี Hysteresis	15
รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Proportional Band	16
รูปที่ 2.13 Proportional Bandที่bias50%	16
รูปที่ 2.14 ลักษณะของการ Offset	17
รูปที่ 2.15 สัญญาณควบคุมของPI Control	18
รูปที่ 2.16 การเกิด Oscillate และ Unstable	19
รูปที่ 2.17 สัญญาณควบคุมของ PD Control	20
รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองของ PID Control	21
รูปที่ 2.19 การทำAuto Tuning	24
รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบเอาต์พุต 4-20 mA กับ100%	24
รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบ เอาต์พุตร้อยละกับ 0 – 100%	25
รูปที่ 2.22 การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร	26
รูปที่ 2.23 การกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พร้อมไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ	32
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดแสง	34
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตัวกลางแยกแสง	35
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์กระจกสะท้อน	35
รูปที่ 3.5 หัววัดแสง	36
รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Counter	36
รูปที่ 3.7 เลนส์ขยาย	37
รูปที่ 3.8 ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ	37
รูปที่ 3.9 โครงสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	38
รูปที่ 3.10 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	38
รูปที่ 3.11 เครื่อง Data Acquisition	39
รูปที่ 3.12 เทอร์โมคัปเปิลชนิด T	39
รูปที่ 3.13 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	41
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานตัวอย่าง	40
รูปที่ 3.15 การจัดและปรับแนวแสง	41
รูปที่ 3.16 การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ	42
รูปที่ 3.17 โปรแกรมLabview ที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ	43
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม	46
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 1	48
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 2	50
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 3	52
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของทองเหลือง	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 1	56
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 2	58
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 3	60
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของอะลูมิเนียม	62
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 1	64
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 2	66
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 3	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศไทยเป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่รักษามาตรฐานการวัด และพัฒนาระบบการวัดให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลโดยในสาขามีติได้นำระบบการวัดทางแสงประยุกต์ใช้วัดความถูกต้องของความยาวซึ่งคือใช้ความแม่นยำและความละเอียดสูงเช่นงานสอบเทียบแท่งมาตรฐาน (Gauge Block) ปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นจากการวัดความยาว คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องกับมาตรฐานอ้างอิง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของโลหะเกิดการขยายตัว ทั้งในการขยายตัวเชิงเส้น เชิงพื้นที่ และเชิงปริมาตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นจะส่งผลกระทบต่อ การวัดความยาวเป็นอย่างมาก ซึ่งมีเทคนิคในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนอยู่หลายวิธีแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคการวัดที่เป็นที่ยอมรับและจัดทำเป็นมาตรฐานที่นำมาใช้กัน อย่างแพร่หลายได้แก่

Mechanical Dilatometer Techniques

Optical Interference Techniques

Optical Imaging Techniques

X – Ray Diffraction Techniques

Mechanical Analysis Techniques

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้หลักการแทรกสอดของแสงโดยเทคนิคไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะ ซึ่งระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์นี้ สามารถใช้วัดระยะทางความละเอียดในการวัดคือ 316 นาโนเมตร จึงเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุประเภทต่าง ๆ โดยสามารถวัดค่าการขยายตัวของโลหะ ได้อย่างละเอียดและแม่นยำ อีกทั้งยังจะเป็นการนำระบบการวัดทางแสงมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในประเทศ จึงเป็นที่มาของการศึกษาการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะ เพื่อที่จะช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น อีกทั้งผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้ได้ถึงความสำคัญในการพัฒนาระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุที่มีความแม่นยำสูง ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะ
- เพื่อศึกษาการวัดการขยายตัวของโลหะด้วยไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์
- เพื่อศึกษาระบบการวัดในงานที่มีความละเอียดสูงด้วยวิธีการทางแสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ
- ศึกษาหลักการและทฤษฎีของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์
- สร้างระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วง 20°C ถึง 60°C
- คิดตั้งอุปกรณ์ และทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะ ด้วยวิธีไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ในการดำเนินการวิจัยได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ศึกษาข้อมูล ที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 2. จัดหาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 3. คิดตั้งระบบที่ใช้ในการวัด และทดสอบระบบที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนที่ 4. ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะ ชนิดต่างๆ

ขั้นตอนที่ 5. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 6. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน										
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
ขั้นตอนที่ 1	←→										
ขั้นตอนที่ 2		←→									
ขั้นตอนที่ 3				←→							
ขั้นตอนที่ 4					←→						
ขั้นตอนที่ 5							←→				
ขั้นตอนที่ 6	←→										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

- ได้แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการวัดความยาวที่มีความละเอียดสูง
- สามารถพัฒนาเทคนิคการวัดทางแสงมาใช้ประโยชน์ได้
- ได้ความรู้ความเข้าใจในระบบวัดทางแสงและมีทักษะความเข้าใจในการแก้ปัญหาในงานวิจัยเบื้องต้น
- ได้ระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของโลหะที่มีความแม่นยำสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การแทรกสอดของคลื่น (Interference of Wave)

การรวมกันของคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆในตัวกลางเราเรียกว่าการแทรกสอดของคลื่นและเรียกเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการแทรกสอดของคลื่นว่าอินเตอร์เฟอริมิเตอร์(Interferometer)

พิจารณาคลื่นรูปไซน์สองคลื่นเคลื่อนที่ในทิศเดียวกันแทนด้วย y_1 , y_2 ถ้าคลื่นทั้งสอง 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

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

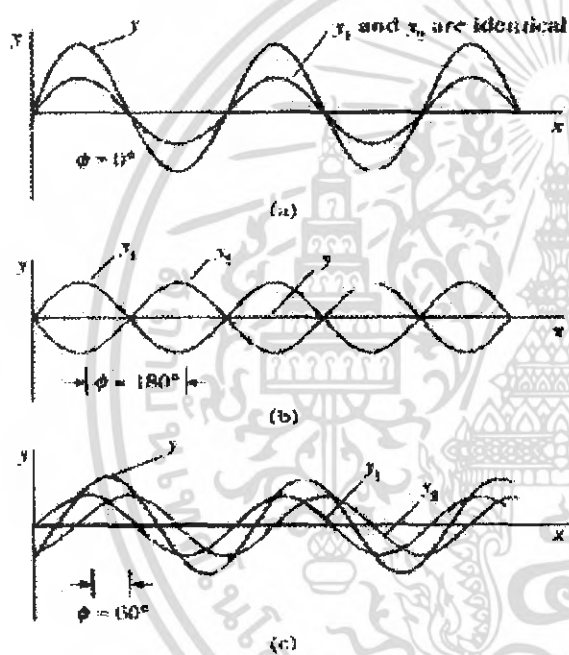
จะได้ฟังก์ชันคลื่นรวม

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

จากสมการนี้จะได้พบว่าคลื่นรวมเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ และความยาวคลื่นเท่าเดิมแอมพลิจูดของคลื่นรวม คือ $2A \cos \frac{\phi}{2}$ และมีเฟส $\frac{\phi}{2}$ ถ้าคลื่น y_1 และ y_2 มีเฟสตรงกัน นั่นคือ $\phi = 0$ และแอมพลิจูดเท่ากับ $2A$ หรือมีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่นกรณีนี้เรียกว่าการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive interference) โดยทั่วไปการแทรกสอดแบบเสริม จะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos \frac{\phi}{2} = \pm 1$ หรือ เมื่อ $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ ในทางตรงข้าม ถ้ามุม $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ จะทำให้ $\cos \frac{\phi}{2} = \cos \frac{\pi}{2} = 0$ เป็นผลให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมเป็นศูนย์ กรณีนี้เรียกว่าการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive interference) เกิดขึ้นเมื่อยอดคลื่นของคลื่นหนึ่งตรงกับท้องคลื่นของอีกคลื่นหนึ่งตามรูป 2.1 การกระจัดของคลื่นจะหักล้างกันทั้งหมด

ถ้าค่าคงที่ของเฟสมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง π ตามรูปที่ 2.1 คลื่นรวมจะมีแอมพลิจูดอยู่ระหว่าง 0 ถึง $2A$ กรณีที่คลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูดต่างกันการแทรกสอดสามารถพิจารณาในลักษณะที่คล้ายกัน ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกันแอมพลิจูดของคลื่นรวมจะเท่ากับผลบวกของแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละลูก แต่ถ้าคลื่นมีเฟสต่างกัน 180 องศาแอมพลิจูดของคลื่นรวมจะเท่ากับผลต่างของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่น ถ้า y_1 และ y_2 เป็นคลื่นที่มีเฟส ϕ_1 และ ϕ_2 และมีความเข้มแสง I_1 และ I_2 ตามลำดับจะได้ว่าความเข้มของแสงที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นมีค่าดังนี้

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 การซ้อนทับของคลื่น y_1 และ y_2

(a) คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน เกิดการ

แทรกสอดแบบเสริม

(b) คลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน π rad เกิดการ

แทรกสอดแบบหักล้าง

(c) คลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกันในช่วง 0 ถึง π rad

คลื่นรวมจะมีแอมพลิจูดน้อยกว่า (a) และมากกว่า (b)

ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = (2n + 1)\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$) ดังนั้น $\cos(\phi_1 - \phi_2) = -1$ จะได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.6)$$

ซึ่งเป็นความสว่างต่ำสุดเกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° เรียกว่า anti phase และ เรียกว่าเกิด destructive Interference ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = 2n\pi$ ($n=0, 1, 2, \dots$) ดังนั้น $\cos(\phi_1 - \phi_2) = 1$ จะได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2.7)$$

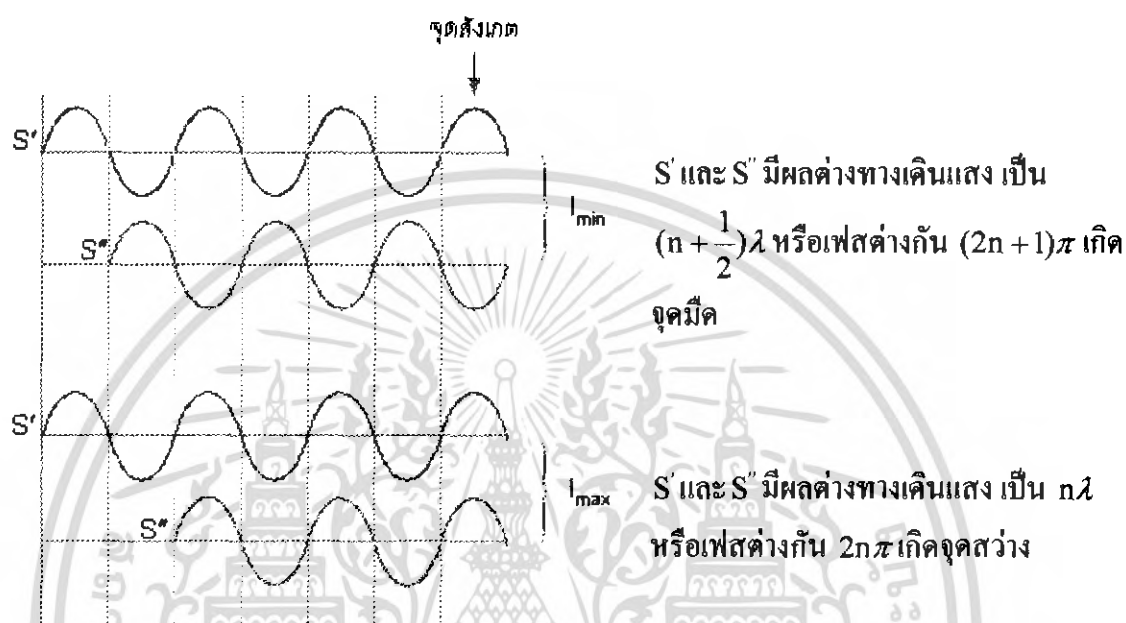
ซึ่งเป็นความสว่างสูงสุดเกิดเมื่อคลื่น ทั้งสองมีเฟสตรงกันเรียกว่า Inphase กันและ เรียกว่าเกิด constructive interference ในกรณีที่คลื่นทั้งสองมีความเข้มเท่ากัน $I_1 = I_2 = I_0$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) = 2I_0 [1 + \cos(\phi_1 - \phi_2)] \quad (2.8)$$

หรือ $I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)$ เมื่อ $\cos^2(\phi_1 - \phi_2)$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ดังนั้นการแทรกสอดของ

แสงจะทำให้แสงมีความเข้มเป็น 0 ที่จุดมืด (destructive Interference) และแสงมีความเข้มเป็น $4I_0$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดสว่าง (constructive Interference) ในกรณีที่แสงสองลำมีเฟสตรงกัน ($\phi_1 - \phi_2 = 0$) เช่นมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน เช่น ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ เฟสของแสงจะต่างกันได้ถ้าแสงทั้งสองลำเดินทางถึงจุดสังเกตด้วยระยะทางเท่ากัน (โดยการปรับระยะห่างระหว่างกระจก)



รูปที่ 2.2 การแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมเนื่องจากผลต่างทางเดินแสง

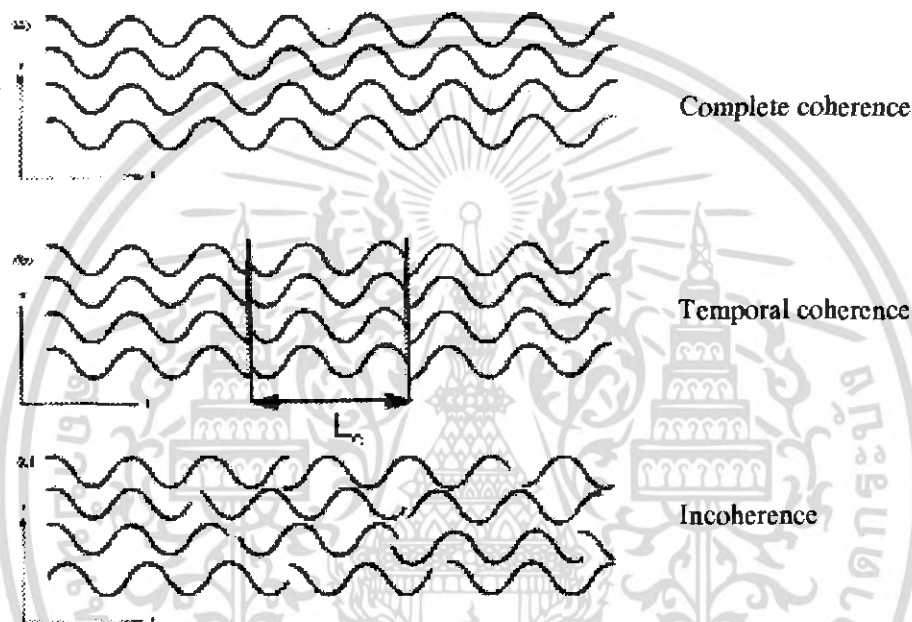
แสงเดินทางจาก S' เดินทางถึงจุดสังเกตมีระยะทางมากกว่าจาก S'' เท่ากับ $(S' - S'')$ ระยะทางนี้เรียกว่าผลต่างทางเดินของแสง (Path difference) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต่างเฟส (Phase difference), $\Delta\phi$ โดย

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

2.2 แหล่งกำเนิดแสง

2.2.1) โคฮีเรนซ์

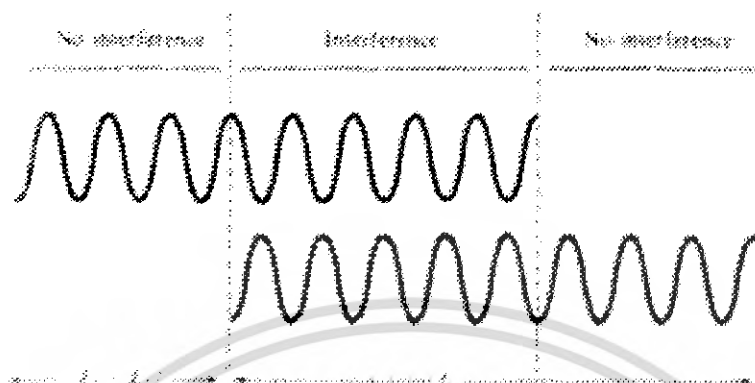
Coherence คือ สมบัติของคลื่นสองคลื่นที่มีเฟสต่างกันคงที่เช่นแสงเลเซอร์เนื่องจากอะตอมของตัวกลางเลเซอร์ถูกกระตุ้นให้เปล่งแสงออกมาพร้อมกันในทิศทางเดียวกัน ส่วนแสงที่เกิดจากแสงอื่นๆ เช่น หลอดไฟ อะตอมจะมีการเปล่งแสงในทิศทางที่ต่างกันอย่าง Random จึงไม่มีสมบัติ Coherence เรียกว่า incoherence ตามรูป



รูปที่ 2.3 แสง โคฮีเรนซ์และอิน โคฮีเรนซ์

ในกรณีของการแทรกสอดที่ $(\phi_1 - \phi_2) = \text{constant in time}$ หมายถึงคลื่นทั้งสองต้องมีความถี่เดียวและเท่ากัน แหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวต้องมีขนาดเป็นอนันต์นั่นคือแหล่งกำเนิดคลื่นมีเฟสต่างกันคงที่ตลอดเวลา(Complete Coherence) ไม่มีจริงในธรรมชาติ มีแต่แหล่งกำเนิดแสงที่มีเฟสต่างกันคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง(Partial Coherence)เรียกช่วงเวลานี้ว่า Coherence time ซึ่งปกติมีค่าประมาณ $10^{-9} - 10^{-10}$ วินาที และระยะทางที่แสงเดินทางได้ในช่วงเวลานี้ เรียกว่า Coherence Length(L_c) ในกรณีการแทรกสอด (interference pattern) ถ้าผลต่างทางเดินแสงมีค่ามากกว่า L_c รั้วแทรกสอด (interference pattern) ที่จุดสังเกตใดๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดมืดเป็นจุดสว่างทุกๆ 10^{-9} วินาที (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสง) นั่นคือไม่สามารถสังเกตรั้วแทรกสอดได้ (ไม่เกิดการแทรกสอด) ดังรูปที่ 2.4

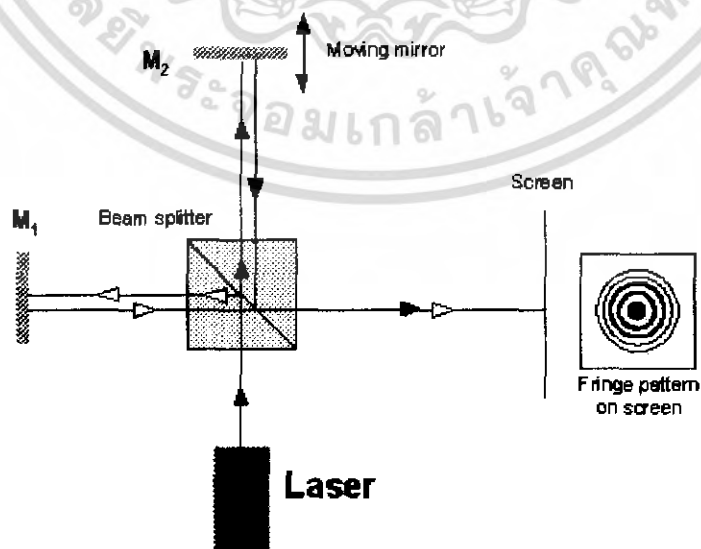
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของโคฮีเรนซ์ โดย $(L_1 - L_2)$ ต้องน้อยกว่า λ_c จึงจะเกิดการแทรกสอด

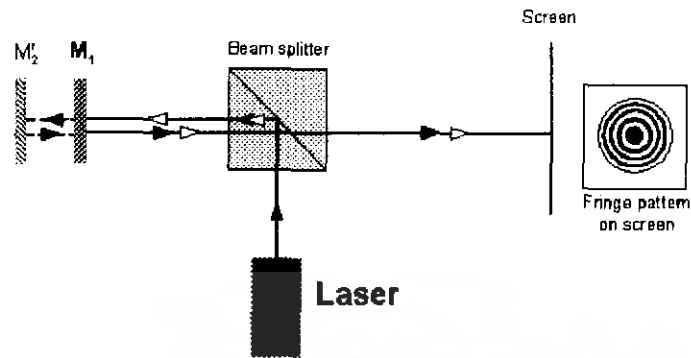
2.3 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ (Michelson Interferometer)

ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 5 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Laser) ผ่านไปยังตัวแยกลำแสง (beam splitter) ชนิด 50 : 50 ลำแสงจะแยกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน และมีความเข้มแสงเท่ากัน โดยลำแสงที่ 1 (ลูกศรสีขาว) จะสะท้อนไปยังกระจก M_1 และสะท้อนกลับมายังตัวแยกลำแสงจากนั้นจะทะลุไปยังฉากรับแสง ส่วนลำแสงที่ 2 (ลูกศรสีขาว) จะทะลุผ่านไปยังกระจก M_2 และสะท้อนกลับมายังตัวแยกลำแสงจากนั้นจะสะท้อนไปยังฉากรับแสงเช่นกัน แต่เนื่องจากลำแสงทั้งสองเดินทางเป็นระยะทางไม่เท่ากัน (เนื่องจากกระจกทั้งสองอยู่ห่างจากตัวแยกลำแสงไม่เท่ากัน) ลำแสงทั้งสองจึงแทรกสอดกัน โดยมีเฟสต่างกัน ทำให้เห็นแถบมืดและแถบสว่างเป็นวงขนานฉากตามเงื่อนไขการเกิดแทรกสอดแบบหักล้างและเสริมสร้าง ตามลำดับ

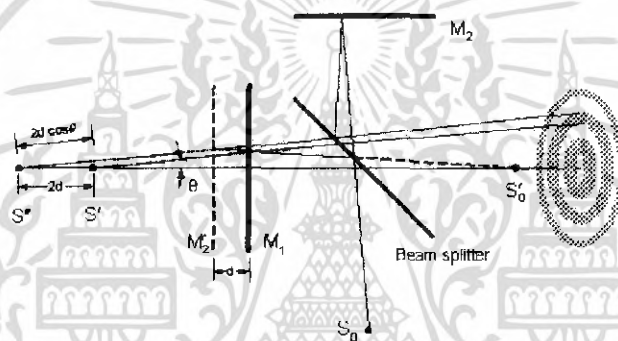


รูปที่ 2.5 ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งภาพของกระจก M_2 แสดงให้เห็นระยะห่างระหว่างกระจก



รูปที่ 2.7 การเกิดริ้วรอยแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดเสมือน

2.3.1 การเกิดริ้วแทรกสอด

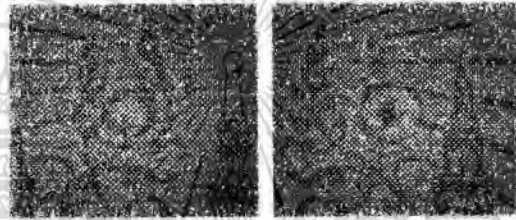
ในกรณีของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ความต่างเฟสของแสงที่แทรกสอดกันถูกกำหนดโดยผลต่างทางเดินแสงซึ่งควบคุมโดยการเลื่อนระยะของกระจก M_2 ในมุมมองของผู้สังเกตจากทางด้านฉากรับแสงจะเห็นภาพของกระจก M_2 อยู่ที่ตำแหน่ง M_2' ดังรูปที่ 2.6 ถ้าจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์บานออกเล็กน้อย (โดยเลนส์ เช่น เลนส์วัตถุของกล้องจุลทรรศน์) แสงจะตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเป็นรูปกรวย เพื่อให้เห็นภาพการเกิดริ้วรอยการแทรกสอดชัดเจนขึ้นจะพิจารณาแนวแสงที่ตกกระทบบัวแยกแสงและกระจกเอียงทำมุมเล็กน้อยดัง รูปที่ 2.7 แสงที่สะท้อนจากกระจกจะพิจารณาเสมือนกับว่ามีแหล่งกำเนิดแสงอยู่หลังกระจกเป็นระยะเท่ากับระยะจากแหล่งกำเนิดจริงถึงกระจกดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจริง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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



รูปที่ 2.8 ริ้วรอยการแทรกสอดจากไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

2.3.2 หลักการวัดระยะทางด้วยไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

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

2.3.3 การคำนวณระยะทาง

ระยะทางที่กระจกเลื่อนไปคำนวณได้โดย

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

เมื่อ d = ระยะทางที่กระจกเลื่อนไป

n = จำนวนริ้วแทรกสอดที่นับได้โดยเครื่องนับ

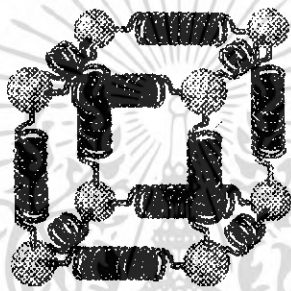
λ = ความยาวคลื่นแสง (632.8 nm สำหรับเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน)

ระยะทางที่น้อยที่สุดที่ไมเคลสันสามารถวัดได้ ($n = 1$) จะได้ ระยะทางเท่ากับ 316.4 nm เอกสารนี้เขียนขึ้นเพื่อส่งเสริมการขายของบริษัทไมเคลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การขยายตัวของวัสดุตามอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสสารทำให้เกิดผลทางกายภาพสองอย่าง คือ การเปลี่ยนขนาดและสถานะของสสารซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดโดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนสถานะ

พิจารณาอะตอมภายในผลึกของของแข็งถูกยึดเข้าด้วยกันเป็นแถวๆอย่างเป็นระเบียบด้วยแรงไฟฟ้าโดยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมจะเสมือนกับว่ามีสปริงยึดระหว่างอะตอมไว้ซึ่งสปริงเหล่านี้แข็งแรงมากและมีอยู่ประมาณ 10^{22} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิใดๆ อะตอมของของแข็งจะมีการสั่น โดยมีแอมพลิจูดของการสั่นประมาณ 10^{-9} เซนติเมตร และความถี่การสั่นประมาณ 10^{13} เฮิรตซ์



รูปที่ 2.9 อะตอมของของแข็งยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดหยุ่นที่เสมือนว่าอะตอมมีสปริงยึดติดกันอยู่

การขยายตัวของของแข็งเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นมีอยู่ 3 แบบคือการขยายตัวตามเส้น การขยายตัวตามพื้นที่และการขยายตัวตามปริมาตร

2.4.1 การขยายตัวเชิงความยาว

วัตถุที่มีความยาว L_0 ที่อุณหภูมิ T_0 ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น T จะมีความยาว L หรือมีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น $\Delta L = L - L_0$ จากการทดลองพบว่าความยาวที่เพิ่มขึ้นแปรตามความยาวเดิมและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta T = T - T_0$ ทำให้เขียนได้ว่า

$$\Delta L \propto L_0 \Delta T$$

$$\text{หรือ} \quad \Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (2.13)$$

เมื่อ α เป็นค่าคงที่เฉพาะของสารแต่ละชนิด เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น มีค่าเป็น

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจึงอาจจะกล่าวได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม และค่าของของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น องศา⁻¹ จากสมการที่ 1 ถ้าแทนค่า $\Delta L = L - L_0$ ลงในสมการ 2.13 จะทำให้เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การขยายตัวเชิงพื้นที่

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 การขยายตัวเชิงปริมาตร

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 และมีความสัมพันธ์กับ α และ β เป็น

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

2.5 การควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Automatic Temperature Control)

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

1. ภาควัด เช่น เทอร์โมคัปเปิ้ล, หัววัดความชื้นมีหน้าที่วัดค่าที่กระบวนการแล้วส่งมายังภาคควบคุม
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 หรือค่าที่วัดมาจากกระบวนการ เช่น อุณหภูมิในถังน้ำที่อุณหภูมิปกติ เป็น 30°C

MV คือ Manipulated Variable หรือสัญญาณควบคุมที่เครื่องควบคุมคำนวณได้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (0-100%)

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

จากรูปที่ 2.10 จะพบว่าเครื่องควบคุมจะได้รับอินพุต 2 ค่า คือ PV (ค่าที่วัดจากกระบวนการ) และ SP (ค่าที่ต้องการควบคุม) และมีเอาต์พุต 1 ค่า คือ MV ส่งไปที่กระบวนการ เพราะฉะนั้น สิ่งที่ทำให้เครื่องควบคุมแต่ละตัวแตกต่างกัน คือ ส่วนคำนวณของเครื่องควบคุมที่อยู่ภายใน ซึ่งขึ้นถึงรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน รูปแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การควบคุมแบบ ON-OFF, PID และ Fuzzy Control

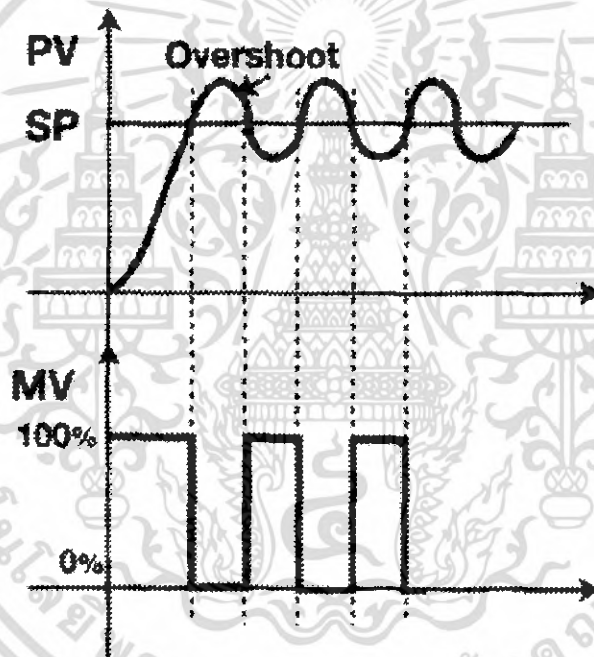
2.5.1 การควบคุมแบบ ON-OFF หรือ Two-position Control

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

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

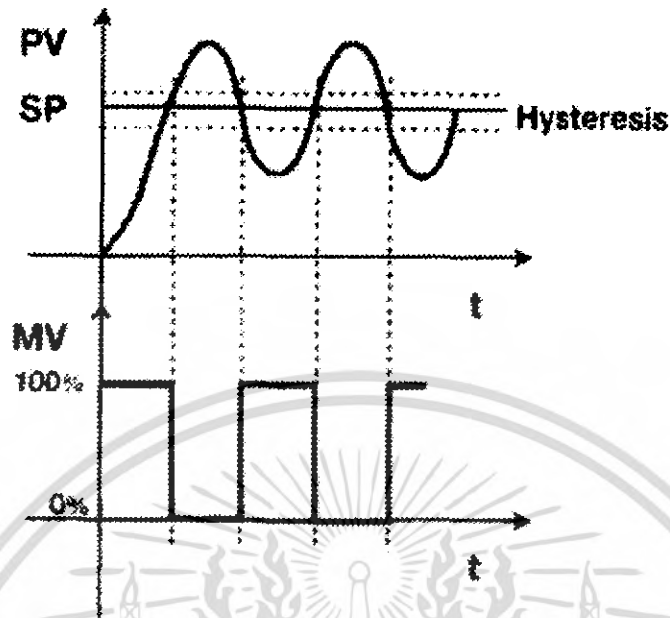
$$MV = 100 \% \text{ (ON) เมื่อ } E > 0 \text{ (PV} < \text{SP)}$$

$$= 0 \% \text{ (OFF) เมื่อ } E < 0 \text{ (PV} > \text{SP)}$$



รูปที่ 2.10 การควบคุมแบบ ON-OFF

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



รูปที่ 2.11 การควบคุมแบบ ON-OFF โดยมี Hysteresis

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

2.5.2 การควบคุมแบบ Proportional (P Control)

ในกระบวนการควบคุมแบบ ON-OFF จะไม่ใช่วิธีที่ดีพอ 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

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

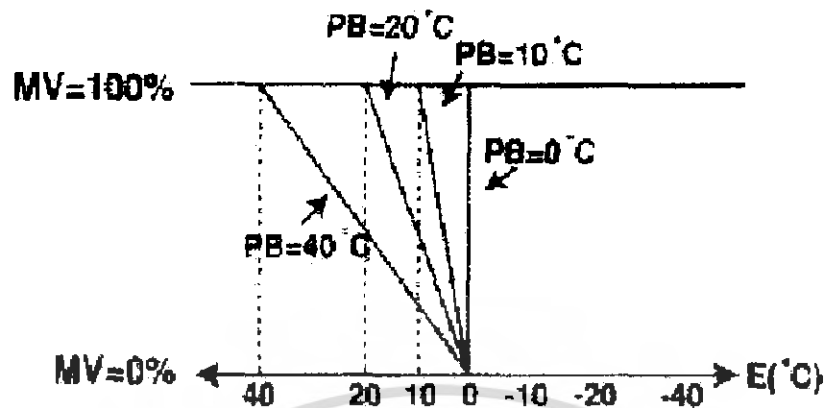
PB : Proportional Band

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

ตัวควบคุมแบบ Proportional มีลักษณะเป็นแอมพลิฟายเออร์ที่มีค่า gain คือ $K_p = \frac{100}{PB}$ โคล

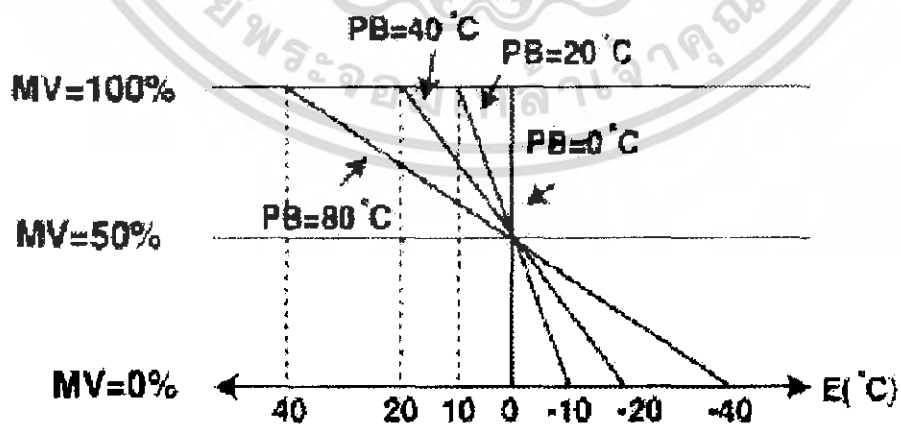
ลักษณะของ Proportional Band (PB) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Proportional Band

เช่น $SP = 100^{\circ}C$, $PB = 10^{\circ}C$ 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 $0^{\circ}C$ อธิบายเป็นอนันต์หรือเสมือนว่าการทำงานของ เครื่องควบคุมจะ กลายเป็นแบบ ON-OFF ส่วนค่า bias เป็นค่าที่ต้องการให้เครื่องควบคุมจ่ายออกไปเมื่อ $E = 0$ ถ้า กำหนดให้ bias เป็น 0 ในขณะ $E = 0$ 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% ได้ ตามรูปที่ 2.13

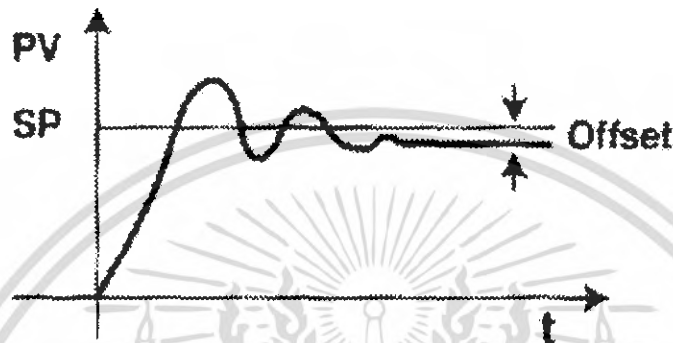


รูปที่ 2.13 Proportional Band ที่ bias = 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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) เข้ามาในกระบวนการ การลด PB ให้แคบลงมาสามารถลด Offset ได้ แต่จะทำให้ อุณหภูมิมีการแกว่งมากขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไข Offset ได้โดยการตั้งค่า Manual Reset ซึ่งเสมือนเป็นการเลื่อน (Shift) กราฟขึ้น (หรือลง) ให้ PV ไปนิ่งที่ SP พอดี

2.5.4 การควบคุมแบบ Proportional Integral (PI Control)

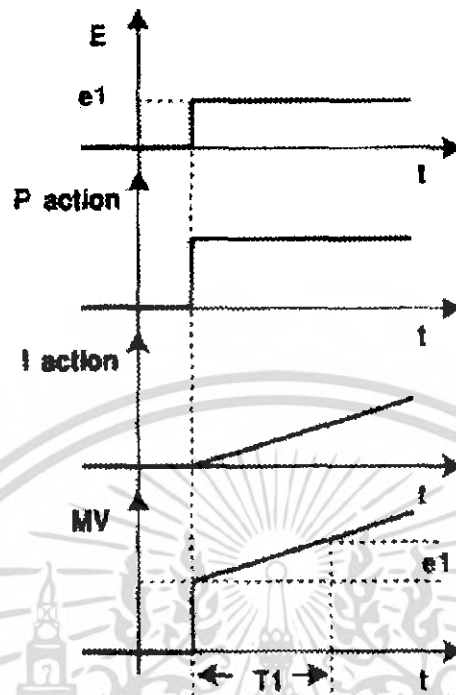
ลักษณะของ Integral จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับค่า Error (E) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.21

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

T_I : Integral Time

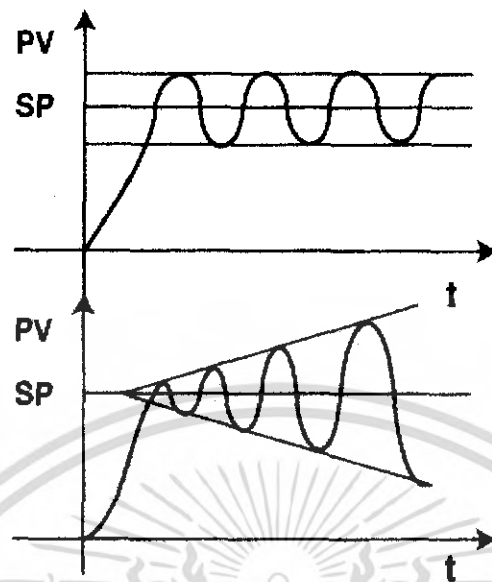
บางครั้งการควบคุมแบบ Integral เรียกว่า Reset Control ซึ่งไม่สามารถใช้งานเดี่ยว ๆ ได้จะใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ กิริยาการควบคุมแบบ PI สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.22

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



รูปที่ 2.15 สัญญาณควบคุมของ PI control

จากรูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของ *Integral action* คือ สะสมค่า E เมื่อเวลาผ่านไป นั่นคือขณะที่ E มีค่าคงที่สัญญาณควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในกรณี E เป็นบวกและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในกรณี E เป็นลบ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ *Integral action* สามารถแก้ Offset ได้ และทำให้ PV ไปนิ่งที่ SP ได้ท้ายที่สุด และเมื่อลดค่า T_i ลงผลของ *Reset action* จะมีค่ามากขึ้นทำให้เกิดการแกว่งและ *Overshoot* สูงขึ้น ถ้าลดค่า T_i ต่ำเกินไปจะทำให้ระบบ *Oscillate* และ เกิด *Unstable* สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิด Oscillate และ Unstable เมื่อตั้งค่า T_I ต่ำเกินไป

2.5.5 การควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD Control)

ลักษณะของ Derivative จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับ ค่า Error (E)

ดังนี้

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

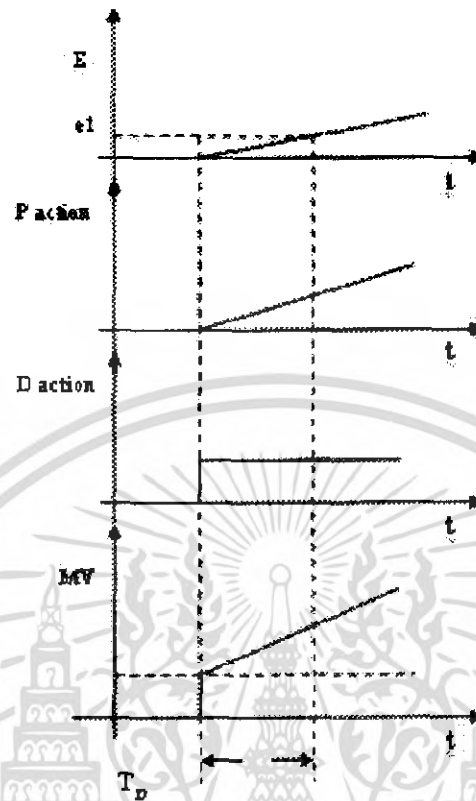
T_D = Dervative Time

ในบางครั้งจะเรียกกรียาควบคุมแบบ Derivative ว่า Rate control เพราะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุม จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error (E) จะใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ โดยการควบคุมแบบ PD สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

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

สัญญาณควบคุมจะแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของค่า Error การควบคุมชนิดนี้มีลักษณะเหมือนการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าที่กระบวนการล่วงหน้า ทำให้อุณหภูมิเข้าสู่เสถียรภาพเร็วขึ้น Derivative action เหมาะสำหรับกระบวนการที่ช้า 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) ระบบควบคุมความดัน (Pressure) โดยลักษณะของการควบคุมแบบ PD control จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.17 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สัญญาณควบคุมของ PD Control

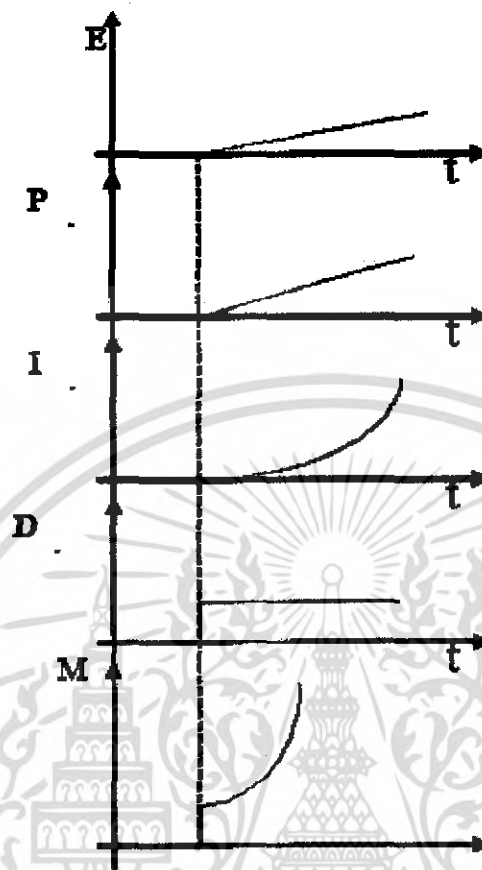
2.5.6 การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

เป็นการรวมทริยาควบคุมแบบ Proportional, Integral และ Derivative เข้าด้วยกันสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

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

ลักษณะการทำงานของ PID Control แสดงดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 คือ เสถียรภาพหรือการรักษาค่า PV ไว้ที่ Setpoint ให้ได้ แต่ในความเป็นจริงการควบคุมที่ดีจะต้องพิจารณาถึงลักษณะของผลตอบสนอง เป็นสาเหตุที่ต้องมีการศึกษาลักษณะของกระบวนการ และปรับค่า PID ให้เหมาะสมกับกระบวนการนั้นๆ เพื่อให้มีผลตอบสนองที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถสรุปลักษณะของการควบคุมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบมีเสถียรภาพ (Stable) สามารถรักษาค่า PV ไว้ที่ Setpoint ได้
2. ระบบมีการตอบสนองเร็ว
3. ระบบ ไม่แกว่ง มีค่า Overshoot น้อย
4. ไม่เกิด Offset ที่สภาวะสุดท้าย
5. ระบบสามารถรองรับการเกิด Disturbance หรือ การเปลี่ยนค่า Set point ได้

การปรับค่า PID ในกระบวนการหนึ่งแล้วมีผลตอบสนองที่ดี เมื่อนำค่า PID นี้ไปใช้กับอีกกระบวนการหนึ่ง อาจได้ผลตอบสนองที่ไม่ดี 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

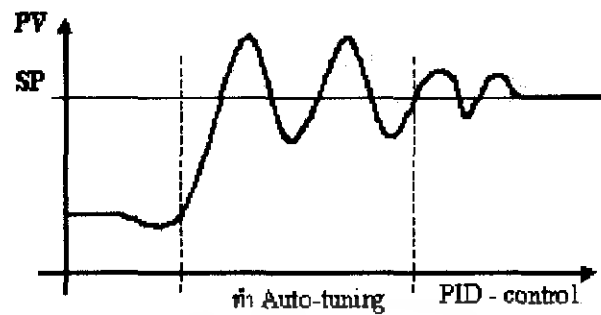
Fuzzy เป็นทฤษฎีหนึ่งทางคณิตศาสตร์ คือ Fuzzy Sets ซึ่งเป็นลักษณะของตัวเลขที่สามารถบ่งชี้ได้ถึงคุณภาพ (Quality) ไม่ใช่เพียงปริมาณ (Quantity) เพียงอย่างเดียวเหมือนตัวเลขทั่วไปที่เป็น Crisp sets ลักษณะของ Fuzzy จะมีความใกล้เคียงภาษามนุษย์ ซึ่ง Fuzzy แปลว่า คลุมเครือ, ไม่แน่ชัด คือ เป็นคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้ระบุเพียงแค่ว่าใช่หรือไม่ใช่แต่สามารถระบุความใกล้เคียงที่จะใช่หรือไม่ใช่ได้ คือ ช่วงตรงกลางระหว่างใช่กับไม่ใช่ ซึ่งเป็นลักษณะของภาษามนุษย์ (Language) ที่มักใช้คำว่า ค่อนข้าง, ค่อนข้างน้อย, เกือบ เป็นต้น

2.5.9 การควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติแบบ Fuzzy และ PID

Fuzzy control มีข้อดีมากกว่าการควบคุมแบบ PID อย่างมาก และสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยกรณีต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบที่แตกต่างกันไป Fuzzy Control จะปรับแต่ง PID ทางอ้อมเพื่อให้สัญญาณควบคุม MV สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างยืดหยุ่นและรวดเร็วตาม Process ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยวิธีนี้จะทำให้กระบวนการเข้าสู่ Setpoint ด้วยเวลาที่สั้นที่สุด และมี Overshoot ต่ำสุด ภายใต้การรบกวนของ Disturbance ภายนอก มีเสถียรภาพเหนือกว่าการควบคุม PID แบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด PID เป็น Digital Information ต่างจาก Fuzzy ที่เป็น Language Information

2.5.10 AUTO-TUNING

เป็นฟังก์ชันที่มีอยู่ในเครื่องควบคุมชนิดดิจิทัล ใช้สำหรับคำนวณหาค่า PID ที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการควบคุมโดยอัตโนมัติ การทำงาน Auto-Tuning เครื่องควบคุมจะทำงานเป็น ON-OFF ระยะเวลาหนึ่งทำให้ระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของระบบว่าช้าหรือเร็ว, มี Overshoot สูงเท่าใด เครื่องควบคุมจะควบคุมในลักษณะ ON-OFF อยู่ประมาณ 3-5 Cycle แล้วจึงทำการคำนวณหาค่า PID ออกมาและเริ่มควบคุมระบบด้วย PID Control โดยลักษณะของการ Auto tuning จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19

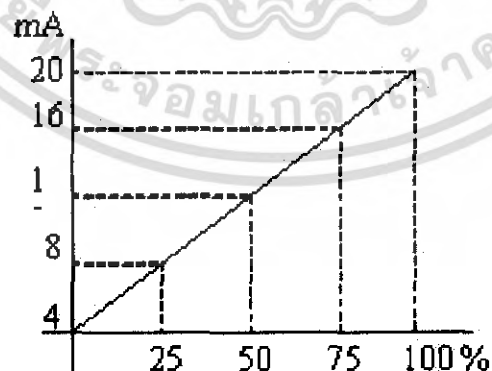


รูปที่ 2.19 การทำ Auto-Tuning

โดยทั่วไปตัวเครื่องควบคุมจะมีไฟแสดงผลขณะที่ทำ Auto-Tuning อยู่ และเมื่อทำ Auto-Tuning เสร็จไฟแสดงผลจะดับแสดงว่าเข้าสู่การทำงานแบบ PID Control แล้ว ฟังก์ชัน Auto-Tuning จะทำการคำนวณหาค่า PID ออกมาให้อัตโนมัติ ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณด้วยตนเอง แต่อย่างไรก็ตาม ในบางระบบที่ควบคุมได้ยาก ค่า PID ที่คำนวณได้จากการทำ Auto-Tuning จะไม่สามารถควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพหรือมีผลตอบสนองที่ดีพอได้ โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการปรับแต่งค่า PID เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

2.5.11 เอาต์พุตของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

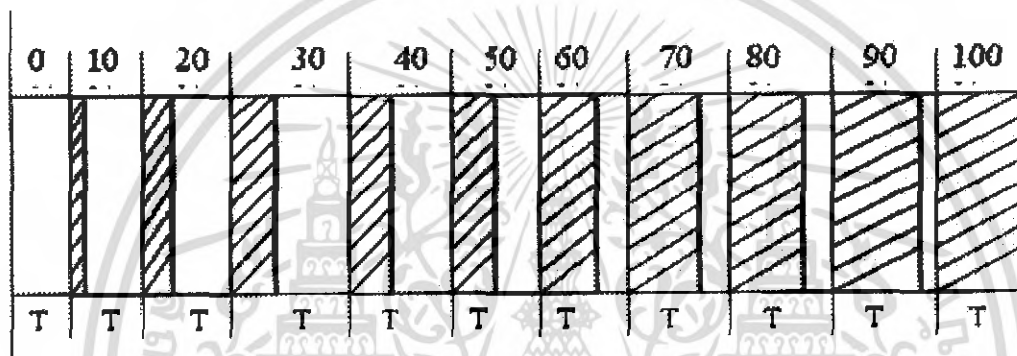
สัญญาณควบคุม (MV) จากเครื่องควบคุม เป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณตามขนาดของค่า Error ในระบบสัญญาณควบคุมนี้จะถูกส่งไปที่ตัวจ่าย (Final element) เพื่อทำการแก้ไข Error ที่ได้รับเข้ามา โดยสัญญาณมีลักษณะเป็นอนาล็อก คือ 0-100% สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณมาตรฐาน พิจารณาความสัมพันธ์ได้จากรูปที่ 2.20 เช่น 4-20 mA สามารถเทียบเอาต์พุตในลักษณะของเปอร์เซ็นต์กับสัญญาณมาตรฐานดังนี้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์ หรือพัลส์ขับโซลิดสเตตรีเลย์ ซึ่งเป็นลักษณะของสวิทช์ ON-OFF ที่มีเพียง 2 สภาวะ คือ ON(100%) กับ OFF(0%) ไม่สามารถส่งสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะของอนาลอกได้โดยตรง แต่จะใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ON (Duty Cycle) บนคาบคงที่แทน โดยในเครื่องควบคุมแบบ PID ที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์ หรือพัลส์ขับโซลิดสเตตรีเลย์ จะต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งคือค่า Proportioning time หรือ Cycle time ซึ่งเป็นค่าคาบคงที่ที่จะมีช่วงเวลา ON(Duty Cycle) ตามค่าสัญญาณควบคุม นั่นแสดงว่าเมื่อสัญญาณควบคุมเป็น 100% เอาต์พุตจะ ON ตลอดคาบ และเมื่อสัญญาณควบคุมเป็น 0% เอาต์พุตจะ OFF ตลอดคาบ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมที่อยู่ระหว่าง 0-100 % ก็จะมี Duty Cycle ที่แตกต่างกันไป ดังรูปที่ 2.21

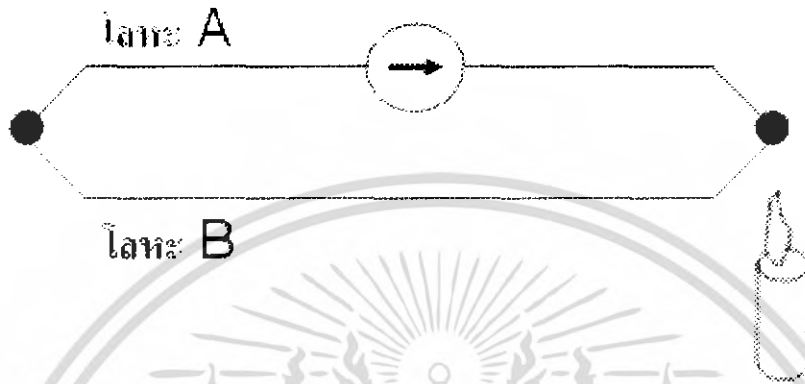


รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบ เอาต์พุตรีเลย์ กับ 0-100%

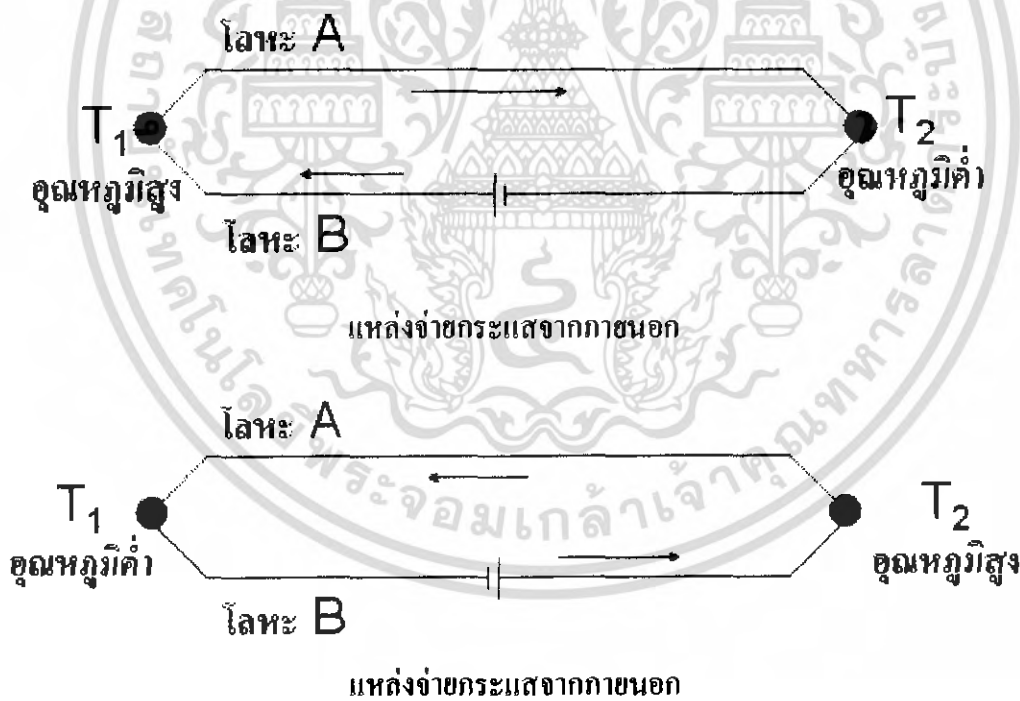
2.5.12 เทอร์โมอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (Thermoelectric Transducer)

เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นและความร้อนโดยใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวกลางในการทำงาน ซึ่งได้แนวความคิดจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ Thomas Seebeck ในปี ค.ศ.1821 โดยพบว่าเมื่อนำขดลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกัน (โลหะ A และ B) มาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองดังรูปที่ 2.22 โดยปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อ หรือเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดโลหะทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิจะมากขึ้น และในทางกลับกันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าลดลงผลต่างของอุณหภูมิจะน้อยลงด้วย ต่อมาในปี ค.ศ.1834 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Jean C.A.Peltier ได้ทำการศึกษาในวงจรลักษณะเดียวกับของ Thomas Seebeck แต่ใช้ลวดที่ทำจากวัตถุกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ บิสมัท และแอนติโมนี ซึ่งพบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้อุณหภูมิของปลายจุดต่อมีค่าแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อน และ ปลายอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง ซึ่งเกิดจากการรับความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไประบายความร้อนออกที่ปลายอีกด้านหนึ่ง และยังพบว่าเมื่อกลับทิศทางกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกันดังแสดงตามรูปที่ 2.23 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวเรียกว่า Peltier Effect และความร้อนที่ถูกเคลื่อนย้ายจากข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งเราเรียกว่า Peltier Heat Transfer โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้า และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด



รูปที่ 2.22 การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร



รูปที่ 2.23 แสดงการกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

จากการที่ได้กล่าวไว้ถึงหลักการข้างต้นวัสดุกึ่งตัวนำเพียงคู่เดียวจะทำให้เกิดความเย็นได้น้อยมากจึงต้องใช้วัสดุกึ่งตัวนำหลายๆ คู่มาต่อกันเพื่อใช้งานซึ่งเรียกว่า เพลเทียร์โมดูล (Peltier Module) ในการผลิตทำได้โดยการใช้วัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductor) และชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Semiconductor) หลาย ๆ คู่มาต่อกันเป็นแถวข้อย และต่อปลายระหว่างวัสดุกึ่งตัวนำชนิด P และ N ด้วยแผ่นระบายความร้อนจากนั้นทำการยึดแผ่นระบายความร้อนที่ติดกับปลายของ สารกึ่งตัวนำ ทั้งหมดด้วยแผ่นเซรามิก (Ceramic Plates) โดยแผ่นเซรามิกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่รับความร้อน และ อีกด้านหนึ่งจะระบายความร้อนจากผิวหน้าของโมดูลรวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าขนาดของ เพลเทียร์โมดูลที่ถูกผลิตใช้งานมีตั้งแต่ 6 วัตต์ ไปจนถึง 150 วัตต์ หากต้องการปริมาณความเย็นมาก ๆ จะต้องใช้เพลเทียร์โมดูลหลาย ๆ แผ่นมาต่อร่วมกัน โดยจะต่ออนุกรมระหว่างโมดูล แต่การต่อ แรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะต่อแบบขนาน

2.5.13 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนกับปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

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

ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าในวงจร (Joule Heat) สามารถหาได้จากสมการความร้อนเนื่องจากการนำความร้อน

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

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า

R = ความต้านทานไฟฟ้า

อัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนจากชั้นหนึ่งไปอัตราการถ่ายเทความร้อน มีค่าเท่ากับ

$$\text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (2.27)$$

เมื่อ ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างหัวร้อนและเย็น

R_T = ความต้านทานความร้อน

Peltier Heat Transfer พบว่าการต่อวงจรไฟฟ้าในกรณีวัสดุต่างชนิดกันจะเกิด 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

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

เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว 1 ขั้วที่ต่อกับตัวนำ 2 ชนิดคือ E จะได้ว่า

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

ถ้าให้ค่า α เป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นสามารถเขียนได้ว่า

$$E = \alpha \Delta t$$

หรือเขียนใหม่ได้ว่า

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

การคำนวณผลการทำความเย็น ถ้าสมมติว่าความร้อนเนื่องจากความต้านทานในวงจร (Joulean Heat, I^2R) 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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ คือ

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

หรือมีค่าเท่ากับ COP ของ Carnot Cycle

ในการวิเคราะห์สมการได้ทำการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้เป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของระบบด้วยค่า A Figure of Merit (Z) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

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

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

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

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

วิธีทำ

ผลการทำงานเย็น

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

ปริมาณความร้อนระบาย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้

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

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ

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

เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำเย็นได้โดยอาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวัสดุกึ่งตัวนำ 2 ชนิดที่ปลายต่อเชื่อมกัน ส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทจากปลายจุดต่อด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนา และประยุกต์นำมาใช้สำหรับการทำความเย็นในงานต่าง ๆ เนื่องจากมีข้อดี คือ น้ำหนักเบา และมีขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตาม เทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อเสีย คือ ไม่เหมาะสมกับการทำงานกับน้ำและสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะในระบบมีค่าที่ต่ำ ซึ่งแนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการประยุกต์นำมาใช้งาน คือ การหาแหล่งพลังงานที่ได้เปล่า เช่น ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานเพื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนระบบ Thermocouple เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิโดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ T ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -40°C ถึง 350°C โดยสายบวกของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T ทำจากทองแดงและสายลบทำจาก Constantan ในสภาพการใช้งานปกติสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง -184°C แต่อุณหภูมิทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่นๆคือประมาณเพราะที่อุณหภูมิสูงกว่า 370°C อัตราการเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเพิ่มมากขึ้นเป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษและสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum , Oxidizing , reducing หรือ inert ได้ดี การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไปได้จึงไม่เหมาะกับงานลักษณะนี้จากการทดลองใช้งานใน 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิล และ สังกะสีจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10% จากมวลของเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้มีความยืดหยุ่นสูงจึงทำให้มีขนาดเล็กให้เลือกใช้เพื่อลดหรือขจัด thermal loading effect ที่จะมีต่อสิ่งที่ต้องการวัดอุณหภูมิที่มีขนาดเล็กๆ ด้วยค่าการยอมรับของเทอร์คัปเปิลได้เลือกใช้ Class A โดยแสดงค่าเกณฑ์การยอมรับของแต่ละ Class ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Tolerance class for thermocouples

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

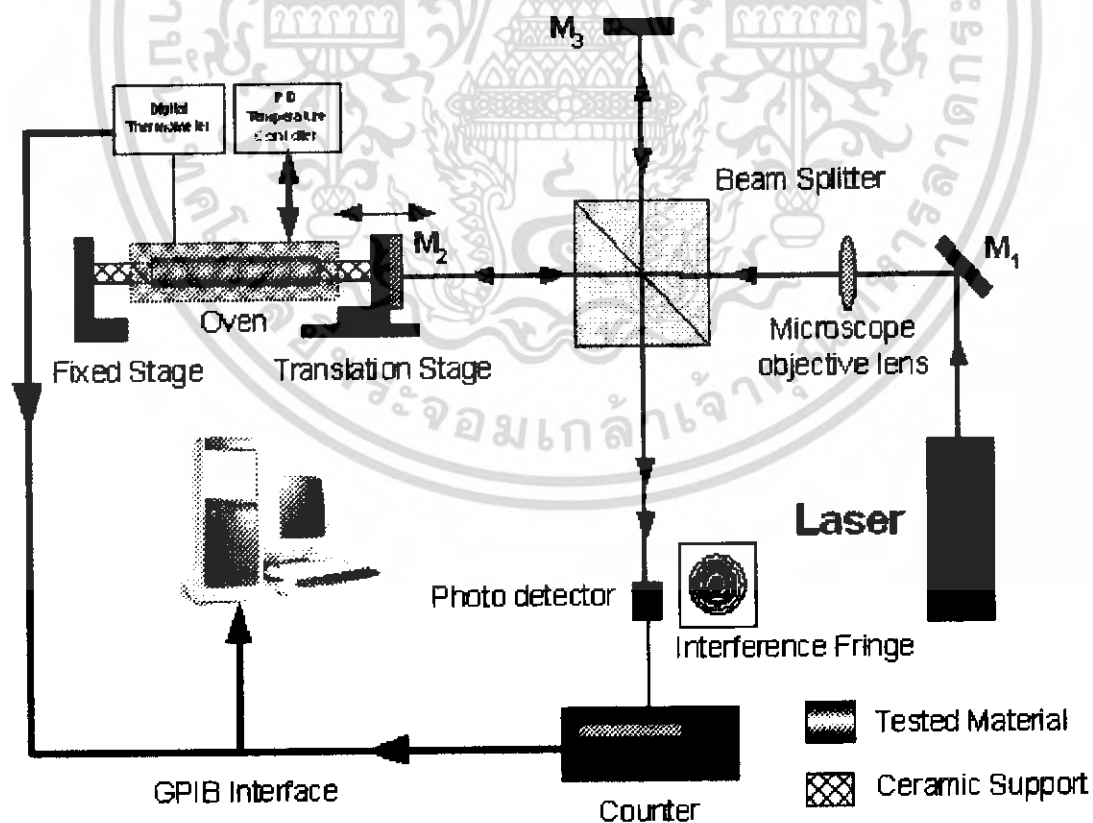
ในการทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุด้วยไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์ รายละเอียดส่วนต่างๆในการดำเนินโครงการมีดังนี้

3.1 การออกแบบระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ

ในการออกแบบระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์จะมีรายละเอียดของการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษาและออกแบบระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ

ในการศึกษาระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวซึ่งระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ แสดงบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

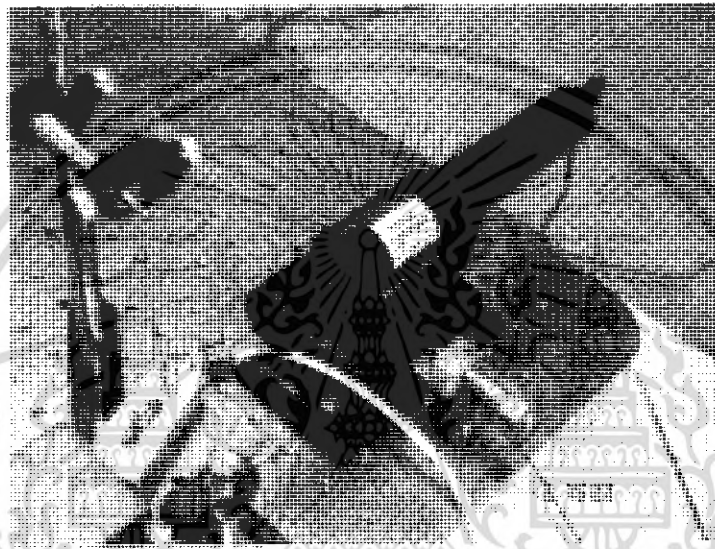
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Laser) จะเดินเข้าสู่กระจกสะท้อน M_1 แล้วสะท้อนเข้าสู่เลนส์หนา (Microscope objective lens) แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางแยกแสง (Beam splitter) ชนิด 50:50 ลำแสงจะแยกออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกันและมีความเข้มแสงเท่ากัน โดยลำแสงส่วนที่ 1 เป็นลำแสงที่เกิดจากการส่งผ่านของตัวกลางแยกแสงจะเคลื่อนที่ไปสะท้อนที่กระจก ซึ่งติดตั้งอยู่บนแท่นที่สามารถเลื่อนได้ ตามความยาวของวัสดุที่ทำการตรวจวัดที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ M_2 และสะท้อนกลับมายังตัวกลางจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปยังหัววัดแสง (Photo detector) ลำแสงส่วนที่ 2 เป็นลำแสงที่เกิดจากการสะท้อนของตัวกลางแยกแสงจะเคลื่อนที่ไปสะท้อนที่กระจก M_3 ซึ่งติดตั้งอยู่บนแท่นยึดตายตัวไม่สามารถเลื่อนตำแหน่งได้ และสะท้อนกลับมายังตัวกลางแยกแสงแล้วเคลื่อนที่ไปที่หัววัดแสง (Photo detector) เช่นกัน โดยตำแหน่งของหัววัดแสงนี้ คือ ตำแหน่งที่เกิดรีฟรอกแทรกสอดตามหลักการของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรีฟรอกแทรกสอดจะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานตัวอย่างได้รับความร้อนค่าอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกวัดด้วยเครื่อง Data Acquisition รุ่น 34970A ของบริษัท Hewlett Packard และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งการขยายตัวของวัสดุเมื่อชิ้นงานที่ทำการทดสอบได้รับความร้อนจะทำให้กระจก M_2 เลื่อนเข้าหาตัวแยกแสง ทำให้ระยะห่างระหว่างกระจก M_2 และ M_3 มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้เกิดรีฟรอกแทรกสอดเปลี่ยนแปลงเป็นริ้วมืดและสว่างสลับกันเข้าสู่หัววัดแสง โดยหัววัดแสงจะทำหน้าที่รับความเข้มของแสงที่ได้จากการแทรกสอดจำนวนรีฟรอกแทรกสอดที่มีการเปลี่ยนแปลงจะถูกนับโดยเครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A ของบริษัท Hewlett Packard แล้วทำการเก็บข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Labview

3.1.2 การจัดแนวแสงสำหรับระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อน ของวัสดุ

ในการจัดตั้งระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว
ของวัสดุ จะต้องทำการเตรียมอุปกรณ์ในการจัดระบบดังต่อไปนี้

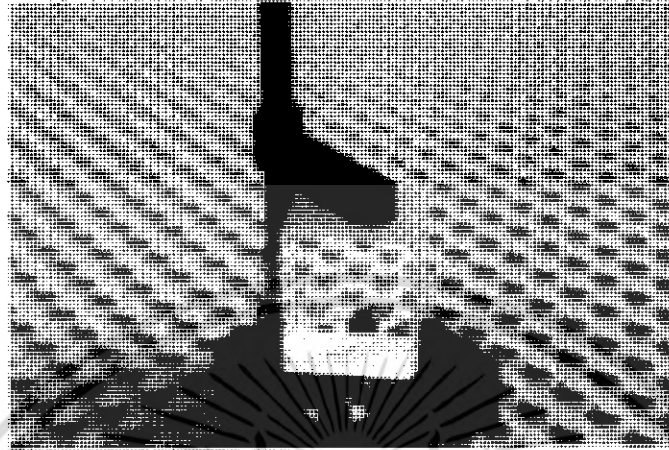
- แหล่งกำเนิดแสง(Light source)



รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดแสง

ในการทดลองได้ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวกำเนิดแสง เนื่องจากแสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีความ
ยาวโคฮีเร้นซ์มากและลำแสงมีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขและหลักการแทรกสอด
ของแสง ในโครงการนี้ใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรและมีกำลัง 1mW
ของบริษัท Melles Griot เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการทดลอง

- ตัวกลางแยกแสง (Beam splitter)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตัวกลางแยกแสง

ตัวกลางแยกแสง เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกลำแสงเป็นลำแสงสะท้อนและลำแสงส่งผ่าน โดยความเข้มแสงของลำแสงทั้งสองจะเท่ากัน หน้าที่ของตัวแยกแสงจะทำหน้าที่แบ่งแสงออกเป็น 2 ส่วน ในทิศทางตั้งฉากกันเพื่อให้แสงทั้งสองเดินทางไปยังกระจกสะท้อนที่มีระยะทางแตกต่างกัน

- กระจกสะท้อน

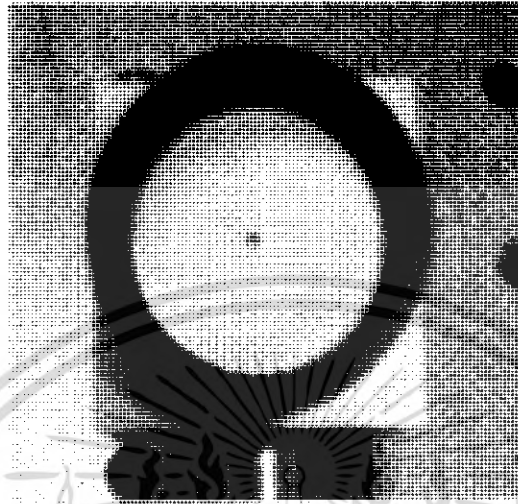


รูปที่ 3.4 อุปกรณ์กระจกสะท้อน

กระจกสะท้อนเป็นอุปกรณ์ในการใช้การสะท้อนลำแสงสองลำที่แยกออกจากกันจากตัวกลางแยกแสงให้กลับมารวมกันที่ตัวกลางแยกแสง โดยกระจกสะท้อนนี้จะมีการเคลือบโลหะไว้ที่ด้านหลังของกระจกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนลำแสงได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

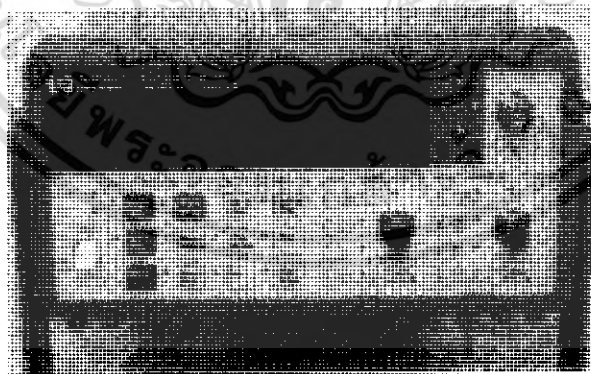
- หัววัดแสง



รูปที่ 3.5 หัววัดแสง

หัววัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงจากการแทรกสอด โดยหัววัดแสงที่ใช้เป็นหัววัดแสงที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีการตอบสนองทางแสงได้ดีในย่านตามองเห็น

- เครื่อง Universal Counter



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Counter

เครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A ของบริษัท Hewlett Packard เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับหัววัดแสง โดยจะมีหน้าที่ในการนับจำนวนรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยเครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A สามารถวัดค่าความถี่และจำนวนรีวรอยการการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลนส์ขยาย

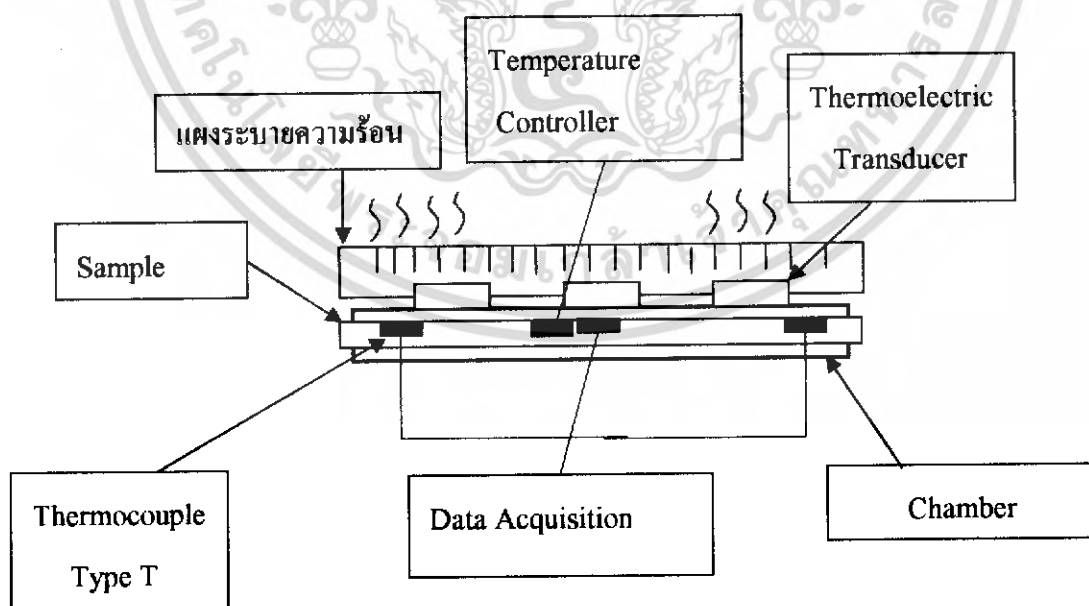


รูปที่ 3.7 เลนส์ขยาย

เลนส์ขยายเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายแสงจากการแทรกสอด เพื่อให้สามารถพิจารณา
ริ้วรอยการแทรกสอดได้ง่ายขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเลนส์ขยายที่มีการขยาย 10 เท่าของภาพจริง

3.1.3 ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิ

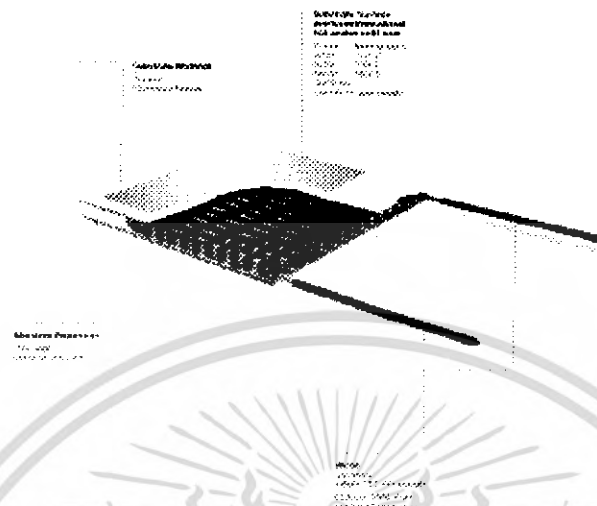
ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิและจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 ระบบการตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

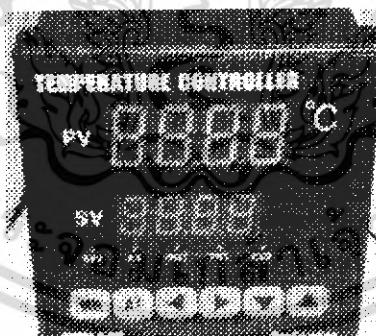
- เทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Thermoelectric Transducer)



รูปที่ 3.9 โครงสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นและความร้อน โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวกลางในการทำความเย็นดังรูปที่ 3.11

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

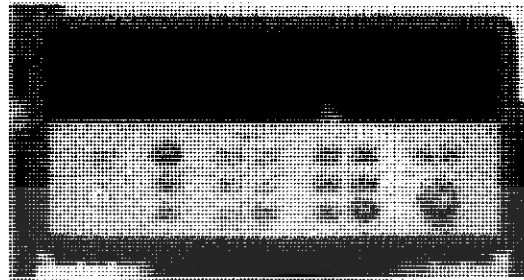


รูปที่ 3.10 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิที่ให้กับชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยลักษณะการทำงานจะเป็นการตัดต่อของรีเลย์ในการจ่ายกระแสและตัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

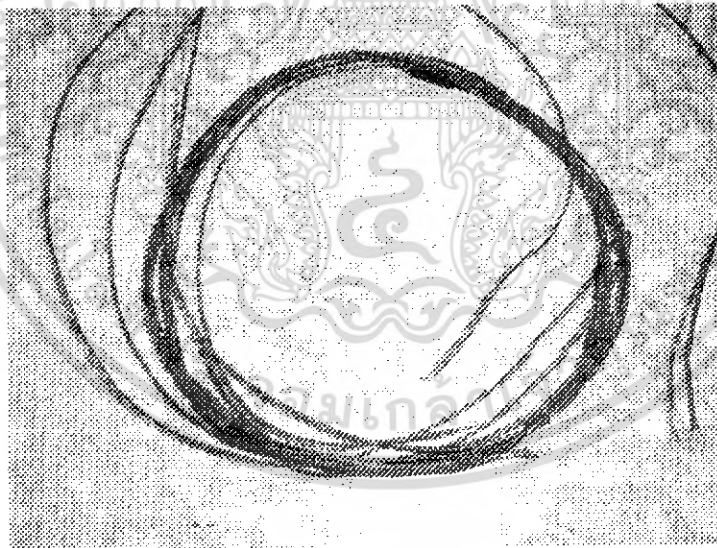
- เครื่อง Data Acquisition



รูปที่ 3.11 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)

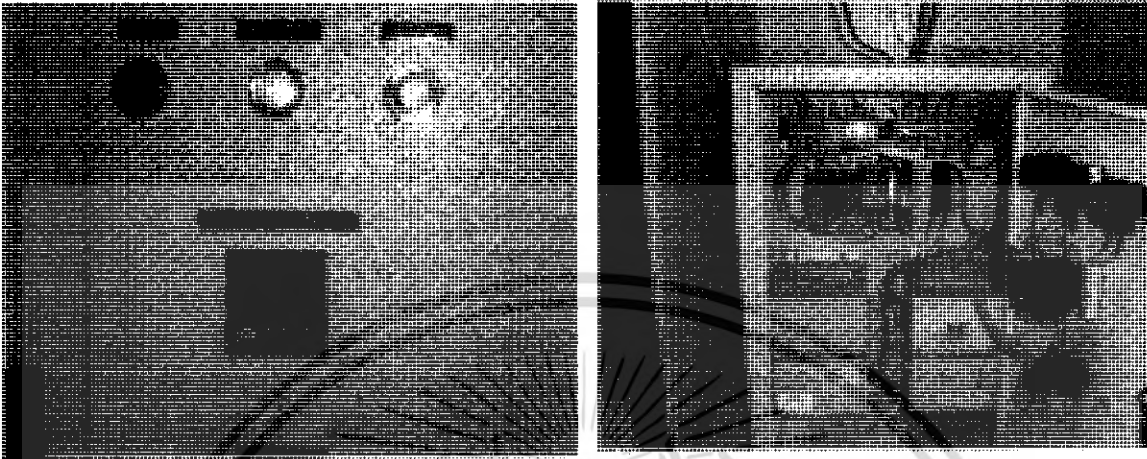


รูปที่ 3.12 เทอร์โมคัปเปิลชนิดแบบ T

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิโดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ T ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิในช่วง -40°C ถึง 350°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

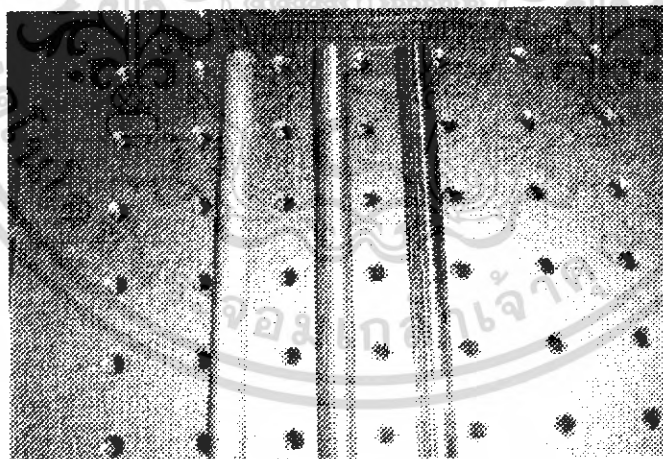
- ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)



รูปที่ 3.13 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เป็นไปตามที่กำหนด โดยอาศัยหลักการ
ทำงานของระบบควบคุมแบบ PID Control

- ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานตัวอย่าง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบเป็นมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม, ทองเหลือง และ
อะลูมิเนียม มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ

เมื่อทำการจัดแนวแสงและจัดระบบการเก็บข้อมูลในระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ สำหรับระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุเรียบร้อยแล้ว ต่อไปเป็นกระบวนการทดสอบระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบก่อนประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ โดยการทดสอบระบบแบ่งเป็นทั้งหมด 2 ส่วนดังนี้

3.2.1 ระบบไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ในการวัดบนโต๊ะป้องกันการสั่นสะเทือนเพื่อลดการสั่นสะเทือนและทำการตรวจสอบความถูกต้องของแนวแสง เมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.15 โดยจากสมการ

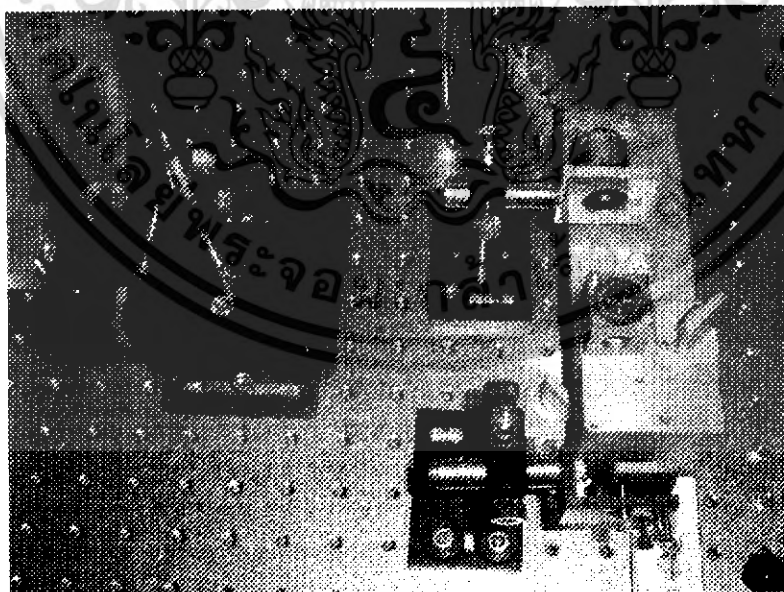
$$d = n \frac{\lambda}{2}$$

เมื่อ $d = 500 \mu\text{m}$ (ไมโครมิเตอร์หมุนครบ 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



รูปที่ 3.15 การจัดและปรับตั้งแนวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

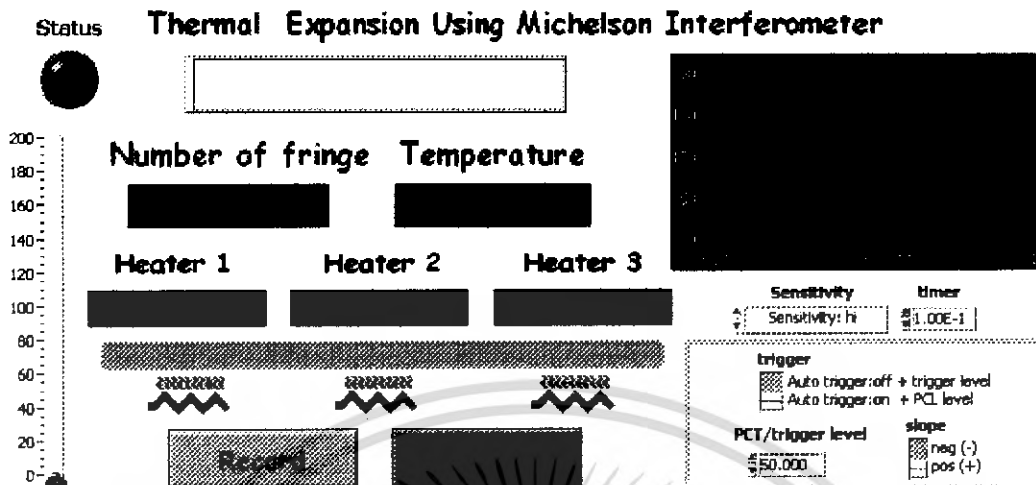
ในการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิ จะทำการทดสอบโดยการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ทำการทดสอบ ที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 20°C เพิ่มขึ้นทีละ 5°C เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 60°C ซึ่งผลการทดสอบจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาทุกๆ 2 วินาที เพื่อที่จะนำความสัมพันธ์นี้ไปทำการปรับค่า PID Control ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามความต้องการ การทดสอบอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิ

3.3 การเก็บข้อมูลจากระบบวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นทางความร้อนของวัสดุ

การเก็บข้อมูลจากระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ จะทำการเก็บค่าอุณหภูมิและจำนวนรีวอยการแทรกสอด ซึ่งการเก็บค่าอุณหภูมิสามารถเก็บค่าได้จากเครื่อง Data Acquisition รุ่น 34970A ของบริษัท Hewlett Packard และจำนวนรีวอยการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเก็บค่าได้จากเครื่อง Universal Counter รุ่น 53132A ของบริษัท Hewlett Packard ข้อมูลทั้งสองจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางบัส IEEE-488 เพื่อบันทึกและประมวลผลโดยการควบคุมของโปรแกรม Labview ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 โปรแกรม Labview ที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุโดยใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรีวรอยการแทรกสอดกับการขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ

ในการทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุจะทำการทดลองโดยพิจารณาจากจำนวนรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุก 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 = จำนวนรีวรอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

λ = ความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิด

จากสมการที่ 3.2 จะได้อ่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุที่ทำการทดสอบ 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 คือตัวเลข ใดๆ) 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) มีความสัมพันธ์ คือ

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

ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด (Uncertainty or standard error of mean) มีความสัมพันธ์คือ

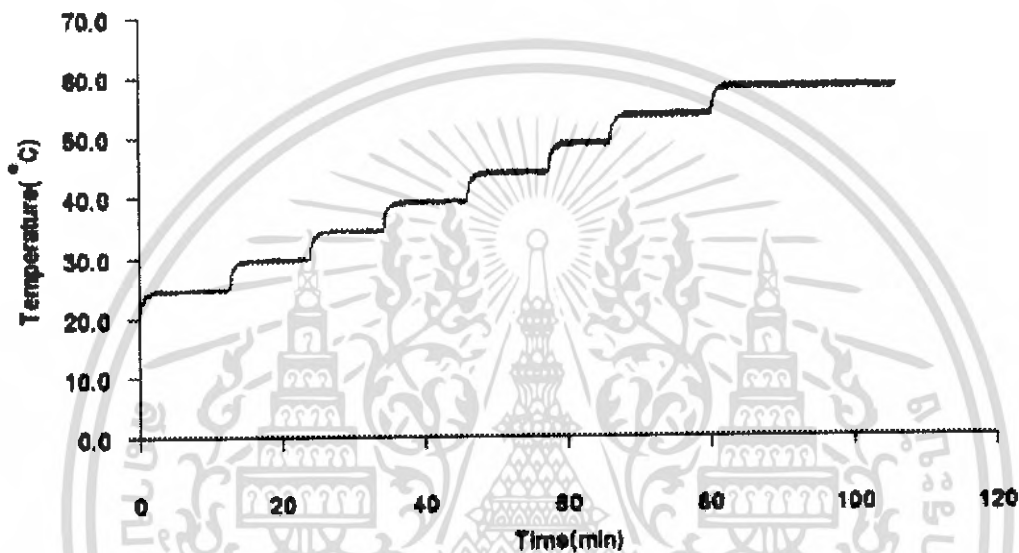
$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.8)$$

จากความสัมพันธ์ที่ 4.6 - 4.8 จะได้ค่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ได้จากการวัดทั้งหมด N ครั้ง คือ

$$\text{ค่าจากการวัด } N \text{ ครั้ง} = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (4.9)$$

4.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิม

ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความยาว 20 เซนติเมตร เป็นทรงกระบอกดันเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร ซึ่งทำการศึกษาการยืดตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยได้ทำการทดสอบอุณหภูมิซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม

จากรูปที่ 4.1 เป็นการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 20°C และเพิ่มขึ้นทีละ 5°C ทุกๆ 15 นาที จนถึง 60°C จากการทดสอบ พบว่าสามารถทำการรักษาอุณหภูมิได้ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิจากจุดที่ไม่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.3°C

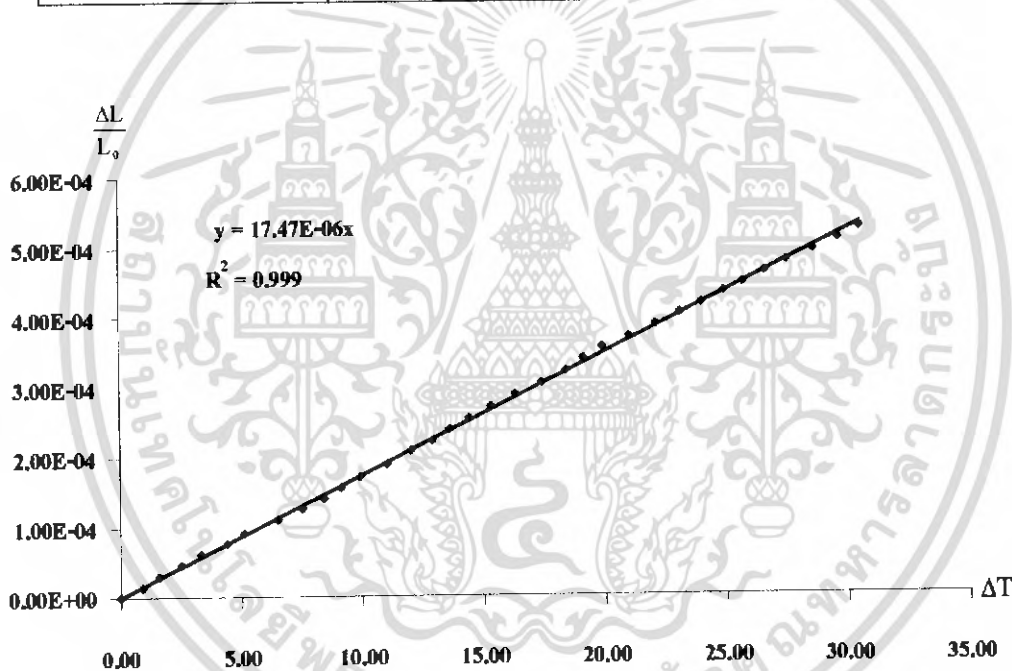
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1

Temp. Average (°C)	Count (n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
27.3	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.2	9	0.9	2.85E-06	1.42E-05
28.9	19	1.6	6.01E-06	3.01E-05
29.8	29	2.5	9.18E-06	4.59E-05
30.6	39	3.3	1.23E-05	6.17E-05
31.7	49	4.4	1.55E-05	7.75E-05
32.4	58	5.1	1.84E-05	9.18E-05
33.8	70	6.5	2.21E-05	1.11E-04
34.8	80	7.5	2.53E-05	1.27E-04
35.7	89	8.4	2.82E-05	1.41E-04
36.4	99	9.1	3.13E-05	1.57E-04
37.2	109	9.9	3.45E-05	1.72E-04
38.3	120	11.0	3.80E-05	1.90E-04
39.3	132	12.0	4.18E-05	2.09E-04
40.2	141	12.9	4.46E-05	2.23E-04
40.9	151	13.6	4.78E-05	2.39E-04
41.7	161	14.4	5.09E-05	2.55E-04
42.6	172	15.3	5.44E-05	2.72E-04
43.6	183	16.3	5.79E-05	2.90E-04
44.7	193	17.4	6.11E-05	3.05E-04
45.7	204	18.4	6.45E-05	3.23E-04
46.4	215	19.1	6.80E-05	3.40E-04
47.2	225	19.9	7.12E-05	3.56E-04
48.3	235	21.0	7.44E-05	3.72E-04
49.4	246	22.1	7.78E-05	3.89E-04
50.4	256	23.1	8.10E-05	4.05E-04
51.3	265	24.0	8.38E-05	4.19E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1(ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
52.2	275	24.9	8.70E-05	4.35E-04
53.0	283	25.7	8.95E-05	4.48E-04
53.9	293	26.6	9.27E-05	4.64E-04
54.8	303	27.5	9.59E-05	4.79E-04
55.9	313	28.6	9.90E-05	4.95E-04
56.9	323	29.6	1.02E-04	5.11E-04
57.8	333	30.5	1.05E-04	5.27E-04



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 17.47 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $17.47 \times 10^{-6} K^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเหล็กกล้าไร้สนิม ครั้งที่ 1

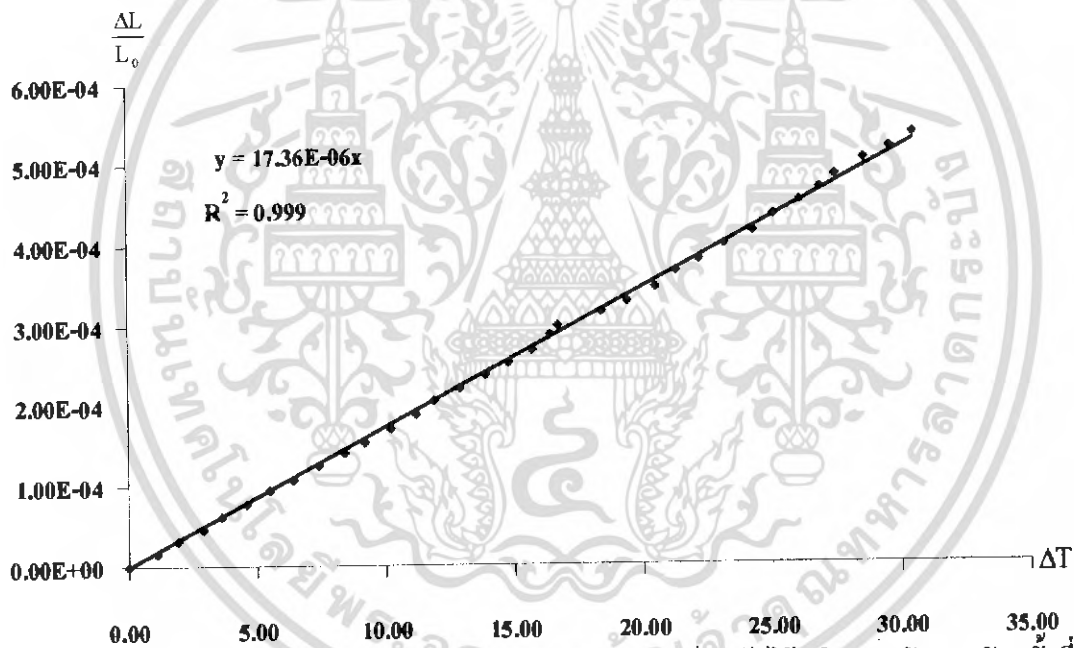
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
27.3	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.4	10	1.1	3.16E-06	1.58E-05
29.2	20	1.9	6.33E-06	3.16E-05
30.2	29	2.9	9.18E-06	4.59E-05
30.9	39	3.6	1.23E-05	6.17E-05
31.9	49	4.6	1.55E-05	7.75E-05
32.8	60	5.5	1.90E-05	9.49E-05
33.7	68	6.4	2.15E-05	1.08E-04
34.7	79	7.4	2.50E-05	1.25E-04
35.7	89	8.4	2.82E-05	1.41E-04
36.5	97	9.2	3.07E-05	1.53E-04
37.5	108	10.2	3.42E-05	1.71E-04
38.5	119	11.2	3.77E-05	1.88E-04
39.2	130	11.9	4.11E-05	2.06E-04
40.2	140	12.9	4.43E-05	2.21E-04
41.2	150	13.9	4.75E-05	2.37E-04
42.1	160	14.8	5.06E-05	2.53E-04
43.0	170	15.7	5.38E-05	2.69E-04
43.7	182	16.4	5.76E-05	2.88E-04
44.0	189	16.7	5.98E-05	2.99E-04
45.7	200	18.4	6.33E-05	3.16E-04
46.7	208	19.4	6.58E-05	3.29E-04
47.8	219	20.5	6.93E-05	3.46E-04
48.6	232	21.3	7.34E-05	3.67E-04
49.5	241	22.2	7.63E-05	3.81E-04
50.5	253	23.2	8.00E-05	4.00E-04
51.6	263	24.3	8.32E-05	4.16E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
52.4	276	25.1	8.73E-05	4.37E-04
53.4	287	26.1	9.08E-05	4.54E-04
54.2	297	26.9	9.40E-05	4.70E-04
54.8	307	27.5	9.71E-05	4.86E-04
55.9	320	28.6	1.01E-04	5.06E-04
56.9	329	29.6	1.04E-04	5.20E-04
57.8	340	30.5	1.08E-04	5.38E-04



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 17.36 \times 10^{-6}x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $17.36 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมครั้งที่ 2

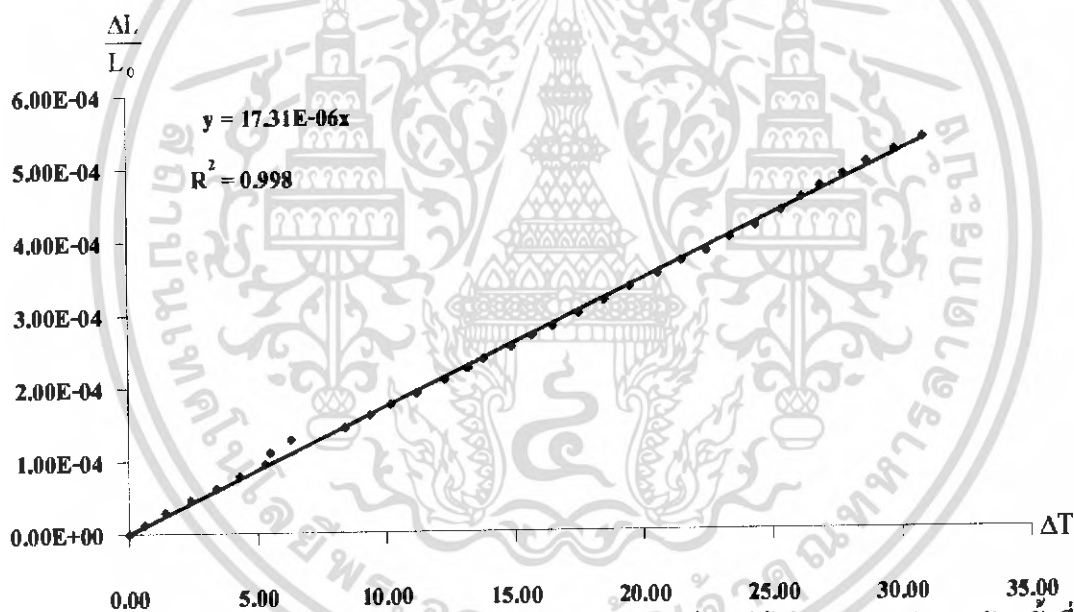
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
27.5	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.1	8	0.6	2.53E-06	1.27E-05
28.9	18	1.4	5.70E-06	2.85E-05
29.9	29	2.4	9.18E-06	4.59E-05
30.9	39	3.4	1.23E-05	6.17E-05
31.8	49	4.3	1.55E-05	7.75E-05
32.8	60	5.3	1.90E-05	9.49E-05
33.0	70	5.5	2.21E-05	1.11E-04
33.8	81	6.3	2.56E-05	1.28E-04
35.9	91	8.4	2.88E-05	1.44E-04
36.9	102	9.4	3.23E-05	1.61E-04
37.7	111	10.2	3.51E-05	1.76E-04
38.7	121	11.2	3.83E-05	1.91E-04
39.8	132	12.3	4.18E-05	2.09E-04
40.7	142	13.2	4.49E-05	2.25E-04
41.3	150	13.8	4.75E-05	2.37E-04
42.4	160	14.9	5.06E-05	2.53E-04
43.2	170	15.7	5.38E-05	2.69E-04
44.0	178	16.5	5.63E-05	2.82E-04
45.0	189	17.5	5.98E-05	2.99E-04
46.0	200	18.5	6.33E-05	3.16E-04
47.0	212	19.5	6.71E-05	3.35E-04
48.1	223	20.6	7.06E-05	3.53E-04
49.0	234	21.5	7.40E-05	3.70E-04
50.0	242	22.5	7.66E-05	3.83E-04
50.9	254	23.4	8.04E-05	4.02E-04
51.9	264	24.4	8.35E-05	4.18E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความยาวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3(ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
52.9	277	25.4	8.76E-05	4.38E-04
53.7	288	26.2	9.11E-05	4.56E-04
54.4	298	26.9	9.43E-05	4.71E-04
55.3	308	27.8	9.75E-05	4.87E-04
56.2	319	28.7	1.01E-04	5.05E-04
57.3	329	29.8	1.04E-04	5.20E-04
58.4	340	30.9	1.08E-04	5.38E-04



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ของเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับการวัดครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 17.31 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $17.31 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิม ครั้งที่ 3

จากผลการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $17.32 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมดังนี้

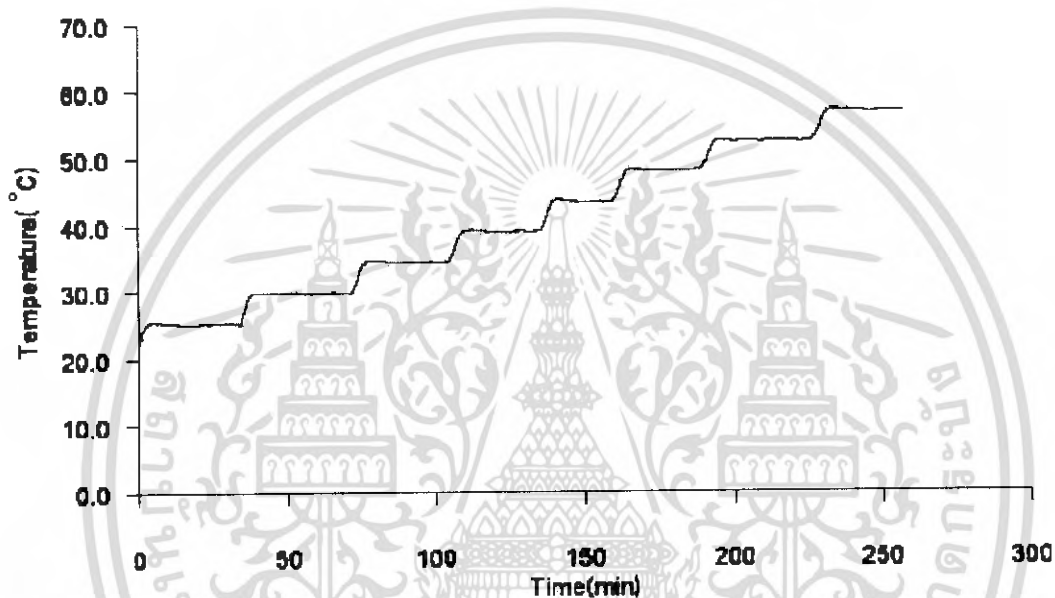
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม 3 ครั้งและค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ($\alpha \times 10^6$) K^{-1}
1	17.47
2	17.36
3	17.31
เฉลี่ย	17.38
ค่าจริง	17.32

จากตารางที่ 4.4 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมเฉลี่ยเท่ากับ $17.38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 8.18×10^{-8} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 0.05×10^{-6} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด 3 ครั้ง เท่ากับ $(17.38 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง

ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุประเภททองเหลืองที่มีความยาว 20 เซนติเมตร เป็นทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งทำการศึกษาการยืดตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยได้ทำการทดสอบอุณหภูมิซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของทองเหลือง

จากรูปที่ 4.5 เป็นการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับทองเหลือง โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 20°C และเพิ่มขึ้นทีละ 5°C ทุกๆ 15 นาที จนถึง 60°C จากการทดสอบ พบว่าสามารถทำการรักษาอุณหภูมิได้ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิจากจุดที่ไม่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.2°C

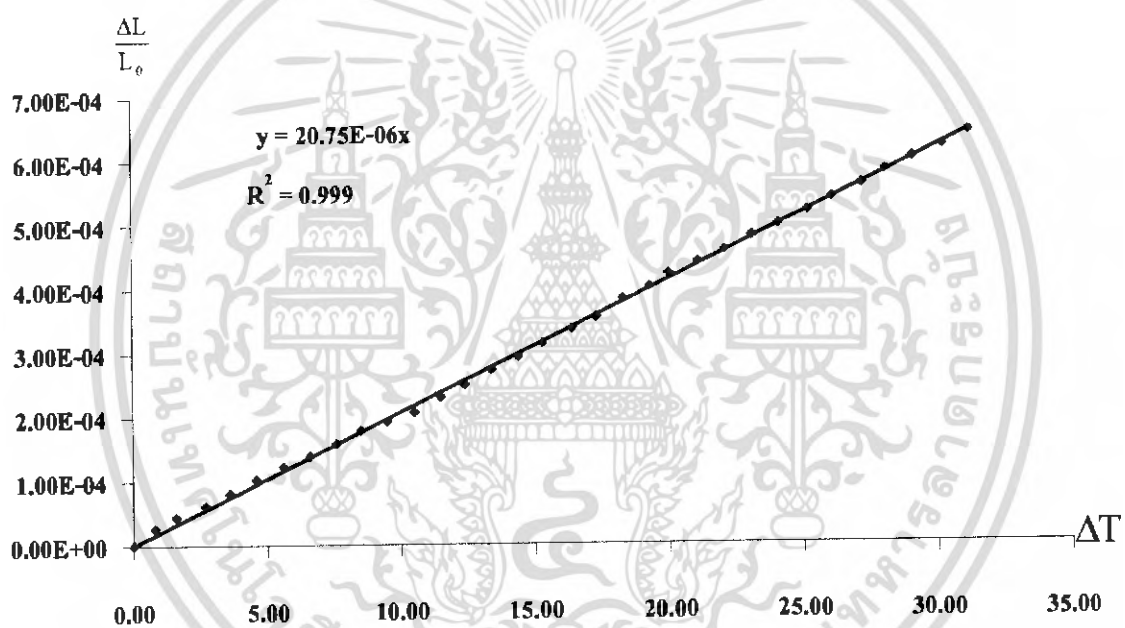
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1

Temp. Average ($^{\circ}\text{C}$)	Count(n)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
28.2	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
29.0	17	0.8	5.38E-06	2.69E-05
29.8	28	1.6	8.86E-06	4.43E-05
30.9	39	2.7	1.23E-05	6.17E-05
31.8	51	3.6	1.61E-05	8.07E-05
32.8	65	4.6	2.06E-05	1.03E-04
33.8	78	5.6	2.47E-05	1.23E-04
34.8	88	6.6	2.78E-05	1.39E-04
35.8	100	7.6	3.16E-05	1.58E-04
36.7	113	8.5	3.58E-05	1.79E-04
37.7	122	9.5	3.86E-05	1.93E-04
38.7	131	10.5	4.14E-05	2.07E-04
39.7	146	11.5	4.62E-05	2.31E-04
40.6	158	12.4	5.00E-05	2.50E-04
41.6	173	13.4	5.47E-05	2.74E-04
42.6	186	14.4	5.89E-05	2.94E-04
43.5	199	15.3	6.30E-05	3.15E-04
44.6	213	16.4	6.74E-05	3.37E-04
45.5	225	17.3	7.12E-05	3.56E-04
46.5	243	18.3	7.69E-05	3.84E-04
47.5	255	19.3	8.07E-05	4.03E-04
48.2	268	20.0	8.48E-05	4.24E-04
49.3	279	21.1	8.83E-05	4.41E-04
50.3	291	22.1	9.21E-05	4.60E-04
51.3	305	23.1	9.65E-05	4.83E-04
52.3	316	24.1	1.00E-04	5.00E-04
53.4	330	25.2	1.04E-04	5.22E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
54.3	343	26.1	1.09E-04	5.43E-04
55.4	356	27.2	1.13E-04	5.63E-04
56.3	370	28.1	1.17E-04	5.85E-04
57.3	382	29.1	1.21E-04	6.04E-04
58.4	394	30.2	1.25E-04	6.23E-04
59.4	408	31.2	1.29E-04	6.45E-04



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 20.75 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $20.75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 1

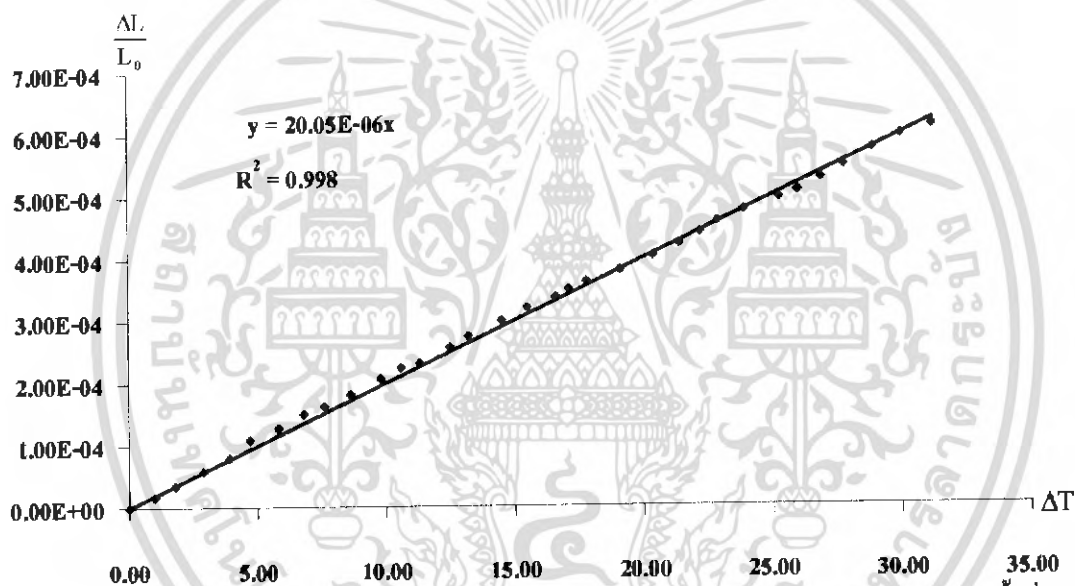
ตารางที่ 4.6 การวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
28.4	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
29.4	11	1.0	3.48E-06	1.74E-05
30.2	22	1.8	6.96E-06	3.48E-05
31.3	37	2.9	1.17E-05	5.85E-05
32.3	51	3.9	1.61E-05	8.07E-05
33.1	69	4.7	2.18E-05	1.09E-04
34.2	81	5.8	2.56E-05	1.28E-04
35.2	95	6.8	3.01E-05	1.50E-04
36.0	103	7.6	3.26E-05	1.63E-04
37.0	115	8.6	3.64E-05	1.82E-04
38.2	131	9.8	4.14E-05	2.07E-04
39.0	142	10.6	4.49E-05	2.25E-04
39.7	147	11.3	4.65E-05	2.33E-04
40.9	163	12.5	5.16E-05	2.58E-04
41.6	174	13.2	5.51E-05	2.75E-04
42.9	190	14.5	6.01E-05	3.01E-04
43.9	203	15.5	6.42E-05	3.21E-04
45.0	214	16.6	6.77E-05	3.39E-04
45.5	222	17.1	7.02E-05	3.51E-04
46.2	230	17.8	7.28E-05	3.64E-04
47.5	241	19.1	7.63E-05	3.81E-04
48.8	256	20.4	8.10E-05	4.05E-04
49.8	268	21.4	8.48E-05	4.24E-04
50.6	280	22.2	8.86E-05	4.43E-04
51.3	291	22.9	9.21E-05	4.60E-04
52.3	303	23.9	9.59E-05	4.79E-04
53.7	315	25.3	9.97E-05	4.98E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
54.4	322	26.0	1.02E-04	5.09E-04
55.3	335	26.9	1.06E-04	5.30E-04
56.2	348	27.8	1.10E-04	5.51E-04
57.3	365	28.9	1.15E-04	5.77E-04
58.4	379	30.0	1.20E-04	6.00E-04
59.6	389	31.2	1.23E-04	6.15E-04



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.7 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 20.05 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $20.05 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 2

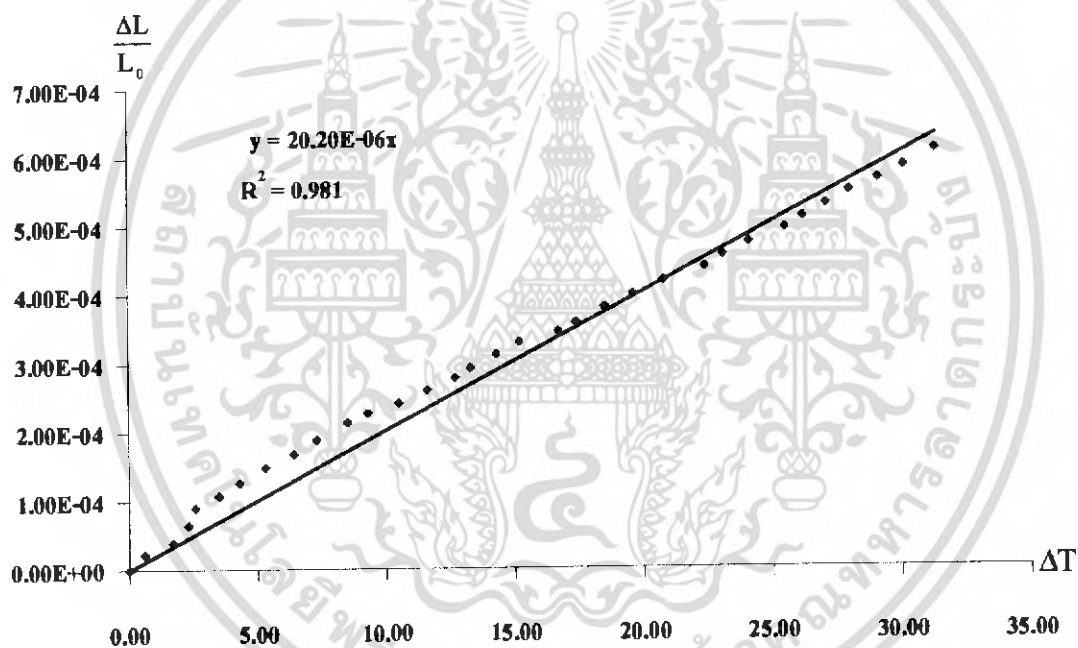
ตารางที่ 4.7 การวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
28.2	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.8	14	0.6	4.43E-06	2.21E-05
29.9	25	1.7	7.91E-06	3.96E-05
30.5	41	2.3	1.30E-05	6.49E-05
30.8	57	2.6	1.80E-05	9.02E-05
31.7	68	3.5	2.15E-05	1.08E-04
32.5	80	4.3	2.53E-05	1.27E-04
33.5	94	5.3	2.97E-05	1.49E-04
34.6	106	6.4	3.35E-05	1.68E-04
35.5	119	7.3	3.77E-05	1.88E-04
36.7	135	8.5	4.27E-05	2.14E-04
37.5	144	9.3	4.56E-05	2.28E-04
38.7	153	10.5	4.84E-05	2.42E-04
39.8	165	11.6	5.22E-05	2.61E-04
40.9	176	12.7	5.57E-05	2.78E-04
41.5	185	13.3	5.85E-05	2.93E-04
42.5	198	14.3	6.26E-05	3.13E-04
43.4	209	15.2	6.61E-05	3.31E-04
44.9	219	16.7	6.93E-05	3.46E-04
45.6	227	17.4	7.18E-05	3.59E-04
46.7	241	18.5	7.63E-05	3.81E-04
47.8	253	19.6	8.00E-05	4.00E-04
49.0	266	20.8	8.42E-05	4.21E-04
50.6	278	22.4	8.80E-05	4.40E-04
51.3	289	23.1	9.14E-05	4.57E-04
52.3	301	24.1	9.52E-05	4.76E-04
53.7	314	25.5	9.93E-05	4.97E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การวัดความยาวของทองเหลืองที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
54.4	324	26.2	1.03E-04	5.13E-04
55.3	336	27.1	1.06E-04	5.32E-04
56.2	348	28.0	1.10E-04	5.51E-04
57.3	359	29.1	1.14E-04	5.68E-04
58.3	371	30.1	1.17E-04	5.87E-04
59.5	386	31.3	1.22E-04	6.11E-04



รูปที่ 4.8 กราฟกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของทองเหลืองสำหรับการวัดครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.8 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 20.20 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $20.20 \times 10^{-6} K^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ครั้งที่ 3

จากการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $20.30 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลือง ดังนี้

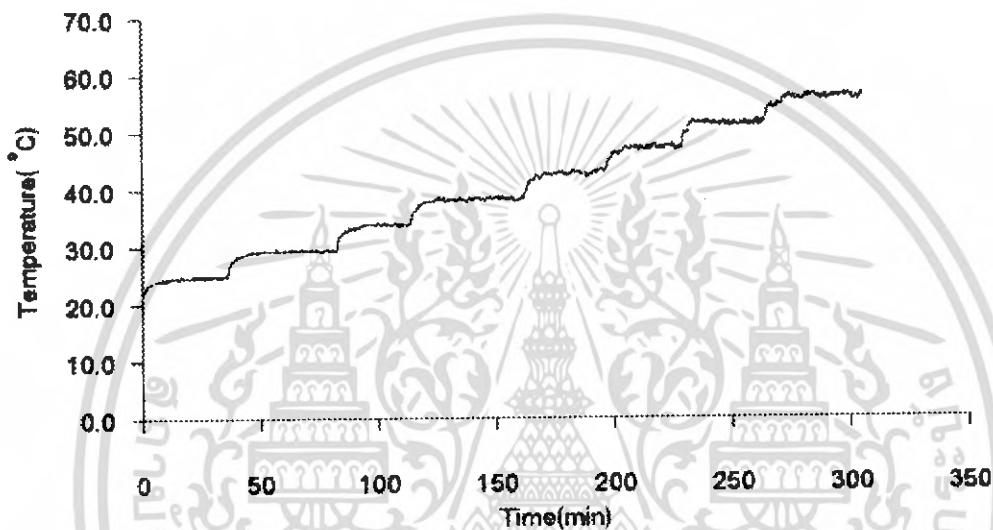
ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลือง 3 ครั้ง และค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ($\alpha \times 10^6$) K^{-1}
1	20.75
2	20.05
3	20.20
เฉลี่ย	20.33
ค่าจริง	20.30

จากตารางที่ 4.8 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลืองของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองเฉลี่ยเท่ากับ $20.33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(Standard deviation) เท่ากับ 3.69×10^{-7} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 0.21×10^{-6} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ $(20.33 \pm 0.21) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

4.4 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม

ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุประเภทอะลูมิเนียม ที่ความยาว 20 เซนติเมตร เป็นทรงกระบอกตันเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งทำการศึกษาการยืดตัวในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20°C ถึง 60°C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง โดยได้ทำการทดสอบอุณหภูมิซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของอะลูมิเนียม

จากรูปที่ 4.9 เป็นการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับอะลูมิเนียม โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 20°C และเพิ่มขึ้นทีละ 5°C ทุกๆ 15 นาที จนถึง 60°C จากการทดสอบ พบว่าสามารถทำการรักษาอุณหภูมิได้ โดยมีผลต่างของอุณหภูมิจากจุดที่ไม่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.3°C

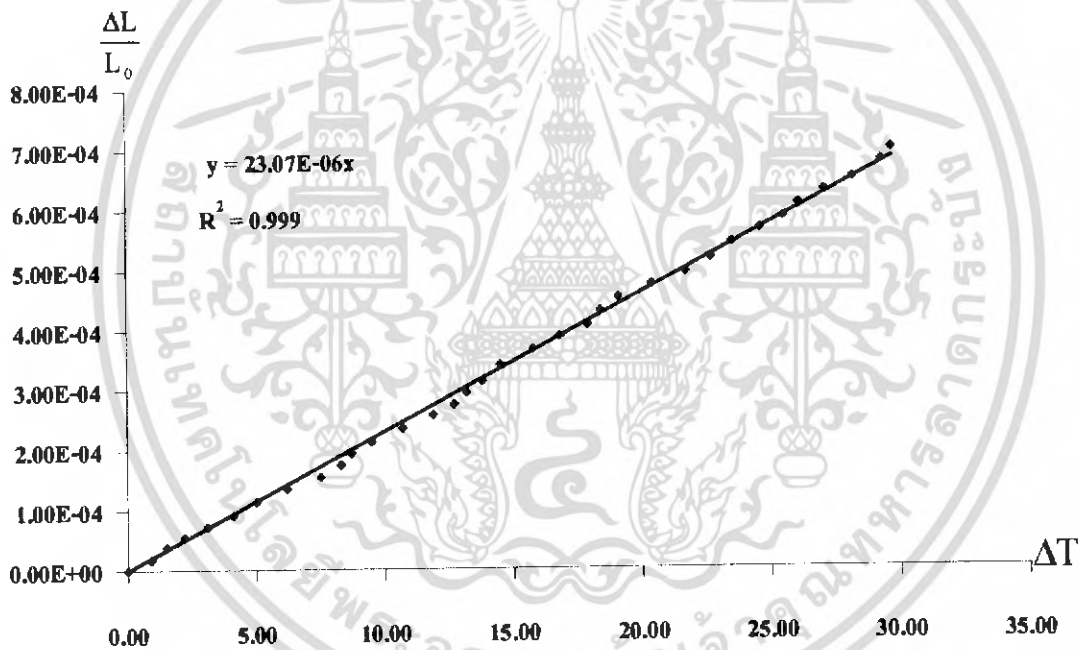
ตารางที่ 4.9 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
27.1	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.0	11	0.9	3.48E-06	1.74E-05
28.6	24	1.5	7.59E-06	3.80E-05
29.3	35	2.2	1.11E-05	5.54E-05
30.2	46	3.1	1.46E-05	7.28E-05
31.2	58	4.1	1.84E-05	9.18E-05
32.1	72	5.0	2.28E-05	1.14E-04
33.3	86	6.2	2.72E-05	1.36E-04
34.6	98	7.5	3.10E-05	1.55E-04
35.4	111	8.3	3.51E-05	1.76E-04
35.8	123	8.7	3.89E-05	1.95E-04
36.6	135	9.5	4.27E-05	2.14E-04
37.8	149	10.7	4.71E-05	2.36E-04
39.0	163	11.9	5.16E-05	2.58E-04
39.8	174	12.7	5.51E-05	2.75E-04
40.3	186	13.2	5.89E-05	2.94E-04
40.9	198	13.8	6.26E-05	3.13E-04
41.6	216	14.5	6.83E-05	3.42E-04
42.9	232	15.8	7.34E-05	3.67E-04
43.9	245	16.8	7.75E-05	3.88E-04
45.0	257	17.9	8.13E-05	4.07E-04
45.5	272	18.4	8.61E-05	4.30E-04
46.2	286	19.1	9.05E-05	4.52E-04
47.5	300	20.4	9.49E-05	4.75E-04
48.8	313	21.7	9.90E-05	4.95E-04
49.8	328	22.7	1.04E-04	5.19E-04
50.6	344	23.5	1.09E-04	5.44E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 1(ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
51.7	359	24.6	1.14E-04	5.68E-04
52.6	371	25.5	1.17E-04	5.87E-04
53.2	385	26.1	1.22E-04	6.09E-04
54.2	399	27.1	1.26E-04	6.31E-04
55.3	412	28.2	1.30E-04	6.52E-04
56.4	430	29.3	1.36E-04	6.80E-04
56.8	443	29.7	1.40E-04	7.01E-04



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.10 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 23.07 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $23.07 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ครั้งที่ 1

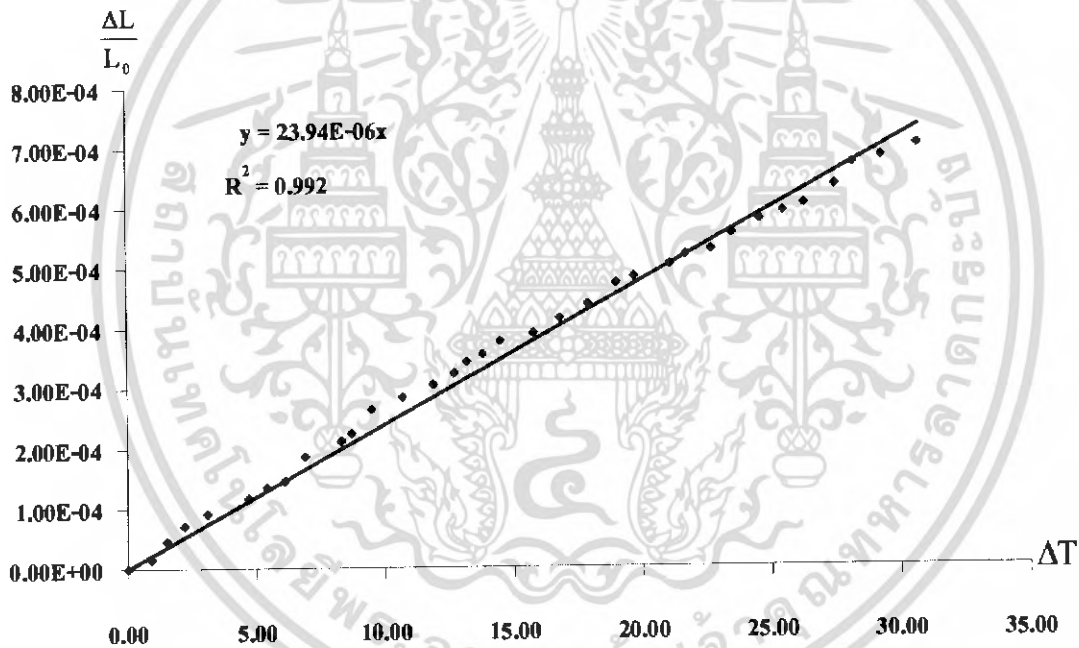
ตารางที่ 4.10 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
27.1	0	0.0	0.00E+00	0.00E+00
28.0	10	0.9	3.16E-06	1.58E-05
28.6	29	1.5	9.18E-06	4.59E-05
29.3	45	2.2	1.42E-05	7.12E-05
30.2	58	3.1	1.84E-05	9.18E-05
31.8	74	4.7	2.34E-05	1.17E-04
32.5	85	5.4	2.69E-05	1.34E-04
33.2	92	6.1	2.91E-05	1.46E-04
34.0	118	6.9	3.73E-05	1.87E-04
35.4	134	8.3	4.24E-05	2.12E-04
35.8	142	8.7	4.49E-05	2.25E-04
36.6	167	9.5	5.28E-05	2.64E-04
37.8	180	10.7	5.70E-05	2.85E-04
39.0	193	11.9	6.11E-05	3.05E-04
39.8	205	12.7	6.49E-05	3.24E-04
40.3	217	13.2	6.87E-05	3.43E-04
40.9	225	13.8	7.12E-05	3.56E-04
41.6	238	14.5	7.53E-05	3.77E-04
42.9	247	15.8	7.82E-05	3.91E-04
43.9	262	16.8	8.29E-05	4.14E-04
45.0	277	17.9	8.76E-05	4.38E-04
46.1	299	19.0	9.46E-05	4.73E-04
46.8	306	19.7	9.68E-05	4.84E-04
48.2	319	21.1	1.01E-04	5.05E-04
48.8	329	21.7	1.04E-04	5.20E-04
49.8	334	22.7	1.06E-04	5.28E-04
50.6	351	23.5	1.11E-04	5.55E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 2 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
51.7	366	24.6	1.16E-04	5.79E-04
52.6	374	25.5	1.18E-04	5.92E-04
53.4	382	26.3	1.21E-04	6.04E-04
54.6	402	27.5	1.27E-04	6.36E-04
55.3	425	28.2	1.34E-04	6.72E-04
56.4	432	29.3	1.37E-04	6.83E-04
57.8	445	30.7	1.41E-04	7.04E-04



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.11 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L / L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 23.94 \times 10^{-6} x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $23.94 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ครั้งที่ 2

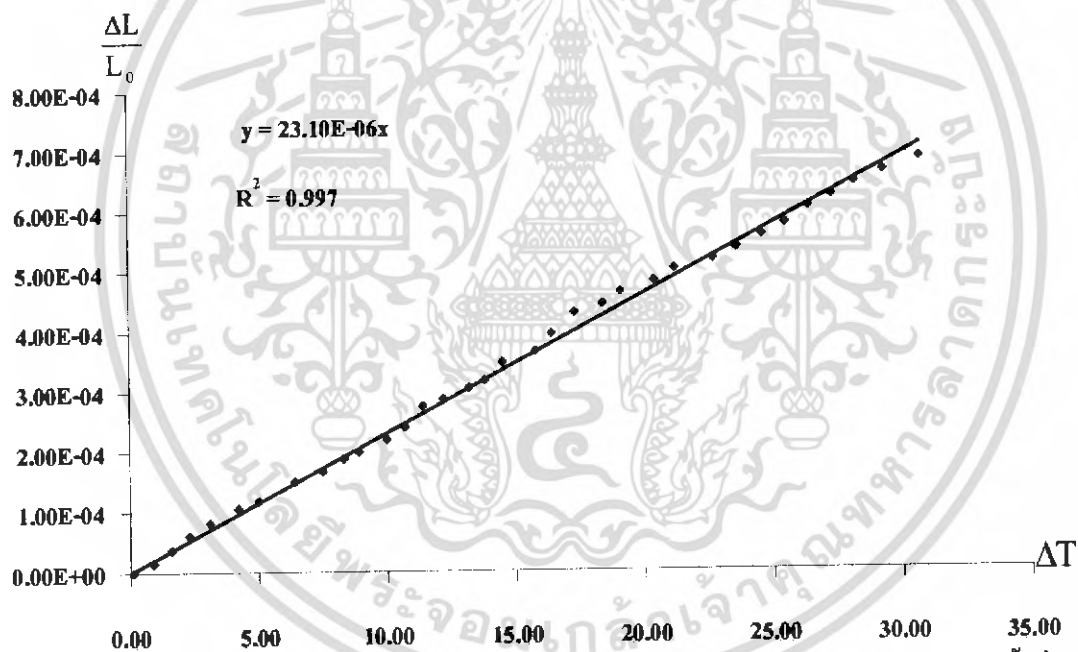
ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L / L_0$
27.2	0	0.1	0.00E+00	0.00E+00
28.0	10	0.9	3.16E-06	1.58E-05
28.7	24	1.6	7.59E-06	3.80E-05
29.4	39	2.3	1.23E-05	6.17E-05
30.2	52	3.1	1.65E-05	8.23E-05
31.3	67	4.2	2.12E-05	1.06E-04
32.1	75	5.0	2.37E-05	1.19E-04
33.5	95	6.4	3.01E-05	1.50E-04
34.6	106	7.5	3.35E-05	1.68E-04
35.4	119	8.3	3.77E-05	1.88E-04
36.0	126	8.9	3.99E-05	1.99E-04
37.1	139	10.0	4.40E-05	2.20E-04
37.8	152	10.7	4.81E-05	2.40E-04
38.5	174	11.4	5.51E-05	2.75E-04
39.3	182	12.2	5.76E-05	2.88E-04
40.3	193	13.2	6.11E-05	3.05E-04
40.9	201	13.8	6.36E-05	3.18E-04
41.6	220	14.5	6.96E-05	3.48E-04
42.9	231	15.8	7.31E-05	3.65E-04
43.5	250	16.4	7.91E-05	3.96E-04
44.4	272	17.3	8.61E-05	4.30E-04
45.5	281	18.4	8.89E-05	4.45E-04
46.2	294	19.1	9.30E-05	4.65E-04
47.5	305	20.4	9.65E-05	4.83E-04
48.3	318	21.2	1.01E-04	5.03E-04
49.8	328	22.7	1.04E-04	5.19E-04
50.7	340	23.6	1.08E-04	5.38E-04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความยาวของอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ครั้งที่ 3 (ต่อ)

Temp. Average (°C)	Count(n)	ΔT (°C)	ΔL (m)	$\Delta L/L_0$
51.7	353	24.6	1.12E-04	5.58E-04
52.6	365	25.5	1.15E-04	5.77E-04
53.5	383	26.4	1.21E-04	6.06E-04
54.4	395	27.3	1.25E-04	6.25E-04
55.3	408	28.2	1.29E-04	6.45E-04
56.4	420	29.3	1.33E-04	6.64E-04
57.8	434	30.7	1.37E-04	6.87E-04



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ของอะลูมิเนียมสำหรับการวัดครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.12 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ กับ ΔT ซึ่ง จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น $y = 23.10 \times 10^{-6}x$ โดยมีค่าความชันเท่ากับ $23.10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ครั้งที่ 3

จากการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียม ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาตรฐานเท่ากับ $23.20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยจากการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียมดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียม 3 ครั้ง และ ค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น ($\alpha \times 10^6$) K^{-1}
1	23.07
2	23.94
3	23.10
เฉลี่ย	23.37
ค่าจริง	23.20

จากตารางที่ 4.12 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียมของการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมเฉลี่ยเท่ากับ $23.20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ส่วนเชิงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 4.94×10^{-7} ค่าความไม่แน่นอนในการวัด (σ_x) เท่ากับ 0.29×10^{-6} และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของทองเหลืองทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ $(23.37 \pm 0.29) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะสรุปผลการทดลองจากวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุโดยใช้ไมเคลิสัน อินเตอร์เฟอริเตอร์

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุด้วยไมเคลิสันอินเตอร์เฟอริเตอร์เป็นการวัดการขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุ 3 ชนิด คือ เหล็กกล้าไร้สนิม, ทองเหลือง และอะลูมิเนียม โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับ $17.32 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $20.30 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ และ $23.20 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ตามลำดับ โดยจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของเหล็กกล้าไร้สนิมจากการทดลอง 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ $(17.38 \pm 0.05) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ มีค่าต่างจากค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.08 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดเท่ากับ 0.46 % ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของทองเหลืองจากการทดลอง 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ $(20.33 \pm 0.21) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ มีค่าต่างจากค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.03 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดเท่ากับ 0.15 % และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของอะลูมิเนียมจากการทดลอง 3 ครั้งเท่ากับ $(23.37 \pm 0.29) \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ มีค่าต่างจากค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.17 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดเท่ากับ 0.73 % ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนั้นสอดคล้องกับค่าที่เป็นมาตรฐาน จากผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุที่ได้จากการทดลองจะพบว่ามีค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเกิดขึ้น ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดเกิดขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากอุปกรณ์สำหรับการให้ความร้อนได้มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกทำให้การเปลี่ยนแปลงความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเร็ว ทำให้มีผลต่อจำนวนรีวอยการแทรกสอดที่เกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเช่น กระจกสะท้อน, ตัวแยกแสงและ หัววัดแสง เพื่อลดการกระเจิงของแสง
2. ก่อนการทำการทดลองควรจะมีการจัดแนวแสงให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ถูกต้อง
3. การทดลองควรทำในห้องมืดหรือในห้องที่มีแสงน้อยเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนของสัญญาณที่ได้จากการวัด

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. พัฒนาการให้ความร้อนกับชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพโดยการทำทดลองในระบบสุญญากาศ เพื่อให้ระบบการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงาน ไม่มีการสูญเสียกับสภาพแวดล้อม ทำสามารถวัดได้แม่นยำขึ้น
2. ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยเช่นเลเซอร์ไดโอดเพื่อทำให้สามารถวัดการขยายตัวได้ละเอียดมากขึ้น
3. ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ควรจะใช้เป็นระบบแบบ 2 ทิศทาง จะทำให้สามารถนับจำนวนรีวอยการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงได้แม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

รศ.สุวรรณ คูสำราญ, ทัศนศาสตร์กายภาพ, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ธันวาคม 2537, หน้า 142-176

Strong, J., Concept of Classical Optic, Freeman, San Francisco, 1959.

Hecht, E., and Zajac, A., Optic, Addison- Wesle, Reading, MA, 1974.

บริษัท เทคโนโลยีอินสตูเม้นท์ จำกัด, vol.2 Catalogue

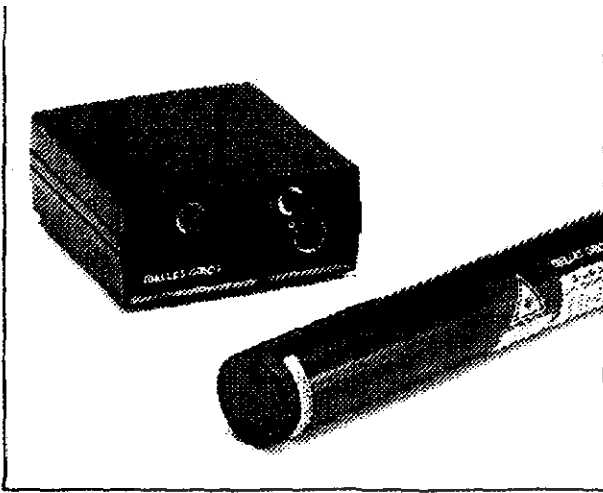
Glenn Elert , Thermal Expansion , Available : <http://www.Hypertextbook.com/physics/Thermal/Expansion/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



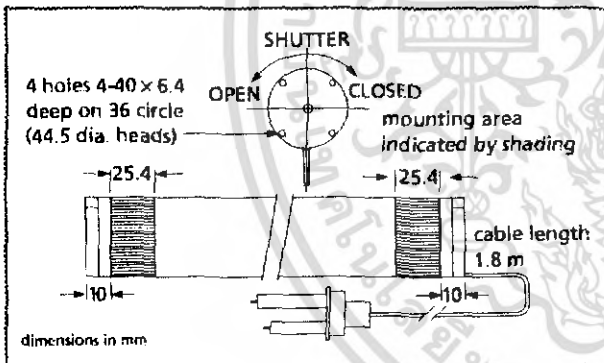
Cylindrical Helium Neon Laser Systems

- ☒ Red, green, yellow, orange, or near infrared output
- ☒ Complete systems, including power supply
- ☒ CDRH, IEC, and CE (230 Vac only) compliant

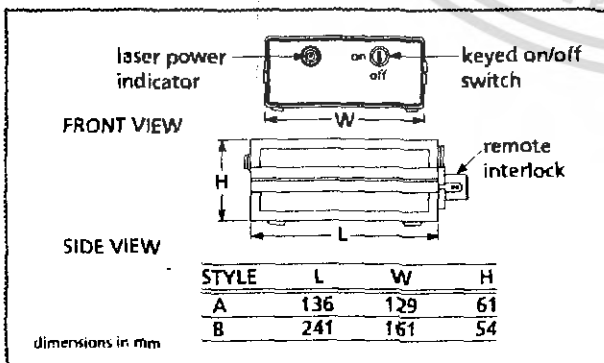
Melles Griot manufactures a wide variety of cylindrical HeNe laser systems, only the most popular of which are represented here. All laser heads are mounted in rugged aluminum housings and come with a matched power supply. All systems meet CDRH and IEC requirements for laser equipment, and 230-volt versions are CE compliant. Lasers are available in randomly polarized or linearly polarized (>500:1 extinction ratio) versions. For custom OEM designs and alternative wavelengths, contact your nearest Melles Griot sales office.

SPECIFICATIONS: CYLINDRICAL HELIUM NEON LASER SYSTEMS

- M²: <1.05
- Transverse Mode: TEM₀₀
- Bore-Sight Error: <1 mrad
- Beam Centration: ±0.25 mm
- Long-Term Drift: ±2% per 8 hours
- Noise (rms): <0.5%
- Noise Frequency: 30 Hz to 10 MHz
- Input Voltage:
 - 100 Vac, 115 Vac, or 230 Vac ± 10% (specify)
- Input Frequency: 50-60 Hz
- Shock: 25 G for 11 msec
- Operating Temperature: -20°C to +40°C
- Nonoperating Temperature: -40°C to +80°C
- Operating Humidity: 0% to 90% non-condensing
- Nonoperating Humidity: 0% to 100%
- CE Compliance: Compliant (230-Vac version only)



Cylindrical helium neon laser head



Cylindrical helium neon laser power supplies

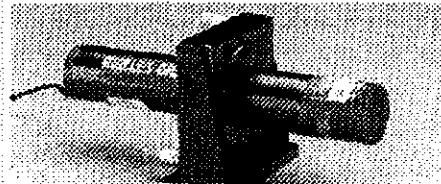
Do you need

ADJUSTABLE CYLINDRICAL LASER HOLDER

Our precision cylindrical laser holders combine sturdy clamping with precise angular adjustment.

- Micrometer (07 HLC series) or thumbscrew (07 HLB series) drives
- 6 degrees of angular adjustment (θy and θz)
- Use with 44.5-mm laser heads

For a complete description of the precision cylindrical laser holders, go to page 22.22.



d (632.8 nm) Cylindrical Helium Neon Laser Systems

Output Power (W)	Beam Diameter (1/e ²) (mm)	Beam Divergence (1/e ²) (mrad)	Maximum Mode Sweeping (%)	Polarization	Longitudinal Mode Spacing (MHz)	Laser Head Dimensions Length x Diameter (mm)	Power Supply Style	Safety Classification		PRODUCT NUMBER
								CDRH Class	IEC Class	
0.5	0.46	1.77	10	Random	1063	177.8 x 31.8	A	II	2	25 LHR 213
0.5	0.46	1.77	10	Linear	1063	177.8 x 31.8	A	II	2	25 LHP 213
1.0	0.59	1.35	5	Random	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LHR 111
1.0	0.59	1.35	5	Linear	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LHP 111
2.0	0.76	1.06	5	Random	636	279.9 x 35.1	A	IIIa	3R	25 LHR 073
2.0	0.76	1.06	5	Linear	636	279.9 x 35.1	A	IIIa	3R	25 LHP 073
2.0	0.59	1.35	5	Random	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LHR 121
2.0	0.59	1.35	5	Linear	687	271.8 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LHP 121
2.5	0.52	1.53	10	Random	822	224.8 x 31.8	A	IIIa	3R	25 LHR 691
2.5	0.52	1.53	10	Linear	822	224.8 x 31.8	A	IIIa	3R	25 LHP 691
5.0	0.80	1.00	2	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LHR 151
5.0	0.80	1.00	2	Linear	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LHP 151
7.0	1.02	0.79	2	Random	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 171
7.0	1.02	0.79	2	Linear	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 171
10.0	0.65	1.24	2	Random	341	483.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 991
10.0	0.65	1.24	2	Linear	341	483.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 991
17.0	0.96	0.84	2	Random	257	637.3 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHR 925
17.0	0.96	0.84	2	Linear	257	637.3 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LHP 925

add the appropriate suffix to the product number to indicate input voltage: -461 for 100 Vac, -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac.

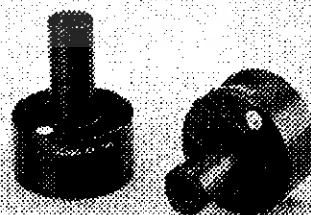
Do you need

LASER BEAM EXPANDERS

Our compact OEM beam expanders are designed to mount directly to any Melles Griot 44.5-mm helium neon laser head.

- $\lambda/2$ wavefront distortion at 633 nm
- Built-in focus adjustment
- Diffraction-limited focus spot size
- Two magnifications: 4x (09 LBC 001) and 8x (09 LBC 003)

For a detailed description of the OEM beam expanders, go to page 16.7.



BEST PRODUCT AND CUSTOM CAPABILITIES

Helium Neon Lasers

MELLES GRIOT 40.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทาง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

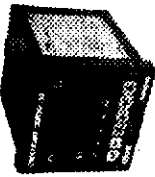
Green, Yellow, Orange, and Near-infrared Cylindrical Helium Neon Laser Systems

cw Output Power (mW)	Beam Diameter (1/e ²) (mm)	Beam Divergence (1/e ²) (mrad)	Maximum Mode Sweeping (%)	Longitudinal Mode Spacing (MHz)	Laser Head Dimensions Length x Diameter (mm)	Power Supply Style	Safety Classification		PRODUCT* NUMBER	
							Polarization	CDRH Class		IEC Class
Wavelength: 543.5 nm (green)										
0.20	0.63	1.26	14	Random	732	240.9 x 35.1	A	II	2	25 LGR 025
0.30	0.77	0.90	10	Linear	438	396.2 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LGP 151
0.30	0.79	0.89	5	Linear	373	455.9 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LGP 173
0.50	0.80	1.01	10	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LGR 151
0.80	0.79	0.88	5	Random	373	455.9 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LGR 173
1.00	0.86	0.81	5	Linear	320	510.3 x 44.5	B	IIIa	3R	25 LGR 193
1.50	0.86	0.81	5	Random	320	510.3 x 44.5	B	IIIa	3R	25 LGR 193
2.00	0.86	0.81	5	Random	320	510.3 x 44.5	B	IIIa	3R	25 LGR 393
Wavelength: 594.1 nm (yellow)										
0.75	0.80	1.01	10	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LYR 151
2.00	0.75	0.91	5	Linear	373	455.9 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LYP 173
2.00	0.75	0.91	5	Random	373	455.9 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LYR 173
Wavelength: 611.9 nm (orange)										
2.00	0.75	1.05	5	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIa	3R	25 LOR 151
Wavelength: 1523 nm (near-infrared)**										
0.60	1.26	1.59	5	Linear	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LIP 151
0.80	1.33	1.62	2	Linear	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LIP 171
0.70	1.26	1.59	5	Random	438	396.2 x 44.5	A	IIIb	3B	25 LIR 151
1.00	1.33	1.62	2	Random	373	455.9 x 44.5	B	IIIb	3B	25 LIR 171

*Add the appropriate suffix to the product number to indicate input voltage: -461 for 100 Vac, -249 for 115 Vac, -230 for 230 Vac.
 **Noise unspecified for 1523-nm 25 LIRP series.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TZN4M SERIES



Thank you very much for selecting Autonics products.
For your safety, please read the following before using.

- Caution for your safety**
 - Please keep these instructions and remove them before using this unit.
 - Please observe the warnings that follow.
 - Warning** Shock injury may result if instructions are not followed.
 - Caution** Product may be damaged or injury may result if instructions are not followed.
 - The following is an explanation of the symbols used in the operation manual:
 - ▲: Caution
 - ⚠: Warning
- Warning**
 - In case of using this unit with mechanized (nuclear, power control, medical equipment, vehicle, train, etc.) or other automation apparatus, attachment or safety device (etc.) is necessary when installing fall-safe device, or conductive cover, etc. on the apparatus.
 - The unit must be mounted on panel.
 - It may cause a fire or electric shock.
 - Do not connect terminals when it is powered on.
 - Please check the number of terminals when connect power line or measuring input.
 - It may cause a fire.
 - Do not repair or checkup when power is on.
 - It may give an electric shock.
- Caution**
 - This unit shall not be used outdoors.
 - It might shorten the life cycle of the product if given an electric shock.
 - When wire connection (No.20AWG(0.5mm²)) should be used and screw bolt on terminal block with 0.74N·m to 0.90N·m strength.
 - It may result in malfunction or fire due to contact failure.
 - Please observe specification rating.
 - It might shorten the life cycle of the product and cause a fire if it is used beyond rated switching capacity of Relay contact.
 - Do not use the lead beyond rated switching capacity of Relay contact.
 - It may cause insulation failure, contact melt, contact failure, relay broken, fire, etc.
 - In cleaning the unit, do not use water or an oil-based detergent.
 - It might cause an electric shock or fire that will result in damage to the product.
 - Do not hit/drop dust or wire drops into inside of this unit.
 - It may cause a fire or mechanical trouble.
 - Do not use this unit at place where there are flammable or explosive gas, humidity, direct ray of the sun, radiant heat, vibration, impact etc.
 - It may cause a fire or explosion.
 - Please check the polarity of power before connecting thermocouple.
 - It may cause a fire or explosion.

Front panel identification

① PV : Display Processing Value (Red)
 ② SV : Display Setting Value (Green)
 ③ SV2 : Indicate SV2 operation
 ④ AT Key : Indicate Autotuning operation
 ⑤ ME Key : Mode key
 ⑥ AT Key : Autotuning run key
 ⑦ [] : Stop key
 ⑧ [] : Setting key
 ⑨ [] : Indicate output
 ⑩ [] : Indicate EVENT 1 output
 ⑪ [] : Indicate EVENT 2 output

The above specification are changeable without notice anytime.

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

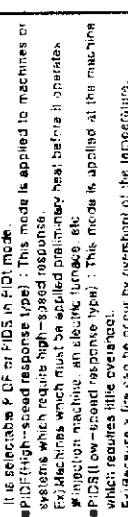
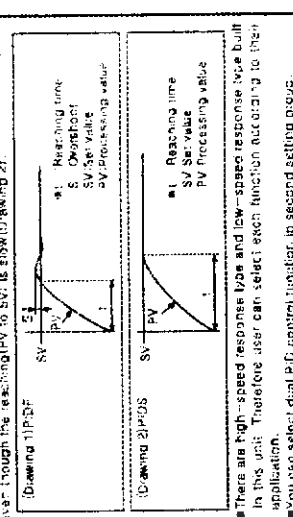
Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

Item	Symbol	Value
1. Temperature PID	①	100.0 to 500.0 P
2. D gain	②	0 to 100.0 D
3. I gain	③	0 to 100.0 I
4. Set point	④	0 to 500.0 P
5. Relay output	⑤	0 to 500.0 P
6. Control output	⑥	0 to 500.0 P
7. SSR output	⑦	0 to 500.0 P
8. Current output	⑧	0 to 500.0 P
9. Current output	⑨	0 to 500.0 P
10. Current output	⑩	0 to 500.0 P
11. Current output	⑪	0 to 500.0 P
12. Current output	⑫	0 to 500.0 P
13. Current output	⑬	0 to 500.0 P
14. Current output	⑭	0 to 500.0 P
15. Current output	⑮	0 to 500.0 P
16. Current output	⑯	0 to 500.0 P
17. Current output	⑰	0 to 500.0 P
18. Current output	⑱	0 to 500.0 P
19. Current output	⑲	0 to 500.0 P
20. Current output	⑳	0 to 500.0 P

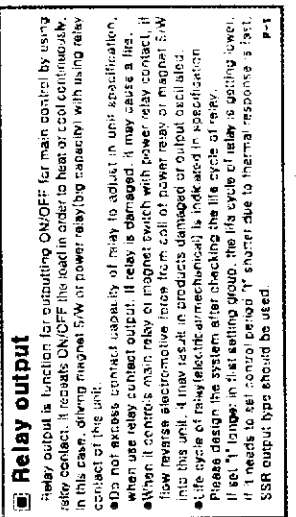
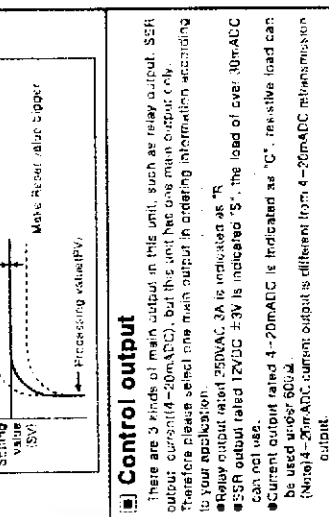
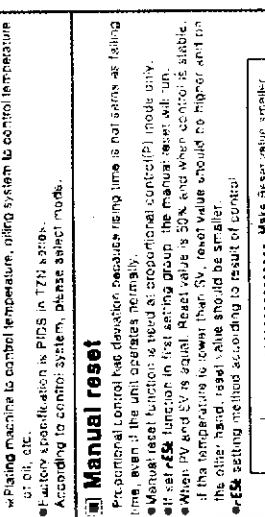
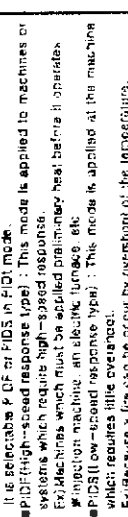


Manual reset
Proportional control has deviation because rising time is not same as falling time, even if the unit operates normally.
Manual reset function is used at proportional control (P) mode only.
When PV and SV is equal, Reset value is 50%. And when control is stable, if the temperature is lower than SV, reset value should be higher and in the other hand, reset value should be smaller.
Reset setting method according to result of control.

Control output
There are 3 kinds of main output in this unit, such as relay output, SSR output, current (4~20mA DC), but this unit has one main output only.
Therefore please select one main output in ordering information according to your application.
Relay output rated 250VAC 2A is indicated as "R".
SSR output rated 12VDC 3A is indicated as "S".
Current output rated 4~20mA DC is indicated as "C".
Current output rated 4~20mA DC is indicated as "C".
Note: 4~20mA DC current output is different from 4~20mA DC reference output.

Relay output
Relay output is function for substituting ON/OFF for main control by using relay contact. It receives ON/OFF the load in order to heat or cool continuously. In this case, driving magnet 5W at power relay (capacity) with using relay contact of the unit.
It does not possess contact capacity of relay to adjust in unit specification, when use relay contact output. If relay is damaged, it may cause a fire.
When it controls main relay or magnet switch with power relay contact, it flows reverse electromotive force from coil of power relay or magnet SW into this unit. It may result in products damaged or output oscillates. Please design the system after checking the life cycle of relay.
The life cycle of relay (electrical/mechanical) is indicated in specification. If it is "1" range, in that setting group, the life cycle of relay is getting lower. If it needs to set control period "1" shorter due to thermal response is fast, SSR output type should be used.

Autotuning operation
PID Autotuning function automatically measures thermal characteristics and response of the control system and then executes its value under high precision and stability after calculating the time constant of PID required to control system temperature.
Execute the Autotuning function at initial time after connecting the controller & the sensor.
Execution of Autotuning is started when pressing AT key to 1/3sec. or more is OFF. The Autotuning will stop AT lamp will flicker, and when the lamp will stop flicker, the Autotuning function is executing. It is stopped by pressing AT key to 1/3sec. or more.
When the power lamp, off or the stop signal is applied while Autotuning function is executing, the Autotuning function is not executed and it remembers the value before power lamp off.
Time constant of PID selected by Autotuning function can be changed in first setting group.
Autotuning operation is executed at setting value (SV) in Tuning mode which is factory default.
Autotuning operation is executed at 70% of setting value (SV).
Autotuning operation is available in second setting group.
Execute the Autotuning function again periodically, because the thermal characteristics of the control object can be changed when the controller is used continuously for a long time.



Exceeding the capacity of relay contact is prohibited. In this case, you may have to use a setting bigger, the life cycle will be shortened by noise of spark.
 ●SSR output is 12VDC and it can use max. 30mA for load.
 ●Response speed of SSR is faster than relay cause of using semiconductor.
 ●It can proceed high speed control.
 ●Relay (1 to 2sec.): It will be good condition to control the target.
 ●Radiation of semiconductor is very important in SSR.
 Therefore, it is likely use 80% of rated of SSR and if SSR is damaged, it may result in a fire.

Current output(4-20mADC)
 This output, called analogue output is to control the transducer(SSR unit). It can proceed stable control because there is no sudden change. It outputs 4-20mADC, measured value is 100% at 20mADC, 0% at 4mADC. It is used with transducer and can not be used in the other application. The output operates through linear spanned a constant current circuit. Therefore current output is not changed even if the relative load is connected in outside, but if resistive load is too high(lower 500Ω), the current can be changed. (Please use the resistive load less than 500Ω.)
 ●Do not use a current output in case of using ON/OFF control.
 ●When current output is used, it is charging as analogue form, the manipulated value can rarely be 100% or 0%.
 ●Translating LBA function if not used.
 ●Front OUT temp does not operate in case of using a current output.

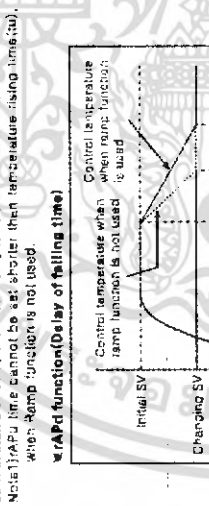
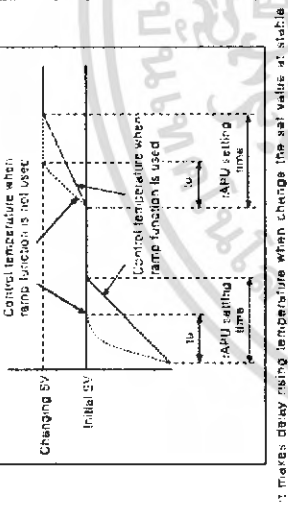
Retransmission output(4-20mADC)
 Retains mismatch output is different with current output at control output and to retransmit current(4 to 20mADC), converting the measuring temperature to the transistor, PC, etc.
 ●But the current output can not use at over 500Ω resistive load.
 ●Mode of retransmission output is selected at FS-H, FS-L in the second row chart.
 ●When PV reach at value of FS-L, it output 4mA.
 ●When PV reach at value of FS-H, it output 20mA.
 ●4 to 20mADC is design as resolution of min. 15.00C divisions.

RS485 communication function
 It is used on the purpose that transmitting PV to an external equipment. It can be set at top. Address in second setting group.
 ●Address setting : 2480, 4400, 9600(Start bit, Stop bit, Non parity)
 ●Data setting : 1 to 99
 ●Compatible PLC : LG, Mitsubishi, CIMON etc.

Decimal point(Dot) setting function
 Decimal point is displayed as "dot" in second setting group when the input is only analog10-16VDC, 1-5VDC, 4-20mADC.

Cool/Heat function
 Generally there are two ways to control temperature, one Heat-function is to heat when PV is getting down(faster). The other Cool-function is to cool when PV is getting high(faster). These functions are overlapping oppositely when it is ON-Off control or proportional control. But in this case PID loop constant will be different due to PID time constant will be decided according to control system when it is PID control.
 ●Cool-function and heat-function can be set at "OFF" mode in second setting group.
 ●Cool-function and heat-function must be set correctly according to the application, if set as opposite function, it may cause a fire.
 ●If set cool-function at heater, even if temperature is getting high, it will be maintained ON and it may cause a fire.
 ●Avoid changing heat-function to cool-function or cool-function to heat-function on the unit is operating.
 ●It is impossible to operate both functions at once in this unit.
 Therefore one function should be selected only.

The temperature of control system during setting time at RA-2, RA-3, RA-4 in first setting group. If Ramp is not ON in second setting group, Ramp, Ramp will not be displayed in first setting group.
 ●Set Ramp is ON in second setting group for using Ramp function.
 ●Ramp function will be operating when changing the set value at stable control value or when the power again after the power was removed.



Control falling temperature as above.
 Note: RAMP time cannot be shorter than falling time (t_d) of not being ramp function operated.

SV-2 function
 If using SV-2 function, it changes the temperature of control system to the second setting value by external relay contact signal. It can change the setting value as sequentially by relay contact without key operation.
 SV-2 control signal
 ON use area of SV-2 contact
 SV-2 control signal
 ●If set SV-2 at required time and particular area as the above chart.
 ●SV-3 is in first setting group.
 Application :
 The control system, which has to maintain constant temperature such as oven application, if you open the door, temperature will go down. In this case if you set the second setting value higher than setting value temperature will rise fast. Therefore after installing a micro-switch in order to detect the door Open/Close and connect it to SV-2, the second setting value should be higher than SV1 then it controls temperature of oven efficiently.

If you check the deviation of every thermo sensor precisely, it can measure temperature accurately.
 ●Input sensor can be set at "First setting group"
 ●Use this mode after measuring deviation occurred from temperature sensor exactly. Because if measured deviation value is not corrected, displayed temperature may be too high or too low.
 ●Setting range of input levels is -48 to +50°C (-50 to +50.0°C).
 ●When you set the input reset value, you may need to record it, because it will be useful when performing maintenance.

Sub output(Event) function
 Sub output can activate as main control output and sub function as well. There is one sub output in this unit.
 ●This sub output is relay-A contact output.
 ●1 or 2 sub mode can be selected among 7 kinds of alarm mode of LBA operated when the heater line is cut, SBA operated when the sensor line is cut.
 ●The sub output can be selected on or automatically reset depending on the alarm option mode selected.
 ●When the sensor line or the heater line is cut, SBA or LBA output turns ON. This output on status must be reset by turning the power off.
 ●When using Alarm output it is able to change interval between ON and OFF within range of 1 to 1000(0.1 to 100.0C).
 ●When alarm set temperature is 200C, the output turns on when PV increases from 100C to 200C. In the case, the output turns off at 182C.
 (Above set 200C, it set the interval between ON and OFF as 2.0C.)
 ●Select function of Sub output in second setting group and set value of operation in first setting group.

Alarm output
 This unit has output for control and sub(Alarm) output by option. (The alarm output is relay output and operates regardless to output for control.)
 ●Alarm output operates when the temperature of target is getting higher or lower than setting value.
 ●1 alarm mode can be selected among 7 kinds of alarm mode at EV1-EV2 in the second setting group.
 ●Please refer to "Operation chart for alarm output" & "Option of alarm output" regard to detailed operation and electrical operation.

Operation chart for a alarm output

AL-0	No alarm output. ●Deviation High-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond higher limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-1	Deviation Low-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond lower limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-2	Deviation High-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond higher limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-3	Deviation Low-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond lower limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-4	Deviation High-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond higher limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-5	Deviation Low-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond lower limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.
AL-6	Deviation High-Limit alarm If deviation between PV and SV is beyond higher limit deviation, output will be ON. The deviation temperature is set in AL 1 or AL 2 of first setting group.

●"0" is interval between ON and OFF of the setting value. It is 100(0.1 to 100.0C) when set at 0.1, 1000(1 to 1000.0C) when set at 1, 10000(10 to 10000.0C) when set at 10, 100000(100 to 100000.0C) when set at 100.

AL-A	General alarm	No optional alarm output.
AL-B	1-Relay function	When alarm output turns on, the output will be ON continuously.
AL-C	Standby sequency function	It doesn't output at first operation. (When it reaches to last object value) it operates such as standby sequency function.
AL-D	1-Relay & Standby sequency function	Standby sequency function operates.

Loop break alarm(LBA)
 LBA function is to diagnose an abnormal temperature of the control system. If the temperature of the control system is not changed within ±2C during setting time of LBA, the LBA output will be ON.
 ●When setting value(SV) is 300C, processing value(PV) is 350C, this unit controls 100%. In this time if there is no change of system temperature, it recognizes heater is cut off then LBA output will be ON.
 ●LBA output can be selected at EV-1, EV-2 of the second setting group. ●Setting range of LBA output is 1 to 9999sec.
 ●All thermal response of the control system is slow. LBA value should be set to a high value.
 ●LBA output only operates when the manipulated value of the controller is 0% and 100%. LBA cannot be used when it is Current output.
 ●When LBA output is ON, please check the following :
 1) Short-circuit or cutting of the temp. sensor.
 2) Abnormal condition of the equipment(Conductor, sub-relay, etc.)
 3) Abnormal condition of the together(heater, cooler)
 4) Wrong wiring or cutting of the other cables.
 ●Once LBA is ON due to broken sensor, it will not output. Although contact sensor again.
 In this case, turn off the power then turn on again.
 ●The output of LBA function is EV-1 and EV-2 output.
 ●If you use LBA function, SBA and alarm operation function cannot be used.

Sensor break alarm(SBA)
 This function causes the sub output to turn on when the sensor line is cut or open.
 It can easily check that the sensor line is cut or not by operating a buzzer using the relay contact.
 ●Set SBA mode at EV-1 or EV-2 mode in second setting group.
 ●All intend to use SBA function, LBA and alarm operation function cannot be used.

Error display
 If error is occurred while the controller is operating, it will be displayed as follow.
 ●"LLLL" is flickering when measured input temperature is lower than input range of the sensor.
 ●"HHHH" is flickering when measured input temperature is higher than input range of the sensor.
 ●"OPEN" is flickering when the input sensor is not connected or its wire is cut.

Connections

How to change the set value

1. In case of changing the set value at status of RUN, Press **▲** key.

2. 10-digit will flash at SV.



3. Press **▲** key, and then the flicker will be shifted step by step.



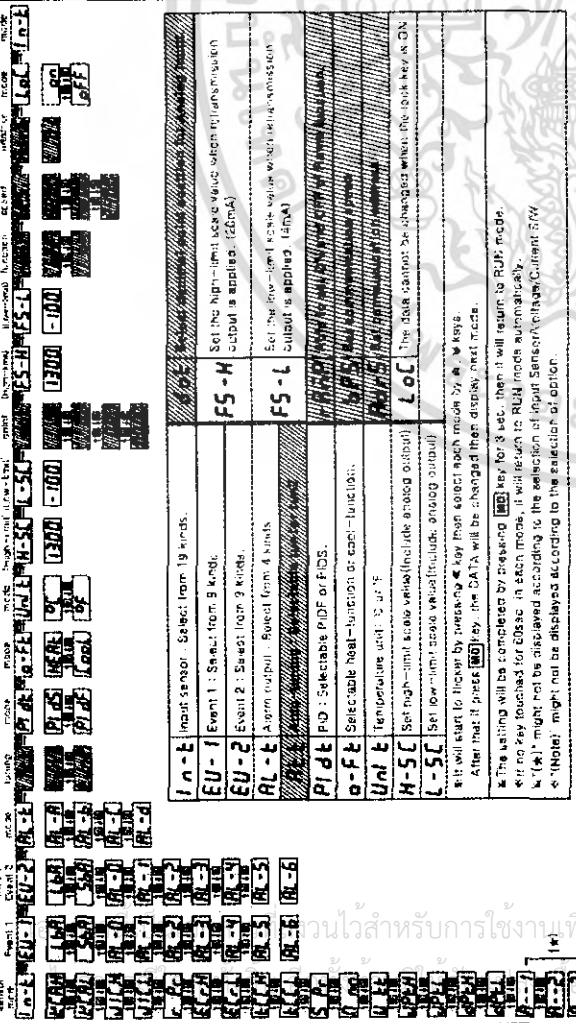
4. Press **▲** key at the flicker digit, and then change the set value.



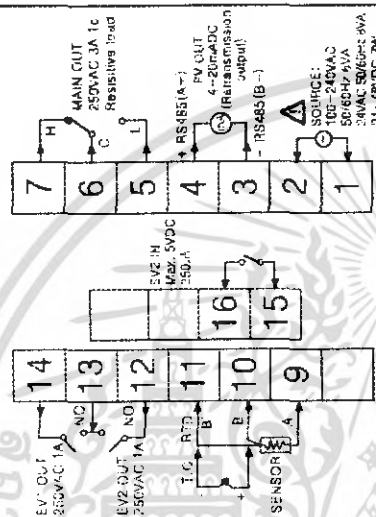
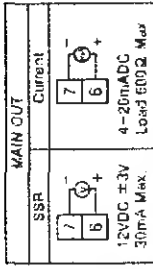
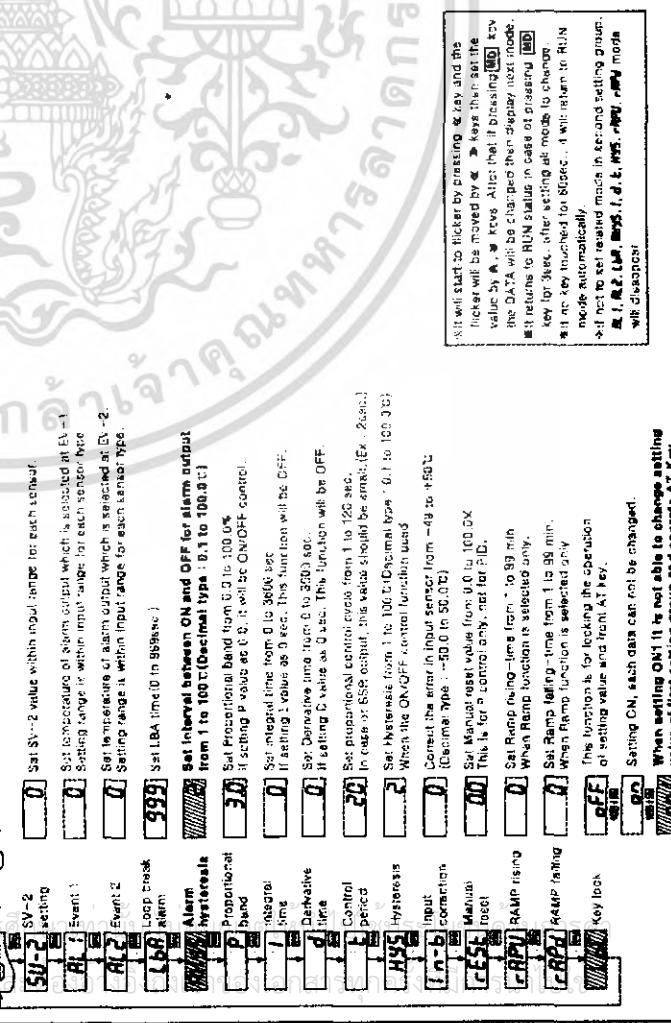
5. Press **▶** key when the setting is completed. It will stop flickering, then return to RUN mode.



Flow chart for second setting group

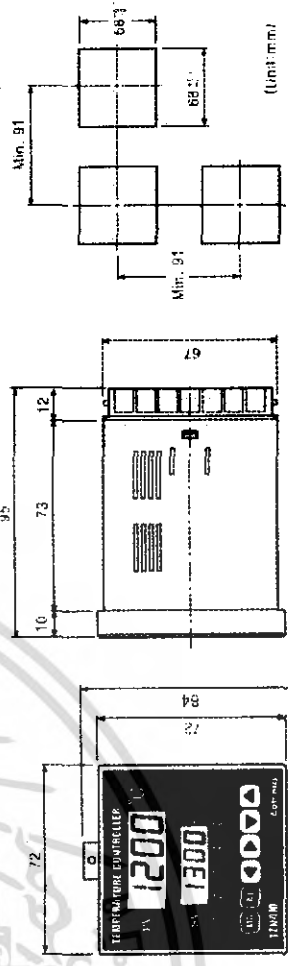


Flow chart for first setting group



Before connecting the power, please see the following information of power supply categories by all means.

Dimensions



2. Factory setting

Mode	Set value	Mode	Set value
1n-E	PIRH	PI dE	PI dS
EU-1	AL-1	o-FE	HEFE
EU-2	AL-2	UnLE	oC
AL-E	AL-A	H-SC	1300
ALF	Evu1	L-SC	-100
rAP	off	LoC	off

3. First setting group

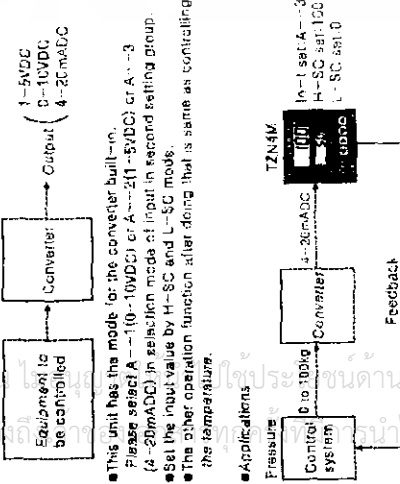
Mode	Set value	Mode	Set value
SU-2	0	E	20
AL1	10	HYS	2
AL2	10	1n-b	0
LbA	600	rESE	00
rhYS	2	rAPU	10
P	30	rAPd	10
I	0	LoC	off
d	0		

4. Applications

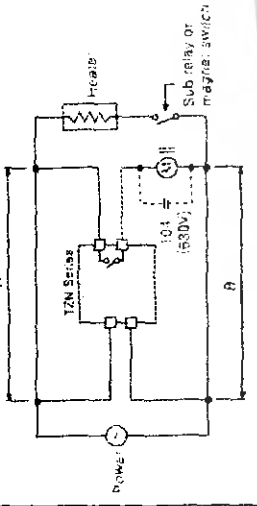
Food	Packaging machinery, Baking machinery
Plastic	Plastic machinery, Film making system, etc.
Industry	Electric furnace, Auto soldering machine, Drying machine, etc.
Textile	Buffy press, Slime Feaching

5. Analog input

In case of measuring or controlling humidity & pressure, flux, etc. it uses the proper converter which is converting the measuring value to 4-20mA/DC or 1-5VDC or 0-13VDC.



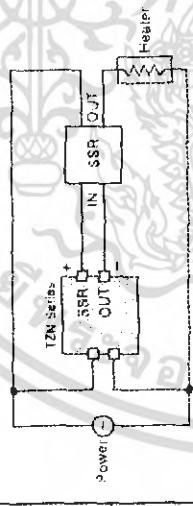
In case of using the converter mode, please select the near switching pin according to the chart in "Selection switch for input sensor/Voltage/Current".



Caution for wiring

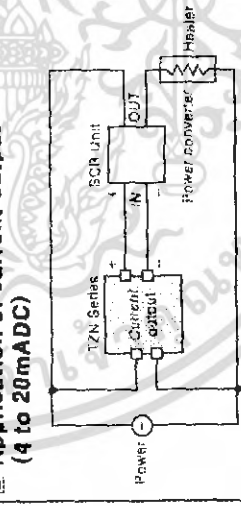
1. Keep power relay as far away as possible from TZN series. If wires length of A or B part is short, electro-motive force occurred from a cut of magnet switch & power relay may flow in power line of the unit. It may cause malfunction.
2. If wires length of A or B part is short, please connect a capacitor 104(500V) across call "C" of the power relay to protect electro-motive force.

6. Application of SSR output type



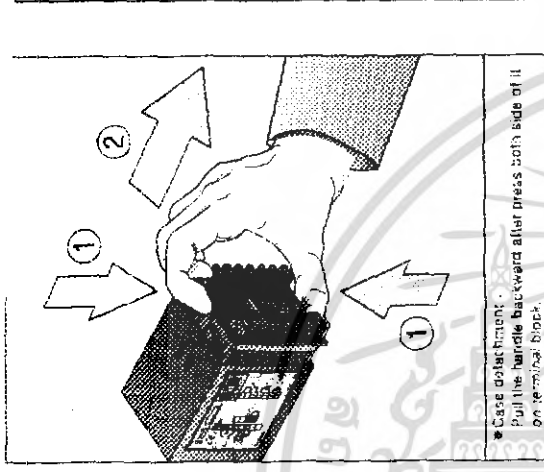
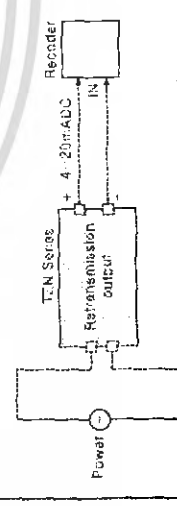
- Caution for using SSR**
1. SSR should be selected by the capacity of load, otherwise it may short-circuit and result in a fire.
 2. Indirect heating should be used with SSR for efficient working.

7. Application of current output (4 to 20mA/DC)



- It is important to select SCR unit after checking the capacity of the load.
- If the capacity is exceeded, it may cause a fire.

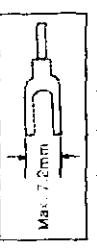
8. Application of Retransmission output (4 to 20mA/DC)



9. Simple "error" diagnosis

1. When it displays "Open" during operation. This is a warning that external sensor is cut off. Please turn off power and check the state of sensor. If sensor is not cut off, disconnect sensor line from terminal block and + - together. When you turn on power, it can check room temperature. If this unit cannot indicate room temperature, this unit itself is faulty. Please remove this unit from equipment and service or replace. (When input mode is sensor input mode (thermocouple) only, it can indicate room temperature.)
2. In case of not operating the output (the heater). Please check operation of the Out lamp located in front panel of the unit. If lamp does not operate, please check the parameter in all programmed mode. If lamp is operating, please check the output relay, operating voltage for SSR, current output after separating output line from the unit.
3. In case of indicating "Err" in display. This Error message is indicated in case of damaging inner chip program data by outer strong noise. In this case, please send the unit to our after service center after removing the unit from system. Noise protection is designed in this unit, but it does not stand up strong noise continuously. If bigger noise than specified (Max. 2kV) flows in the unit, it can be damaged.

1. Accuracy Max. 2000m
2. Pollution Degree 2
3. Installation Category II.
4. Please use the terminal (M3.5, Max. 7.2mm) when connect the AC power source.



5. Please use separated line from high voltage line or power line in order to avoid inductive noise.
6. Please install power switch or circuit-breaker in order to cut power supply off.
7. The switch or circuit-breaker should be installed near by use.
8. Do not use this product as Volt-meter or Amperes-meter. This is a temperature controller.
9. Be sure to use compensating wire when extending wire from controller to thermocouple, otherwise a temperature deviation will occur at the point where wires are connected to each other.
10. In case of using RTD sensor, Swires type must be used. If you need to extend the line, Swires must be used with the same resistance as the line.
11. It might cause the deviation of temperature if the resistance of line is different.
12. In case of making power line and input signal line close, line filler for noise protection should be installed at power line and input signal line should be shielded.
13. Keep away from the high frequency instruments. (High frequency welding machine & sewing machine, big capacitive SCR controller)
14. If you want to change the input sensor, reset switches (SW1, SW2) according to each input specification after power off. Turn on power and then set sensor mode by front keys at second flow chart.
15. In case of changing input sensor, after change it according to SW1, SW2 inside of the unit, select changed sensor with key operation when power on.
16. Do not connect power line to terminals No. 9, 10, 11, 12, 13, 14 (Terminal No. 9, 10, 11: Sensor connection, Terminal No. 12, 13, 14: EV-1, EV-2).

*** It may cause malfunction if above instructions are not followed.**

Main products

- CON-TEK
- TEMP
- TEMPERATURE CONTROLLER
- PANEL METER SPEECH
- PLUSE UNIT
- DISPLAY UNIT
- PROXIMITY SENSOR
- PHOTO-ELECTRIC SENSOR
- FIBER OPTIC SENSOR
- PRESSURE SENSOR
- ROTARY ENCODER
- CONTROL PANEL
- STEERING MOTOR & DRIVER
- 4-20mA/DC DRIVER
- LASER MARKING SYSTEM
- 100, No. YK3

Autonics
<http://www.autonics.com>
 TEL: 03-3441-1111
 FAX: 03-3441-1112
 1-240-0000
 1-240-0001
 1-240-0002
 1-240-0003
 1-240-0004
 1-240-0005
 1-240-0006
 1-240-0007
 1-240-0008
 1-240-0009
 1-240-0010
 1-240-0011
 1-240-0012
 1-240-0013
 1-240-0014
 1-240-0015
 1-240-0016
 1-240-0017
 1-240-0018
 1-240-0019
 1-240-0020
 1-240-0021
 1-240-0022
 1-240-0023
 1-240-0024
 1-240-0025
 1-240-0026
 1-240-0027
 1-240-0028
 1-240-0029
 1-240-0030
 1-240-0031
 1-240-0032
 1-240-0033
 1-240-0034
 1-240-0035
 1-240-0036
 1-240-0037
 1-240-0038
 1-240-0039
 1-240-0040
 1-240-0041
 1-240-0042
 1-240-0043
 1-240-0044
 1-240-0045
 1-240-0046
 1-240-0047
 1-240-0048
 1-240-0049
 1-240-0050
 1-240-0051
 1-240-0052
 1-240-0053
 1-240-0054
 1-240-0055
 1-240-0056
 1-240-0057
 1-240-0058
 1-240-0059
 1-240-0060
 1-240-0061
 1-240-0062
 1-240-0063
 1-240-0064
 1-240-0065
 1-240-0066
 1-240-0067
 1-240-0068
 1-240-0069
 1-240-0070
 1-240-0071
 1-240-0072
 1-240-0073
 1-240-0074
 1-240-0075
 1-240-0076
 1-240-0077
 1-240-0078
 1-240-0079
 1-240-0080
 1-240-0081
 1-240-0082
 1-240-0083
 1-240-0084
 1-240-0085
 1-240-0086
 1-240-0087
 1-240-0088
 1-240-0089
 1-240-0090
 1-240-0091
 1-240-0092
 1-240-0093
 1-240-0094
 1-240-0095
 1-240-0096
 1-240-0097
 1-240-0098
 1-240-0099
 1-240-0100

THERMAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF PURE METALS

This table gives the following properties for the metallic elements:

- T_m : Melting point in °C
 T_b : Normal boiling point in °C, at a pressure of 101.325 kPa (760 Torr)
 $\Delta_{fus}H$: Enthalpy of fusion at the melting point in J/g
 ρ_{25} : Density at 25°C in g/cm³
 α : Coefficient of linear expansion at 25°C in K⁻¹ (the quantity listed is $10^6 \times \alpha$)
 c_p : Specific heat capacity at constant pressure at 25°C in J/g K
 λ : Thermal conductivity at 27°C in W/cm K

REFERENCES

- Dinsdale, A. T., *CALPHAD*, 15, 317, 1991 (melting points, enthalpy of fusion).
- Touloukian, Y. S., *Thermophysical Properties of Matter*, Vol. 12, Thermal Expansion, IFI/Plenum, New York, 1975 (coefficient of expansion, density).
- Ho, C. Y., Powell, R. W., and Liley, P. E., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 3, Suppl. 1, 1974 (thermal conductivity).
- Cox, J. D., Wagman, D. D., and Medvedev, V. A., *CODATA Key Values for Thermodynamics*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1989 (heat capacity).
- Glushko, V. P., Ed., *Thermal Constants of Substances*, VINITI, Moscow, (enthalpy of fusion, heat capacity).
- Wagman, D. D., et al., *The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 11, Suppl. 2, 1982 (heat capacity).
- Chase, M. W., et al., *JANAF Thermochemical Tables*, 3rd ed., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 14, Suppl. 1, 1985 (heat capacity, enthalpy of fusion).
- Schneider, K. A., *Bull. Alloy Phase Diagrams*, 11, 216-224, 1990 (various properties of the rare earth metals).
- Hellwege, K. H., Ed., *Landolt Börnstein, Numerical Values and Functions in Physics, Chemistry, Astronomy, Geophysics, and Technology*, Vol. 2, Part 1, Mechanical-Thermal Properties of State, 1971 (density).

Metal (symbol)	Atomic weight	T_m °C	T_b °C	$\Delta_{fus}H$ J/g	ρ_{25} g/cm ³	$\alpha \times 10^6$ K ⁻¹	c_p J/g K	λ W/cm K
Actinium (Ac)		1051	3198		10			
Aluminum (Al)	26.98	660.32	2519	397	2.70	23.1	0.897	2.37
Antimony (Sb)	121.76	630.63	1587	163.2	6.68	11.0	0.207	0.243
Barium (Ba)	137.33	727	1897	52	3.62	20.6	0.204	0.184
Beryllium (Be)	9.01	1287	2471	877	1.85	11.3	1.825	2.00
Bismuth (Bi)	208.98	271.40	1564	54.1	9.79	13.4	0.122	0.0787
Cadmium (Cd)	112.41	321.07	767	55.1	8.69	30.8	0.232	0.968
Calcium (Ca)	40.08	842	1484	213	1.54	22.3	0.647	2.00
Cerium (Ce)	140.11	799	3424	39.0	8.16	5.2	0.192	0.113
Cesium (Cs)	132.91	28.44	671	15.8	1.93		0.242	0.359
Chromium (Cr)	52.00	1907	2671	404	7.15	4.9	0.449	0.937
Cobalt (Co)	58.93	1495	2927	275	8.86	13.0	0.421	1.00
Copper (Cu)	63.55	1084.62	2562	208.7	8.96	16.5	0.385	4.01
Dysprosium (Dy)	162.50	1411	2561	66.3	8.55	9.9	0.173	0.107
Erbium (Er)	167.26	1529	2862	119	9.07	12.2	0.168	0.145
Europium (Eu)	151.96	822	1596	60.6	5.24	35	0.182	0.14
Gadolinium (Gd)	157.25	1314	3264	62.4	7.90	9	0.236	0.105
Gallium (Ga)	69.72	29.76	2204	80.2	5.91		0.371	0.406
Gold (Au)	196.97	1064.18	2856	63.7	19.3	14.2	0.129	3.17
Hafnium (Hf)	178.49	2233	4603	152.4	13.3	5.9	0.144	0.230
Holmium (Ho)	164.93	1472	2694	71.3	8.80	11.2	0.165	0.162
Indium (In)	114.82	156.60	2072	28.6	7.31	32.1	0.233	0.816
Iridium (Ir)	192.22	2446	4428	213.9	22.5	6.4	0.131	1.47
Iron (Fe)	55.85	1538	2861	247.3	7.87	11.8	0.449	0.802
Lanthanum (La)	138.91	920	3455	44.6	6.15	12.1	0.195	0.134
Lead (Pb)	207.20	327.46	1749	23.0	11.3	28.9	0.129	0.353
Lithium (Li)	6.94	180.5	1342	432	0.534	46	3.582	0.847
Lutetium (Lu)	174.97	1663	3393	106.6	9.84	9.9	0.154	0.164
Magnesium (Mg)	24.30	650	1090	349	1.74	24.8	1.023	1.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF PURE METALS (continued)

Metal (symbol)	Atomic weight	T_m °C	T_b °C	$\Delta_{fus} H$ J/g	ρ_{25} g/cm ³	$\alpha \times 10^4$ K ⁻¹	c_p J/g K	λ W/cm K
Manganese (Mn)	54.94	1246	2061	235.0	7.3	21.7	0.479	0.0782
Mercury (Hg)	200.59	-38.83	356.73	11.4	13.5336		0.140	0.0834
Molybdenum (Mo)	95.94	2623	4639	390.7	10.2	4.8	0.251	1.38
Neodymium (Nd)	144.24	1016	3066	49.5	7.01	9.6	0.190	0.165
Neptunium (Np)		644						0.063
Nickel (Ni)	58.69	1455	2913	298	8.90	13.4	0.444	0.907
Niobium (Nb)	92.91	2477	4744	323	8.57	7.3	0.265	0.537
Osmium (Os)	190.23	3033	5012	304.2	22.5	5.1	0.130	0.876
Palladium (Pd)	106.42	1554.9	2963	157.3	12.0	11.8	0.246	0.718
Platinum (Pt)	195.08	1768.4	3825	113.6	21.5	8.8	0.133	0.716
Plutonium (Pu)		640	3228		19.7	46.7		0.0674
Polonium (Po)		254			9			0.20
Potassium (K)	39.10	63.38	759	59.3	0.89		0.757	1.024
Praseodymium (Pr)	140.91	931	3510	48.9	6.77	6.7	0.193	0.125
Promethium (Pm)		1042	3000		7.26	11		0.15
Protactinium (Pa)	231.04	1572		53.4	15.4			
Radium (Ra)		700			5			
Rhenium (Re)	186.21	3186	5596	324.5	20.8	6.2	0.137	0.479
Rhodium (Rh)	102.91	1964	3695	258.4	12.4	8.2	0.243	1.50
Rubidium (Rb)	85.47	39.31	688	25.6	1.53		0.363	0.582
Ruthenium (Ru)	101.07	2334	4150	381.8	12.1	6.4	0.238	1.17
Samarium (Sm)	150.36	1072	1790	57.3	7.52	12.7	0.197	0.133
Scandium (Sc)	44.96	1541	2830	314	2.99	10.2	0.568	0.158
Silver (Ag)	107.87	961.78	2162	104.8	10.5	18.9	0.235	4.29
Sodium (Na)	22.99	97.72	883	113	0.97	71	1.228	1.41
Strontium (Sr)	87.62	777	1382	84.8	2.64	22.5	0.301	0.353
Tantalum (Ta)	180.95	3017	5458	202.1	16.4	6.3	0.140	0.575
Technetium (Tc)		2157	4265		11			0.506
Terbium (Tb)	158.93	1359	3221	63.9	8.23	10.3	0.182	0.111
Thallium (Tl)	204.38	304	1473	20.3	11.8	29.9	0.129	0.461
Thorium (Th)	232.04	1750	4788	39.5	11.7	11.0	0.113	0.540
Thulium (Tm)	168.93	1545	1946	99.7	9.32	13.3	0.160	0.169
Tin (Sn)	118.71	231.93	2602	39.2	7.28	22.0	0.228	0.666
Titanium (Ti)	47.88	1668	3287	295	4.5	8.6	0.523	0.219
Tungsten (W)	183.84	3422	5555	284.5	19.3	4.5	0.132	1.74
Uranium (U)	238.03	1135	4131	38.4	19.1	13.9	0.116	0.276
Vanadium (V)	50.94	1910	3407	422	6.0	8.4	0.489	0.307
Ytterbium (Yb)	173.04	824	1194	44.3	6.90	26.3	0.155	0.385
Yttrium (Y)	88.91	1526	3336	128.2	4.47	10.6	0.298	0.172
Zinc (Zn)	65.39	419.53	907	112	7.14	30.2	0.388	1.16
Zirconium (Zr)	91.22	1855	4409	230	6.52	5.7	0.278	0.227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้