

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



การสร้างเตา 2 ไชนสำหรับศึกษาการปลูกผลึกอินเดียมเยอรมันเนียมออกไซด์

ร/พ.  
ก855ก  
2537

นายเกียรติศักดิ์ โพธิ์ดี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน.เดือน.ปี.....

b.12519704

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

Two Zone Furnace for Crystal Growth of Indium Germanium Oxide

Mr. Kiattisak Phodee

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

Department of Applied Physics

Faculty of Science

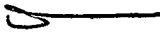
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1994

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างเตา 2 โชนสำหรับศึกษาการปลูกผลึกอินเดียมเยอร์มันเนียมออกไซด์  
โดย นายเกียรติศักดิ์ โพธิ์ดี  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ฐิตินัย แก้วแดง  
ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ  
อ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ  
ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

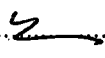
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

๒๕๖๓ 

(ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์)

หัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

๕๖๓ 

(ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)

ประธานกรรมการ



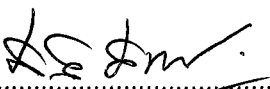
(ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ)

กรรมการ

๕๖๓ 

(อ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ)

กรรมการ

๕๕๘ 

(ผศ.ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างเตา 2 โซนสำหรับการศึกษาการปลูกผลึกอินเดียมเยอร์มันเนียมออกไซด์
โดย	นายเกียรติศักดิ์ โพธิ์ดี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ อ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2537

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาเพื่อสร้างเตา 2 โซน สำหรับศึกษาการปลูกผลึกอินเดียมเยอร์มันเนียม-ออกไซด์ ( IGO ) ในระบบเตา 2 โซนนี้อาศัยหลักการแพร่กระจายความร้อนของขดลวดเหนี่ยวนำจำนวน 2 ชุดที่เกิดขึ้นในสภาวะสมดุลย์ทางความร้อน เตาโซนแรกจะตั้งอุณหภูมิสูงไว้ที่ 1200°C และเตาโซนที่สองมีอุณหภูมิประมาณ 850°C ระบบเตา 2 โซนที่สร้างขึ้นเป็นระบบเตาในแนวตั้ง เพื่อทดสอบการปลูกผลึกของ IGO โดยวิธีการหลอมฟลักซ์ ( flux growth method ) วิธีนี้เป็นการเลื่อนสารจากโซนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังโซนที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทางภายในเตา ผลึกที่ปลูกได้จะมีขนาดเล็กมาก ใส และมีลักษณะเป็นเส้น ที่เรียกว่า เดนไดรท์ ( dendrite )

Spacial Prolect Title      Two-Zone Furnace for Crystal Growth of Indium Germanium Oxide  
Name                              Mr. Kiattisak Phodee  
Spacial Project Advisor      Dr. Thitinai Gaewdang  
    Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat  
    Aj. Ngamnit Wongjareon  
    Dr. Tiparatana Wongcharoen  
Department                      Appiled Physics  
Acadamic Year                  1994

#### Abstract

This spacial project is studying the method of building a two-zone furnace for IGO crystal growth. The furnace is a vertical type in thermal equilibruim by the radiation of the kanthal-alloy wires. The studying of crystal growth in done due to the flux growth method. This method is referredto moving the sample from high temperature to low temperature by using temperature gradient of the furnace. The appeared single crystal is very small and has dendrite crystal form.

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและอุปการะในทุก ๆ ด้านของบิดา-มารดา และญาติพี่น้อง ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ และขอขอบคุณ

ท่านอาจารย์ฐิตินัย แก้วแดง , ท่านอาจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ , ท่านอาจารย์ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติและท่านอาจารย์พิพัทธ์น วงษ์เจริญ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาคอยแนะนำให้คำปรึกษาชี้แนวทางที่มีประโยชน์ความรู้และคอยเป็นที่ปรึกษาในการทำงานอย่างใกล้ชิด นอกจากนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์อารีย์ วิเชียรฉายและท่านอาจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ที่ได้เอื้อเพื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานในครั้งนี้ และอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้เขียนตลอดระยะเวลา 4 ปี

คุณประเสริฐ เขียวพิมพา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ภาคโทรมิเตอร์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและคอยแนะนำการใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ภาคโทรมิเตอร์

คุณธวัชชัย ชาวประเสริฐ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ซ่อมสร้างเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำงานครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ ๆ , เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจในการทำงานให้ ณ ที่นี้ด้วย

นายเกียรติศักดิ์ โพธิ์ดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
วิธีการดำเนินงาน	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 การควบคุมคุณภาพ	3
2.1 ระบบควบคุม	3
2.1.1 คำจำกัดความต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบควบคุม	3
2.1.2 การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับและการควบคุมแบบ ไม่มีการป้อนกลับ	4
2.1.2.1 กระบวนการการควบคุมแบบปิด	6
2.1.2.2 วิธีการเลือกใช้การควบคุม	14
2.1.2.3 วิธีการเลือกตัวควบคุม	15
2.2 ตัวควบคุมแบบง่าย ๆ ในการควบคุมคุณภาพ	16
2.3 หัววัดคุณภาพ	16
บทที่ 3 โครงสร้างผลึก	18
3.1 โครงสร้างผลึกแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก	21
3.2 โครงสร้างผลึกแบบนิกซ์ไบท์	21
3.3 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์	24
บทที่ 4 การปลูกผลึก	25
4.1 วิธีของโซคราลสกี	25
4.2 วิธีโซรีเฟนิงค์	27

4.3	วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์	29
4.4	วิธีการพาโอระเหยสารเคมี	31
4.4.1	ส่วนเกิดปฏิกิริยา	31
4.4.2	ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซ	34
4.4.3	ส่วนควบคุมเวลาและขั้นตอนต่าง ๆ	34
4.4.4	แหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับชั้นสแตท	34
4.4.5	ระบบควบคุมก๊าซ	34
4.5	การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์	35
4.5.1	การเลือกฟลักซ์	35
4.5.2	สิ่งที่คำนึงถึงในการปฏิบัติ	36
4.5.3	การลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ	37
4.5.4	การปลูกผลึกโดยใช้ผลึกเป็นตัวล่อ	38
บทที่ 5	หลักในการออกแบบเตา 2 โชน	40
5.1	ส่วนสำคัญของเตาที่ควรคำนึงถึง	40
5.1.1	อุณหภูมิของเตา	40
5.1.2	ขดลวดนำความร้อน	41
5.1.3	ผนังเตา	41
5.1.4	ขนาดเตา	41
5.1.5	การขยายตัวของขดลวด	42
5.1.6	รูปแบบของการพันขดลวด	42
5.1.7	กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตา	43
5.1.8	กล่องใส่เตาและฝาปิดทั้งสองด้าน	43
5.2	ระบบควบคุม	43
5.3	เทอร์มิคัปเปิล	44
5.4	ภาชนะสำหรับใส่สาร	44
บทที่ 6	การทดลอง	45
6.1	เตา 2 โชน	45
6.1.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตา	45
6.1.2	ขั้นตอนในการสร้างเตา	45

6.1.2.1	ท่อเตา	45
6.1.2.2	ส่วนประกอบอื่น ๆ	47
6.2	แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ	48
6.3	การเลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขดลวด	48
6.4	ระบบมอเตอร์	49
6.5	การเตรียมสาร	49
บทที่ 7	ผลการทดลอง	51
7.1	ท่อเตา	51
7.2	กล่องเตา	52
	ลักษณะของโปรไฟล์เตาและการทดสอบการปลุกผลึก	54
บทที่ 8	สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
	เอกสารอ้างอิง	60
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก คู่มือการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	
	ภาคผนวก ข คุณสมบัติของเซรามิกไฟเบอร์	
	ภาคผนวก ค ตารางการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด S และชนิด K	
	ประวัติผู้เขียน	

**สารบัญตาราง**

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงลักษณะรูปแบบทั้ง 14 ของแลททิสของบราวเอร์สใน 3 มิติ	19
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรายละเอียดแลททิสของบราวเอร์ส	20
ตารางที่ 4.1 รายชื่อฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะกับการปลูกผลึกสารแต่ละชนิด	36

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระบบกายภาพใด ๆ	3
รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด	4
รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด	5
รูปที่ 2.4 แสดงวงจรรีออนกลับอย่างง่าย	5
รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพของกระบวนการการควบคุมแบบปิด	6
รูปที่ 2.6 แสดงกราฟระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด	7
รูปที่ 2.7 แสดงกราฟของระบบควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล	9
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับค่าอัตราขยาย และค่าคลาดเคลื่อน	10
รูปที่ 2.9 แสดงกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเป็นศูนย์ของโหนดเดอริเวทีฟ	11
รูปที่ 2.10 (ก) แสดงถึงแผนภาพของบล็อกของตัวควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล- อินทิกรัล (ข) สัญญาณความคลาดเคลื่อน $e$ เป็นสัญญาณแบบขั้น (ค) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล-อินทิกรัล	12
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนกับเอาต์พุตของการควบคุม แบบพรีอบโพซันนอล-เดอริเวทีฟ	13
รูปที่ 2.12 แสดงภาพเอาต์พุตของการควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล-อินทิกรัล และเดอริเวทีฟ	14
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล	16
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ	17
รูปที่ 3.1 แสดงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกแบบซิมเบิลคิวบิกกับโครงสร้าง แบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก	21
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างบอดีเซ็นเตอร์คิวบิกแบบบิกไบท์	22
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของ $\text{CaF}_2$ ที่มีการขาดหายไปของอะตอม	23
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์	24
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีโซคราลสกี	25

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของแท่งผลึกเดี่ยวที่สร้างขึ้นได้จากวิธีโซโคราลสกี	26
รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีโซนรีเฟอว์นิงค์	28
รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีฟลอยต์ตั้งโซน	28
รูปที่ 4.5 (ก)แสดงเตา 2 โซนในแนวตั้งเพื่อเตรียมผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ (ข)แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ	29
รูปที่ 4.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดียว	30
รูปที่ 4.7 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบแวนอน	32
รูปที่ 4.8 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบแนวตั้ง	32
รูปที่ 4.9 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบทรงกระบอกหรือทรงตั้ง	33
รูปที่ 4.10 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม	33
รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการที่จะได้ผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว : ABC เป็นวิธีการลด อุณหภูมิอย่างช้า ๆ , AD เป็นวิธีที่ทำให้ฟลักซ์หายไป และ EF เป็นวิธีใช้ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ	37
รูปที่ 4.12 เทคนิคการพลิกเบ้าหลอม	39
รูปที่ 4.13 เทคนิคการเอียงเบ้าหลอม	39
รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา	40
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะของเตาและขนาดเตา	41
รูปที่ 5.3 แสดงรูปแบบของการพันขดลวด	42
รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะการพันขดลวด	46
รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะและขนาดของแผ่นอุณหภูมินิยม	47
รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะของฝาเตา	47
รูปที่ 6.4 แสดงการต่อแหล่งจ่ายพลังงานและระบบควบคุมอุณหภูมิกับเตา	48
รูปที่ 6.5 แสดงวงจรรีเลย์	49
รูปที่ 7.1 แสดงท่อเตา	51
รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะภายในกล่องเตา	52
รูปที่ 7.3 แสดงการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ กับเตา	53
รูปที่ 7.4 แสดงลักษณะของอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ของเตาด้าน $8.2 \Omega$	54
รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะของอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ของเตาด้าน $7.8 \Omega$	54

รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะของโปรไฟล์เตา 2 โซนที่สร้างขึ้น	55
รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะของน้ำหลอมหลังจากนำออกจากเตา	57

## บทที่ 1

### บทนำ

ในกระบวนการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำของสารชนิดต่าง ๆ มีส่วนสำคัญที่ต้องคำนึงหลายประการ เช่น การเลือกวิธีการปลูกผลึก ระบบควบคุมต่าง ๆ เตาให้ความร้อน และสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เป็นต้น

การเลือกวิธีการปลูกผลึก นับว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งเพราะในการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำจะต้องวิธีการปลูกผลึกให้เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำในแต่ละชนิด เนื่องจากวิธีการปลูกผลึกแบบหนึ่งอาจจะผลได้เหมาะสมกว่าอีกแบบหนึ่งในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน วิธีการปลูกผลึกที่นิยมใช้กันมากมีหลายแบบ เช่น การปลูกผลึกแบบไซคราลสกี การปลูกผลึกแบบไซนรีฟนิ่งค์ การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน การปลูกผลึกโดยวิธีการพาไอระเหยเคมี และการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เป็นต้น<sup>[1]</sup> ซึ่งในโครงการพิเศษนี้เลือกใช้การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เนื่องจากการปลูกผลึกโดยวิธีนี้ใช้ได้เหมาะสมกับระบบของเตา 2 โซนที่ได้สร้างขึ้น ส่วนทางด้านเตาโซนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าต้องเพิ่มอุณหภูมิเตาให้ได้ค่าอุณหภูมิสูงตามต้องการและต้องรักษา ระบบเตา 2 โซนให้อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนโดยที่บริเวณตำแหน่งโซนที่ใช้งานยังคงมีอุณหภูมิตามต้องการ ระบบให้ความร้อนของเตามีหลายประเภท เช่น การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟ การให้ความร้อนด้วยความต้านทานทางไฟฟ้า การให้ความร้อนด้วยความถี่สูง การให้ความร้อนด้วยลำอิเล็กตรอนและการให้ความร้อนด้วยก๊าซที่ร้อนจัด ในระบบให้ความร้อนที่นิยมใช้กันมากคือการให้ความร้อนด้วยความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งการให้ความร้อนแบบนี้สามารถควบคุมได้ง่าย สามารถสร้างขึ้นได้ง่ายและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

โครงการพิเศษนี้ได้ออกแบบสร้างระบบเตา 2 โซนขึ้น เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิด IGO ( อินเดียมเยอร์มันเนียมออกไซด์ ) โดยเลือกวิธีการปลูกผลึกโดยใช้ฟลักซ์ ระบบเตา 2 โซนที่สร้างขึ้นนี้เป็นการสร้างที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 ช่วงคือ 850 °C กับ 1200 °C ที่อยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนภายในเตาเดียวกัน

## **วัตถุประสงค์**

1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างเตาปลุกผลึกแบบ 2 โซน และการประกอบระบบควบคุมอุณหภูมิ
2. เพื่อทดสอบการปลุกผลึกเดี่ยว IGO โดยวิธีการปลุกผลึกแบบหลอมฟลักซ์
3. เพื่อนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงเทคนิคการปลุกผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ

## **วิธีการดำเนินงาน**

1. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการสร้างเตาและกล่องใส่เตา
2. สร้างเตา 2 โซน
3. ประกอบส่วนควบคุมอุณหภูมิ
4. สร้างระบบที่ใช้ในการเลื่อนเข้าหลอมโดยใช้มอเตอร์
5. สร้างกล่องใส่เตา
6. นำส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน
7. ทดสอบเตาที่สร้างขึ้น โดยทำการปลุกผลึกเดี่ยว IGO โดยวิธีการหลอมฟลักซ์
8. สรุป และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

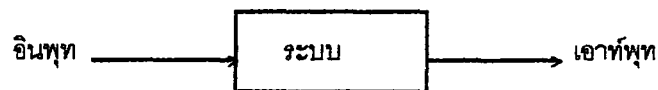
## **ประโยชน์ที่ได้รับ**

ได้เรียนรู้และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการสร้างเตาปลุกผลึกแบบ 2 โซน และเป็นจุดเริ่มต้นให้แก่ผู้สนใจทางสารกึ่งตัวนำได้นำเตาปลุกผลึกนี้มาใช้พัฒนาในการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และยังทำให้ได้เรียนรู้การนำเสนอผลงานที่ได้ทำการศึกษาและสร้างขึ้นในรูปแบบของการนำเสนอด้วยเอกสารและการอภิปราย

## บทที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิ

### 2.1 ระบบควบคุม [15]

การควบคุมระบบกายภาพใด ๆ คือการกระทำให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่ได้ผลออกมาตามต้องการตามการกระตุ้นที่ป้อนให้กับระบบควบคุม เช่น การควบคุมขดลวดความร้อน จะป้อนสิ่งกระตุ้นคือ กระแส เข้าไปเพื่อให้ได้ความร้อนเป็นผลออกมา ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงระบบกายภาพใด ๆ

#### 2.1.1 คำจำกัดความต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบควบคุม

**อินพุท (input)** หมายถึง การกระตุ้นที่ป้อนให้กับระบบควบคุม โดยปกติจะอยู่ในรูปของแหล่งพลังงานเพื่อที่จะให้ได้ผลจากการตอบสนองของระบบ

**เอาต์พุท (output)** หมายถึง ผลของการตอบสนองที่ออกมาจากระบบควบคุม

**ระบบ (system)** หมายถึง การรวบรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะทำงานร่วมกันเข้าด้วยกันเพื่อทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง

**ระบบที่ถูกควบคุม (plant)** หมายถึง วัตถุทางกายภาพที่ถูกควบคุม

**ระบบควบคุมป้อนกลับ (feedback control system)** หมายถึงระบบควบคุมที่พยายามรักษาให้อาต์พุทมีค่าตามที่ต้องการโดยนำเอาสัญญาณเอาต์พุทป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุท การป้อนกลับนี้จะเป็นการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) เพื่อให้สัญญาณผลต่างระหว่างอินพุทกับเอาต์พุท ไปใช้ในการควบคุม

**ขบวนการ (process)** หมายถึง ขบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันในลักษณะที่ควบคุมเป็นขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งผลที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรเกิดขึ้น เช่น อุณหภูมิ , ความดัน

**คอนโทรลเลอร์ (controller)** หมายถึง ส่วนของระบบที่กำเนิดสัญญาณเพื่อที่ป้อนสัญญาณเข้าสู่ระบบที่ถูกควบคุม

**ส่วนป้อนกลับ (feedback element)** หมายถึง ส่วนของระบบที่ให้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณป้อนกลับและตัวควบคุมเอาต์พุต

วิธีควบคุมระบบ อาจแบ่งแบบพื้นฐานได้ 3 วิธี

- 1) **แบบธรรมชาติ** คือ การรอให้เกิดตามขั้นตอนของธรรมชาติ โดยขึ้นกับเวลาและสภาพแวดล้อม
- 2) **แบบมนุษย์ควบคุม** คือ การที่มนุษย์ไปควบคุมการทำงานของระบบ ตัดสินใจในการกระตุ้นระบบมนุษย์อาจเข้าไปกำหนดค่าบางค่าเพื่อให้ได้ผลตามต้องการ นอกจากนั้นยังอาจประดิษฐ์อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้งานนั้นอีกด้วย
- 3) **แบบอัตโนมัติ** คือ ระบบนั้นจะดำเนินการไปตามการควบคุมที่กำหนดเอาไว้โดยมนุษย์ไม่ต้องเข้าไปยุ่งเกี่ยวในการตัดสินใจ

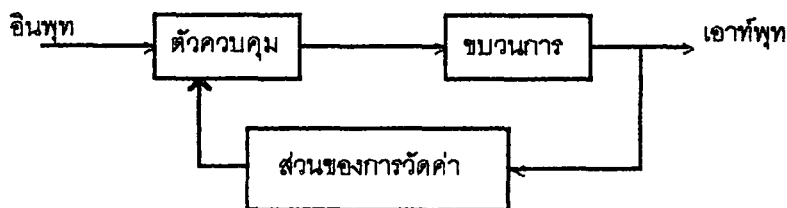
### 2.1.2 การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ (open loop control) และ การควบคุมแบบมีการป้อนกลับ (close loop control)

**การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับหรือระบบควบคุมแบบวงจรเปิด** ระบบนี้จะไม่มีการเปรียบเทียบสภาพเอาต์พุตกับอินพุต หรือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบจะไม่มีผลต่อการควบคุม ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด

**การควบคุมแบบมีการป้อนกลับหรือระบบควบคุมแบบวงจรปิด** ระบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า feedback control system เป็นระบบควบคุมที่สัญญาณเอาต์พุตมีผลโดยตรงต่อการควบคุม สัญญาณค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของระบบ หรือ สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (actuating error signal) จะถูกป้อนให้กับตัวควบคุมเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง ทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการที่สุด สัญญาณป้อนกลับนี้อาจจะเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชัน หรืออนุพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตของระบบก็ได้ ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด

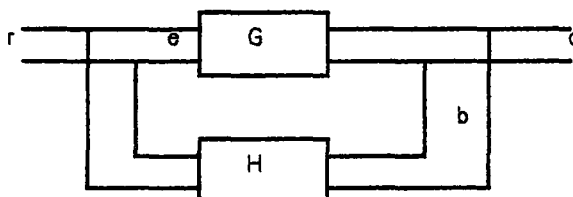
ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมแบบเปิดและระบบควบคุมแบบปิด : อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเปิดต้องมีความถูกต้องสูง จึงมีราคาแพง ไม่มีปัญหาด้านเสถียรภาพมากนักเพราะเอาต์พุทที่ได้เป็นผลเนื่องมาจากอินพุทโดยตรง แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบปิดไม่จำเป็นต้องมีความถูกต้องดีมากนัก จะใช้การปรับค่าให้เข้าใกล้ค่าที่ต้องการมากที่สุด จึงมีปัญหาด้านเสถียรภาพ เพราะมีสัญญาณมาเปรียบเทียบกับอินพุท เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งก็เป็นเหมือนอินพุทอีกตัวหนึ่งที่มีค่าไม่แน่นอน อาจทำให้เกิดการออสซิลเลตได้

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุมที่ทราบอินพุทของระบบ จะเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาที่ไม่มีสัญญาณรบกวน การควบคุมระบบนี้จะใช้การควบคุมแบบเปิด สำหรับการควบคุมแบบปิด จะใช้เมื่อไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของอินพุทตามเวลา หรือมีสัญญาณรบกวน และในบางกรณี ก็จะต้องใช้ทั้งสองวิธีรวมกันไป เพื่อที่จะได้ความแม่นยำสูงสุด

### ผลของการป้อนกลับ

การป้อนกลับจะมีบทบาทในการควบคุมประเภทระบบปิด จากที่กล่าวมาโดยอาศัยทำให้เอาต์พุทและเอาต์พุทมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

พิจารณาระบบป้อนกลับอย่างง่าย ๆ ดังรูป 2.4 โดย  $r$  เป็นสัญญาณอินพุท ,  $c$  เป็นสัญญาณเอาต์พุท ,  $e$  เป็นสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน ,  $b$  เป็นสัญญาณที่ป้อนกลับ ส่วน  $G$  และ  $H$  เป็นเกน ซึ่งมีค่าคงที่ในวงจรนั้น ๆ



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรป้อนกลับอย่างง่าย

จะได้สมการความสัมพันธ์เอาต์พุตต่ออินพุตดังนี้

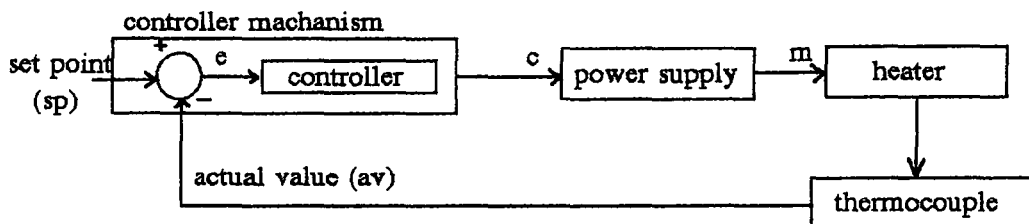
$$c/r = G / (1+GH) \quad (2.1)$$

จะเห็นว่าการป้อนกลับนั้นทำให้อัตราขยายของระบบ (G) และส่วนป้อนกลับ (H) มีการป้อนกลับไปด้วยค่า  $1+GH$  โดยปกติผลของการป้อนกลับก็ทำให้ค่าอัตราขยายของระบบลดลงหรือเพิ่มขึ้น ถ้าค่า G และ H เป็นฟังก์ชันของความถี่ ดังนั้นขนาด  $1+GH$  อาจมีค่ามากกว่า 1 ในย่านความถี่หนึ่ง ดังนั้นการป้อนกลับอาจทำให้อัตราขยายของระบบลดลงในย่านความถี่อีกย่านหนึ่ง

จากสมการที่ 2.1 ถ้า  $GH = 1$  เอาต์พุตของระบบจะมีค่านันต์ ไม่ว่าอินพุตจะมีค่าใด ๆ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การป้อนกลับจะทำให้ระบบที่มีเสถียรภาพกลายเป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพได้ จึงต้องมีการเลือกตำแหน่งที่ใช้งานให้เหมาะสมต่อไป

### 2.1.2.1 กระบวนการการควบคุมแบบปิด (Process control loop)

ในการอธิบายกระบวนการการควบคุมแบบปิด จะมีส่วนของการป้อนกลับซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรที่กำลังควบคุม  $V_0$  จากรูป 2.5 จะแสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบปิด สำหรับกรณีที่มีการควบคุมตัวแปรเดียว



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพของกระบวนการการควบคุมแบบปิด

กลไกของตัวควบคุม (controller mechanism) จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ "ตัวตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อน" ทำหน้าที่ตรวจจับความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุต คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ตั้งไว้ และอีกส่วนหนึ่งก็คือ "ตัวควบคุม" เป็นส่วนที่ตัดสินใจที่จะเปลี่ยนแปลง ในการควบคุมค่าความคลาดเคลื่อน ส่วนนี้จะเปรียบเสมือนสมองของระบบ ค่าที่ออกมาจากส่วนนี้จะเรียกว่า สัญญาณป้อนกลับ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าได้ตามตัวแปรที่กำลังควบคุมในกระบวนการ ไปยังตัวป้อนสัญญาณต่าง ๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟ

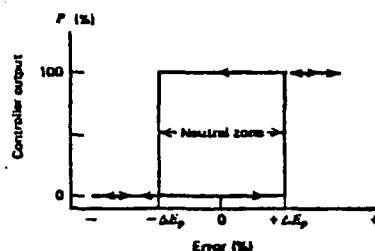
การวัดค่า (measurement) ในกรณีนี้ใช้เทอร์มิสทอร์เป็นตัววัดอุณหภูมิที่ใช้ภายในเตา แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อน

### โหมดการทำงานของการควบคุมแบบปิด

การทำงานของการควบคุมแบบปิดมีหลายลักษณะ ดังนี้ คือ

1. แบบเปิด-ปิด (On-Off mode)
2. แบบปรับสัดส่วน (Proportional mode , P)
3. แบบอินทิกรัล (Integral mode , I)
4. แบบอนุพันธ์ (Derivative , D)
5. แบบปรับสัดส่วน-อินทิกรัล (Proportional-Integral mode , PI)
6. แบบปรับสัดส่วน-อนุพันธ์ (Proportional-Derivative mode , PD)
7. แบบปรับสัดส่วน-อินทิกรัล-อนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative mode , PID)

1.การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off mode) การควบคุมในลักษณะนี้บางทีเรียกว่า โหมดสองตำแหน่ง เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของกระบวนการการควบคุมทั้งหมด เอาท์พุทหรือโหลดของอุปกรณ์จะเปิดหรือปิดโดยอัตโนมัติโดยไม่มีระดับกลาง ดังรูป 2.6 การควบคุมในระบบนี้เป็นที่นิยมและมีราคาถูก



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด

การทำงานของตัวควบคุมแบบเปิด-ปิดถูกกำหนดโดยการปรับตำแหน่งของค่า set point ดังนั้น เออร์รอร์จึงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องหรือสั้นขึ้น-ลงระหว่างค่า set point

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤติ ค่าเออร์รอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0% ไปสู่ 100% และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง เออร์รอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 100% ไป 0% ดังนั้นแถบตาย ( deadband ) รอบ ๆ ศูนย์จะเป็นส่วนที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงที่เออร์รอร์ ตัวอย่างทั่วไปที่พบได้แก่ เครื่องปรับอากาศ

ตัวแปรที่ควบคุมจะมีการสั้นในแต่ละระบบด้วยค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับความกว้างของแถบตาย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c &= 0 \% & e < -E \\ &= 100 \% & e > -E \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ E เท่ากับครึ่งหนึ่งของแถบตาย

ในการใช้งานการควบคุมแบบเปิด-ปิด จะมีโอเวอร์ชูท และ อันเดอร์ชูทที่จุดสวิง

2. การควบคุมแบบปรับโพรชันนอล (Proportional mode P) เออร์รอร์ของระบบควบคุมต้องการค่าที่แน่นอนในการควบคุมพลังงานที่จ่ายเข้าไป เพื่อให้เป็นสัดส่วนปรับโพรชันนอลกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูง ระบบปรับกลับก็จะให้ค่ามาก ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย ระบบปรับกลับก็จะให้ค่าน้อย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง จะได้ดังสมการที่ 2.3

$$C_p = K_p e_p + c_o \quad (2.3)$$

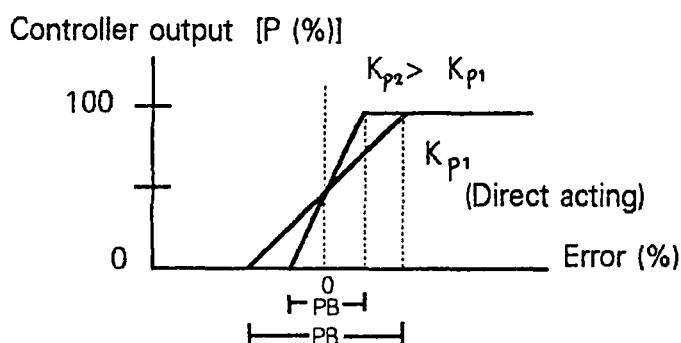
โดย  $C_p$  = เออร์รอร์ของระบบควบคุม

$K_p$  = อัตราขยายปรับโพรชันนอล

$e_p$  = ค่าความผิดพลาด

$c_o$  = เออร์รอร์ที่ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

จากสมการจะได้กราฟดังรูป 2.7 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอัตราขยาย 2 เท่า คือ  $K_{p1}$  กับอัตราขยายปกติ  $K_{p2}$  โดยที่ 100% หมายถึงค่าอิมิตัวของค่าความคลาดเคลื่อน คือ จุดที่ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลให้มีการเพิ่มค่าเออร์รอร์ และช่วงระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนที่ให้เออร์รอร์ระหว่าง 0% และ 100% เรียกว่า "ช่วงปรับโพรชันนอล (proportional band)" ที่ค่าอัตราขยายของระบบมีค่าสูง ช่วงแบบนี้ก็จะแคบลง



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟของระบบควบคุมแบบปรับโพรชันนอล

3. การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral mode) ในการควบคุมที่ผ่านมา การควบคุมระบบขึ้นกับค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อควบคุมอินพุทใหม่ โดยโหมดนี้อาจเรียกว่า อัตราการเริ่มใหม่ (reset rate) ในโหมดปรับโพรชันนอล ค่าที่ป้อนกลับเป็นการบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนที่บอกโดยตรง แต่สำหรับในโหมดนี้ ค่าป้อนกลับที่ผ่านมาเป็นค่าที่บอกความคลาดเคลื่อนที่เป็นอยู่ ดังนั้นเป็นไปได้ที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจจะเป็นศูนย์ที่บางค่า และค่าที่ป้อนกลับป้อนอย่างถูกต้องเพราะว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในกระบวนการ

การคำนวณของโหมดอินทิกรัล สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนกับเวลา ซึ่งระบบป้อนกลับได้รับ โดยค่าเอทพุทของระบบควบคุมหาได้โดยผลคูณของพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายอินทิกรัล (integral gain) ดังสมการที่ 2.4

$$C_i(t) = K_i \int^t A_e(t) + C_i(0) \quad (2.4)$$

โดย  $C_i(t)$  = ค่าเอทพุทของตัวควบคุมในโหมดอินทิกรัล

$K_i$  = อัตราขยายอินทิกรัล

$A_e(t)$  = พื้นที่รวมของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา

$C_i(0)$  = เอทพุทของตัวควบคุมที่เวลา 0

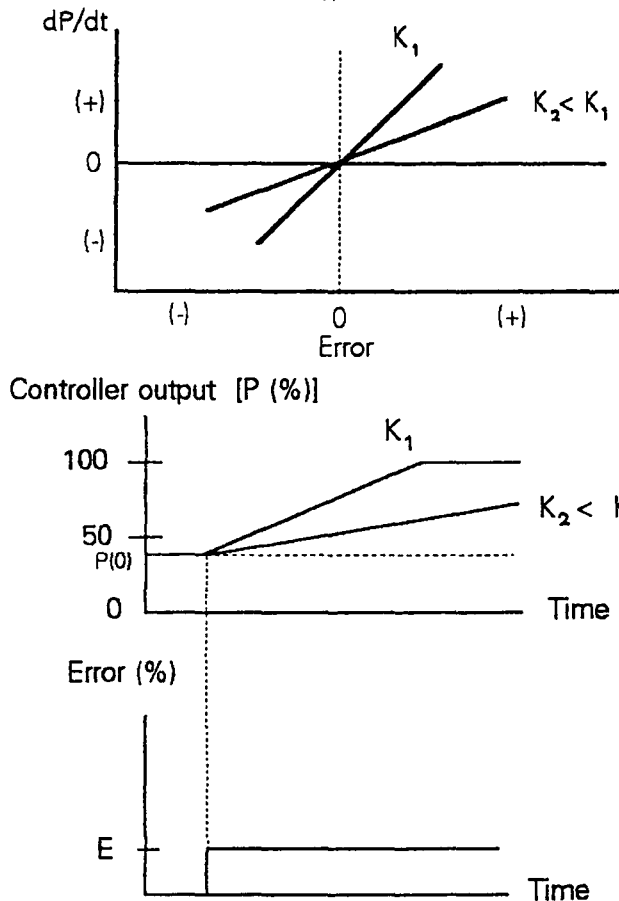
สมการโดยทั่วไปของโหมดอินทิกรัลที่อยู่ในรูปทางสมการคณิตศาสตร์ เป็น

$$C_i(t) = K_i/T_i \int^t e_{ii}(t) dt + C_i(0) \tag{2.5}$$

ซึ่งจะเป็นทรานสเฟอฟังก์ชันของระบบเป็น

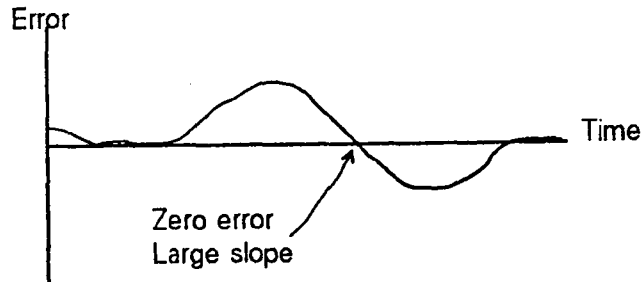
$$C_i(t) / e_{ii}(t) = K_i / t \tag{2.6}$$

เมื่อนำสมการที่ 2.6 มาแก้สมการและนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูป 2.8 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์เอาร์ทพุทกับค่าอัตราขยายและค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาร์ทพุทกับค่าอัตราขยายและค่าคลาดเคลื่อน

4. ระบบควบคุมแบบเดอริเวทีฟ (derivative mode D) เป็นแบบที่การควบคุมขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อน โดยวิธีนี้จะหาค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ได้ทันที และวิธีนี้ยังเพิ่มให้การตอบสนองของตัวควบคุมให้กว้างขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนไปซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละเวลา ซึ่งอาจเรียกโหมดนี้ว่า อัตราการกระทำ (rate action) การตอบสนองของวิธีนี้ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นจริงที่เป็นขณะเฉพาะ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนกำลังจะเปลี่ยนแปลงไปที่จุดขณะนั้น



รูปที่ 2.9 แสดงแสดงกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเป็นศูนย์ของโหมดเดอริเวทีฟ

รูป 2.9 แสดงกรณีการเกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นศูนย์ที่บางเวลา แต่การเปลี่ยนค่าของเอาต์พุทของตัวควบคุมเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว

อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยใช้ความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อน 2 ค่า หาด้วยค่าความแตกต่างที่จุดเวลาทั้งสอง ดังสมการ 2.7

$$C_d(t) = K_d (e(t_1) - e(t_0)) / (t_1 - t_0) \quad (2.7)$$

โดย  $C_d(t)$  = ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมในโหมดเดอริเวทีฟ

$K_d$  = อัตราขยายเดอริเวทีฟ

$e(t_1)$  = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา  $t_1$

$e(t_0)$  = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา  $t_0$

หรือถ้าจะแปลงให้อยู่ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล จะได้

$$C_d(t) = K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

จะสังเกตได้ว่าเทอมของเอาต์พุทของตัวควบคุมเวลาเริ่มต้น  $t_0$  เพราะว่าโหมดเดอริเวทีฟไม่ได้ใช้เฉพาะช่วง มันไม่ตอบสนองที่เฉพาะค่าความคลาดเคลื่อน จากสมการที่ 2.2 ค่าที่ได้จะเป็นค่าประมาณของเดอริเวทีฟเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุดเราจะเลือกใช้ช่วงเวลา  $t_0$  ถึง  $t$  ค่าน้อยๆ ค่าที่ได้จะเป็นค่าใกล้เคียงมาก

5. ระบบควบคุมแบบพรีออบโพซันนอล-อินทิกรัล (proportional integral mode PI) เป็นการควบคุมที่นำเอาแบบพรีออบโพซันนอลและอินทิกรัลมารวมกัน โดยในแบบอินทิกรัล จะทำการ reset โดยการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุทของตัวควบคุมอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งค่าคลาดเคลื่อนลด

ลงเท่ากับศูนย์ และแบบพรีอบโพซันนอลจะเปลี่ยนเอาท์พุทเป็นสัดส่วนกับค่าคลาดเคลื่อน ดังนั้น  
 จะได้สมการใหม่ว่า

$$C(t) = K_p e(t) + K_i \int^t e(t) / dt \tag{2.9}$$

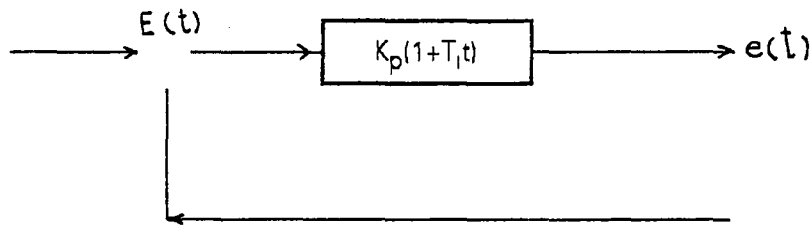
หรืออยู่ในรูปทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จะได้

$$C(t) / e(t) = K_p (1 + 1/T_i / t) \tag{2.10}$$

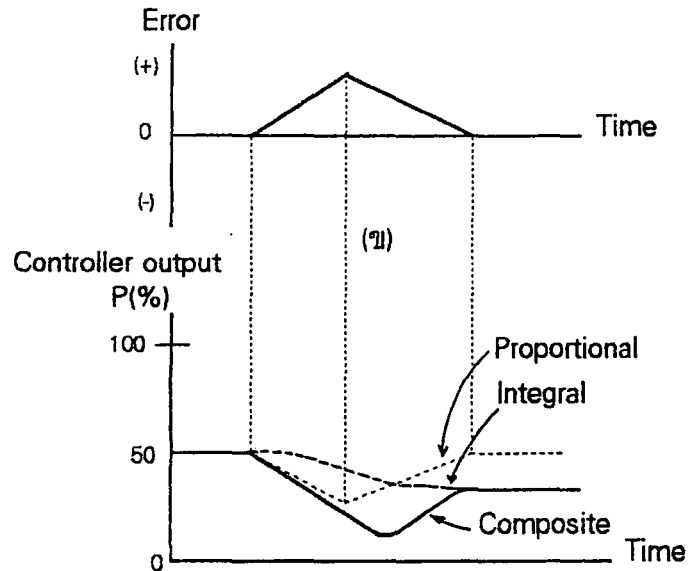
โดย K เป็นค่าของอัตราขยาย

T<sub>i</sub> เป็นค่าเวลาของอินทิกรัล

การทำงานของพรีอบโพซันนอล-อินทิกรัล แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



(ก)



(ค)

รูปที่ 2.10 (ก)แสดงถึงแผนภาพของบล็อกของตัวควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล-อินทิกรัล

(ข) ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e เป็นสัญญาณแบบขั้น (unit step)

(ค) เป็นสัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบพรีอบโพซันนอล-อินทิกรัล

### 6. ระบบควบคุมแบบพรีออบโพซันนอล-เดอริเวทีฟ (proportional-derivative mode, PD)

เป็นระบบที่ลดแนวโน้มของการสั่นและยอมให้มีการกำหนดอัตราขยายที่สูงขึ้น โดยที่แบบพรีออบโพซันนอลจะมีการเปลี่ยนเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับสัญญาณคลาดเคลื่อน ในขณะที่แบบเดอริเวทีฟ จะเพิ่มการเปลี่ยนแปลงทางเอาต์พุตซึ่งเกี่ยวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลาดเคลื่อน การควบคุมแบบเดอริเวทีฟจะคาดค่าคลาดเคลื่อนล่วงหน้าและเปลี่ยนเอาต์พุตให้สัมพันธ์กัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

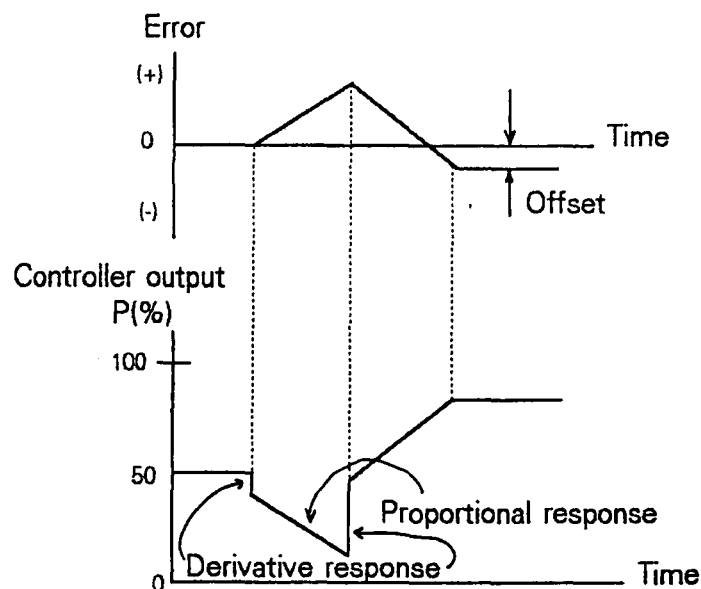
หรืออยู่ในรูปทรานสเฟอฟังก์ชัน จะได้

$$C(t) / e(t) = K_p (1 + T_d / t) \quad (2.12)$$

โดย  $K_p$  เป็นค่าของอัตราขยาย

$T_d$  เป็นค่าเวลาของเดอริเวทีฟ

ทั้งค่า  $K_p$  และค่า  $K_d$  เป็นค่าที่ปรับได้และในบางครั้งจะเรียกกิจกรรมควบคุมแบบเดอริเวทีฟว่า อัตราการควบคุม (rate control) ทั้งนี้เพราะขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนดังรูป 2.11



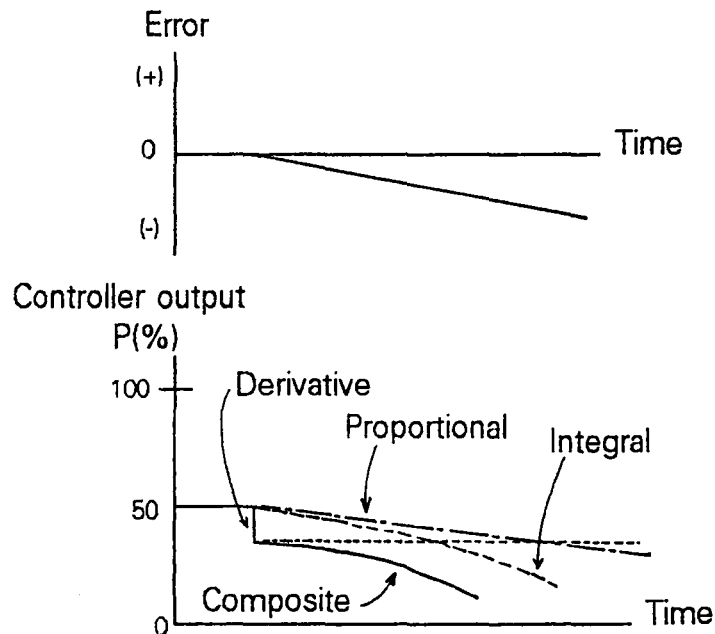
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อน กับ เอาต์พุตของการควบคุมแบบพรีออบโพซันนอล-เดอริเวทีฟ

7.ระบบควบคุมแบบปรับโพรพอร์ชันนอล-อินทิกรัล-เดอริเวทีฟ (proportional-integral-derivative mode PID) ระบบนี้จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคลาดเคลื่อนด้วยการ reset อัตราโนมิติเพื่อลด output offset และมีการลดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากโพลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดล่วงหน้า การควบคุมแบบนี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ และ รูป 2.12

$$C(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} + K_i / T_i \int e(t) / dt \quad (2.13)$$

หรืออยู่ในรูปทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จะได้

$$C(t) / e(t) = K_p (1 + 1 / T_i / t + 1 / T_d / t) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.12 แสดงภาพเอ้าท์พุทของการควบคุมแบบปรับโพรพอร์ชันนอล-อินทิกรัล และ เดอริเวทีฟ

### 2.1.2.2 วิธีการเลือกใช้การควบคุม

การเลือกใช้การควบคุมให้เหมาะสมกับงาน โดยมีการเลือกดังนี้

#### 1. การควบคุมแบบปรับโพรพอร์ชันนอล จะใช้เมื่อ

- 1) ไม่ต้องการให้มีการเกิดกิริยาควบคุมแบบ เปิด-ปิด ในขบวนการนั้น
- 2) ขบวนการนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของโพลด นาน ๆ ครั้ง
- 3) ยอมให้มีการเกิดออฟเซต (offset) ได้

#### 2. การควบคุมแบบรีเซ็ต (อินทิกรัล) จะใช้เมื่อ

- 1) ต้องการที่จะตัดค่าออฟเซตของขบวนการนั้น

2) ขบวนการนั้นมีการเปลี่ยนแปลง set point หรือการเปลี่ยนแปลงโหลดบ่อยครั้ง และจะไม่ใช้การควบคุมแบบรีเซ็ต เมื่อ

- ต้องการที่จะตัด overshoot ในช่วงเริ่มต้น
- ขบวนการที่สามารถที่จะถูกควบคุมโดยการตั้งเกนของพรีออปโพซิชันนอลสูงๆได้
- มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างมาก และบ่อยครั้งในระบบที่ต่อเนื่อง

### 3. การควบคุมแบบเดอริเวทีฟ จะใช้เมื่อ

ขบวนการนั้นประกอบด้วย ขบวนการแบบเชิงเส้นที่เป็นไปแบบช้า ๆ (linear lags) ตั้งแต่ 2 ช่วงขึ้นไป และค่าช่วงห่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงแบบช้า ๆ (distance velocity lag) มีค่าน้อยกว่าช่วงห่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นที่เป็นไปแบบช้า ๆ แต่ละช่วงนั้น

และจะไม่ใช้การควบคุมแบบเดอริเวทีฟ เมื่อ

1) ขบวนการนั้นมีส่วนประกอบที่มีอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญในระบบ และมีช่วงห่างของการเปลี่ยนแปลงแบบช้า ๆ นั้น

2) มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบ เว้นแต่ว่าสัญญาณรบกวนมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ใช้งานในขบวนการนั้น ๆ

#### 2.1.2.3 วิธีการเลือกตัวควบคุม

วิธีการในการพิจารณาว่าจะเลือกตัวควบคุมแบบใดในการนำมาควบคุมอุณหภูมิมีดังนี้ คือ

1) กระบวนการที่มีความจุน้อย หมายถึงว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของตัวให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย จะเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิที่ควบคุมเปลี่ยนแปลงไปได้มาก เราควรที่จะเลือกใช้การควบคุมแบบพรีออปโพซิชันนอล มากกว่าการควบคุมแบบเปิด-ปิด

2) ถ้าขบวนการใดมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยไม่คาดหมาย ก็จะทำให้เกิด offset ขึ้นมาได้ จึงควรจะใช้ตัวควบคุมแบบรีเซ็ตด้วย

3) สำหรับการที่จะนำเอาตัวควบคุมแบบเดอริเวทีฟพร้อมด้วยหรือไม่นั้น ก็เป็นสิ่งที่จำเป็น และจะตัดสินใจได้จากคุณลักษณะของกระบวนการว่า ถ้าขบวนการนั้นมี dead time ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิ ก็หมายถึงเมื่อเราจ่ายพลังงานให้กับขบวนการทันทีทันใด แต่อุณหภูมิภายในขบวนการนั้นจะยังคงไม่เพิ่มขึ้นทันทีทันใดตามการจ่ายพลังงานนาน แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น

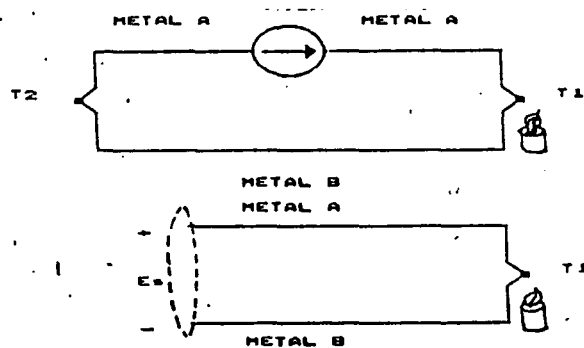
## 2.2 ตัวควบคุมแบบง่าย ๆ ในการควบคุมอุณหภูมิ

รีเลย์แบบสัมผัสและอุปกรณ์ที่มีการควบคุมความร้อนแบบต่าง ๆ อาจใช้ในระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด และ แบบไม่ต่อเนื่อง สำหรับระบบที่มีการควบคุมแบบต่อเนื่องจะใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมกระแสแบบบริดจ์ ( bridge controlled rectifier ) , SCR และ สวิตช์สนามแม่เหล็ก ( magnetic switch )

## 2.3 หัววัดอุณหภูมิ [16]

ในเตา 2 โซนนั้นอุณหภูมิที่ใช้ค่อนข้างสูงคือประมาณ 1200 องศาเซลเซียสและ 850 องศาเซลเซียส และมีสัญญาณรบกวนมาก หัววัดอุณหภูมิจึงต้องให้ค่าเอาท์พุทที่สูง โดยทั่วไปแล้วมักนิยมใช้เทอร์มิคัปเปิล ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงมาก

ลักษณะของเทอร์มิคัปเปิล ก็คือ เมื่อเรานำโลหะ 2 ชนิดมาเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้าง และปลายข้างหนึ่งให้ความร้อนสูงกว่าอีกข้างหนึ่ง จะเกิดกระแสไหลขึ้นในวงจรมีรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการพื้นฐานของเทอร์มิคัปเปิล

ถ้าเราตัดวงจรออกครึ่งหนึ่ง แล้วเปิดวงจรนั้นไว้ดังรูป 2.13 ข จะมีแรงดันเกิดขึ้น ค่าหนึ่ง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างอุณหภูมิของรอยต่อกับที่ปลายหัว ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบ

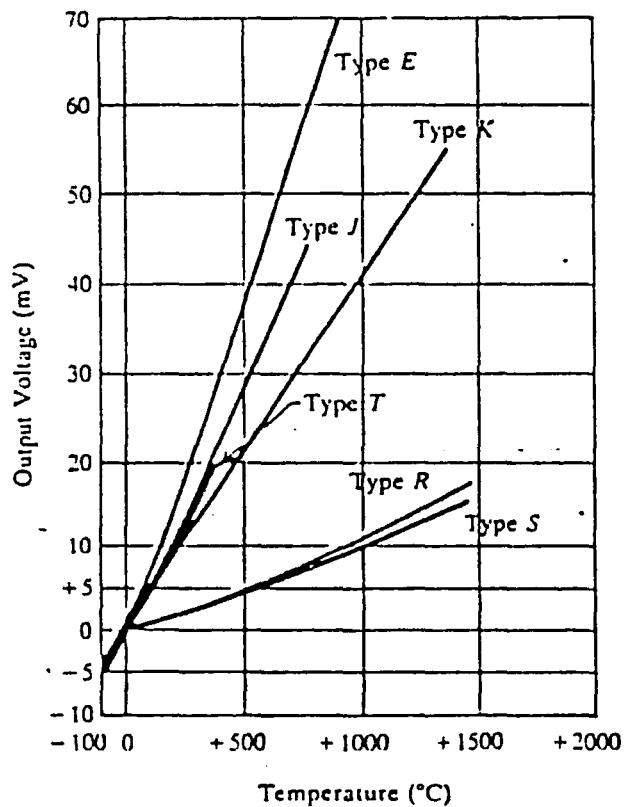
โดย โทมัส ซีเบค (Thomas Seebeck) ในปี 1891 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และแรงดันที่เกิดเรียกว่าแรงดันซีเบค (Seebeck Voltage) ซึ่งขนาดของแรงดันนี้ ขึ้นกับชนิดของโลหะทั้งสองที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลและหาได้จาก

$$E_a = \alpha_{AB} (T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

$\alpha_{AB}$  คือสัมประสิทธิ์การแปรผัน เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck Coefficient)

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในห้องตลาดมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ชนิด T, ชนิด K, ชนิด E, ชนิด

R, ชนิด S, ชนิด B เป็นต้น สำหรับเตา 2 โชนจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และ ชนิด S



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

### บทที่ 3 โครงสร้างผลึก

ผลึกเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ การเรียงตัวของอะตอมทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันทำให้เกิดเป็นผลึกที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน การเรียงตัวกันของอะตอมอย่างเป็นระเบียบนั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ในทางอุดมคติแต่ตามสภาพความเป็นจริงผลึกที่มีอยู่จริงในโลกนี้ไม่ได้เป็นผลึกที่สมบูรณ์แบบทั้งหมด มักจะมีข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกอยู่บ้าง เช่น เกิดเป็นช่องว่างของอะตอม เกิดมีอะตอมชนิดอื่นแทรกเข้าไปเป็นส่วนเกิน จากการมีข้อบกพร่องต่าง ๆ ของผลึกทำให้คุณสมบัติของของแข็งเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไปได้และทำให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์คลาดเคลื่อนได้ เช่น การยืดหยุ่นของโลหะเลวลง , ผลึกที่เคยโปร่งแสงอาจเปลี่ยนสีได้ , สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง , การแพร่กระจายของอะตอมภายในวัสดุอาจดีขึ้น

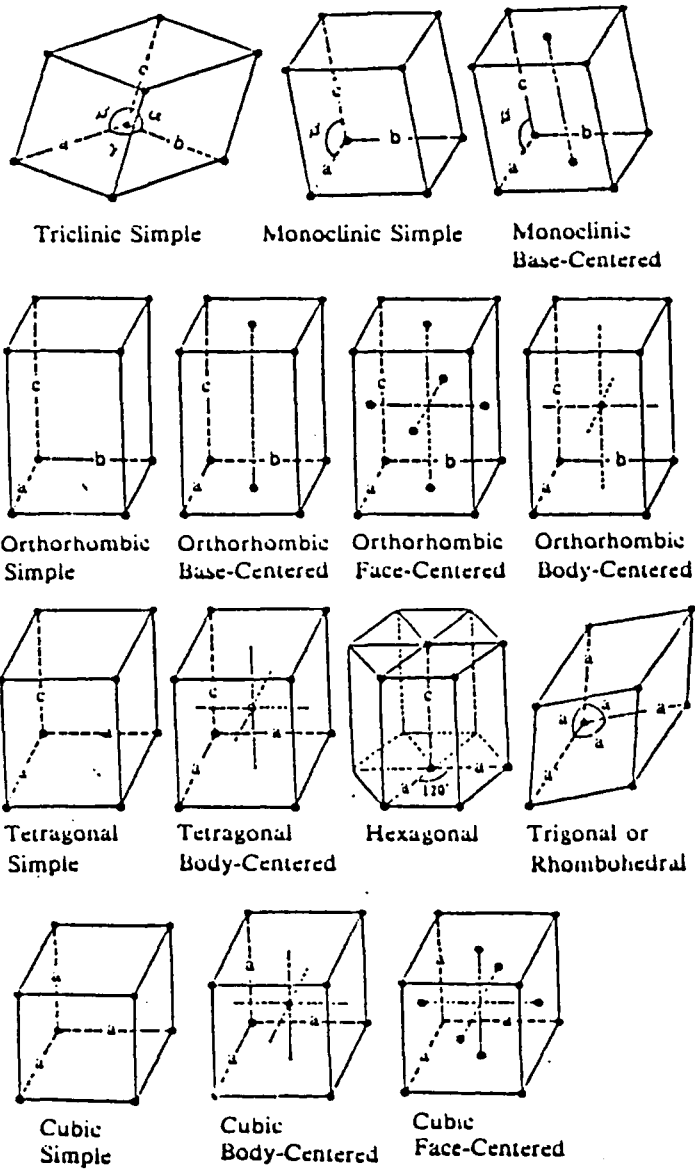
स्पष्टแลตทิซ ( space lattice ) หรือ แลตทิซของบราวเวียส ( Bravais lattice ) เป็นเพียงรูปแบบที่จินตนาการขึ้นมาอธิบายลักษณะการเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกไม่ใช่ตำแหน่งการจัดเรียงตัวของอะตอมต่าง ๆ จริง เป็นเพียงรูปทรงทางเรขาคณิตของจุดต่าง ๆ ในस्पष्टที่สร้างขึ้น เพื่อใช้อธิบายโครงสร้างทางผลึกเท่านั้น ดังนั้นจากการแบ่งกลุ่มของโครงสร้างทางผลึกโดย บราวเวียส ( Bravais ) นั้นได้แบ่งทั้งหมดออกเป็น 14 स्पष्टแลตทิซ และจัดรวมเป็นระบบใหญ่ ๆ ได้ 7 ระบบ ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 [13]

ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกแบบบิกซ์ไมท์ ( bixbyte ) [6] ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก ( body center cubic ) [8,9] เป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นโครงสร้างผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ก็จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ( tetragonal ) ที่เรียกว่า โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ( Rutile ) [8,9] ด้วย เนื่องจากเป็นโครงสร้างผลึกของ ทินออกไซด์ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และสำหรับโครงสร้างผลึกในลักษณะอื่น ๆ จะขอไม่กล่าวถึง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงลักษณะรูปแบบทั้ง 14 ของแลตทิซของบราวาลีใน 3 มิติ [13]

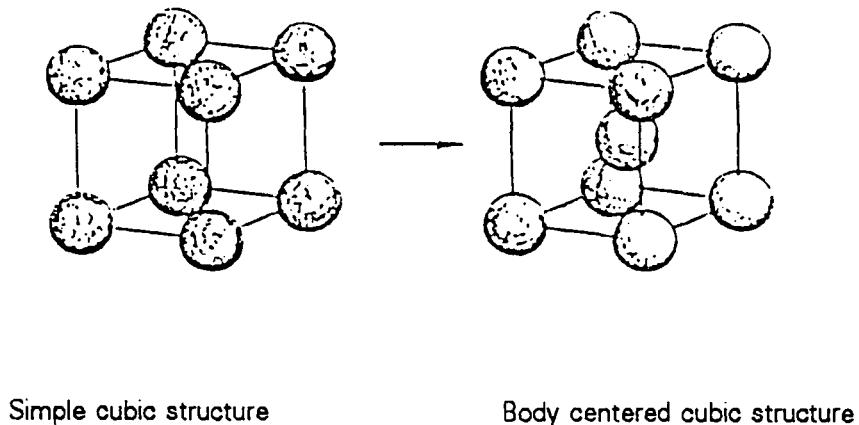
ระบบ	Bravais lattice	จำนวนชนิด	ลักษณะของ unit cell
Triclinic	simple	1	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Monoclinic	simple based - centered	2	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ; $\beta \neq 90^\circ$
Orthorhombic	simple based - centered body - centered faced - centered	4	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	simple body - centered	2	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Cubic	simple	3	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trigonal - Rhombohedral	simple	1	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$ , $\neq 90^\circ$
Hexagonal	simple	1	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ ; $\gamma = 120^\circ$

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรายละเอียดแลททิซของบราวน์ [13]



### 3.1. โครงสร้างผลึกแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก [8,9]

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก จะมีโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิ้ลคิวบิก แต่ที่จุดศูนย์กลางของทุก ๆ อะตอมที่อยู่ที่มีอะตอมที่เป็นธาตุชนิดเดียวกันมาแทรกอยู่ กล่าวคือ ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วย 2 อะตอมโดยอะตอมหนึ่งอยู่ที่  $(0,0,0)$  และอีกอะตอมอยู่ที่  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$  ซึ่งได้แสดงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิ้ลคิวบิก กับโครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก ให้งดังในรูปที่ 3.1

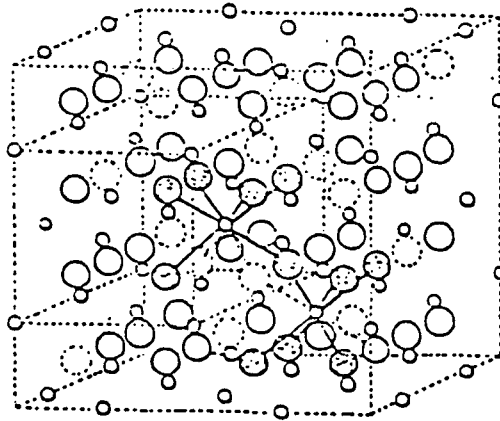


รูปที่ 3.1 แสดงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิ้ลคิวบิก กับ โครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก

### 3.2. โครงสร้างผลึกแบบบิกซ์ไบท์ [6]

สารประกอบออกไซด์  $\text{In}_2\text{O}_3$  มีโครงสร้างผลึกแบบบิกซ์ไบท์จัดอยู่ในตระกูลโลหะออกไซด์ (metallic sesquioxide) ที่มีโครงสร้างแบบซี-แรร์เอิร์ท (c - rare earth) มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{C} - \text{M}_2\text{O}_3$  (M คือ Ga, Tl, In เป็นต้น) อีออน  $\text{M}^{3+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  ยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์กลายเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถอธิบายโครงสร้างได้ดังนี้





รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของ  $\text{CaF}_2$  ที่มีการขาดหายไปของอะตอม

การขาดหายไปของอะตอมทั้ง 2 กรณีนี้ทำให้ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนทั้ง 6 พันธะแตกต่างกันไป เนื่องจากการขาดหายไปของแรงผลึกทำให้อะตอมที่เหลือถูกดึงดูดด้วยแรงที่ต่างจากเดิม โดยในกรณีแรกจะทำให้ความยาวพันธะต่างกัน 3 กลุ่ม คือ

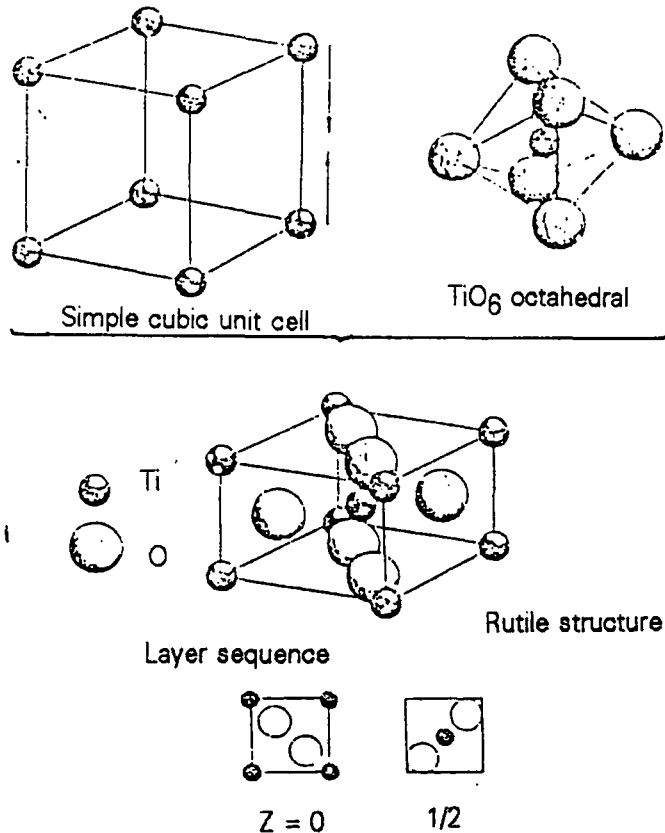
1. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ  $2.13 \text{ \AA}$  มี 2 พันธะ
2. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ  $2.19 \text{ \AA}$  มี 2 พันธะ
3. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ  $2.23 \text{ \AA}$  มี 2 พันธะ

สำหรับกรณีที่ 2 ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนทั้ง 6 พันธะมีค่าเท่ากันหมดคือ  $2.18 \text{ \AA}$  ซึ่งเท่ากับค่าเฉลี่ยความยาวพันธะ 3 กลุ่มในกรณีแรก

**3.3 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ [8,9]**

โครงสร้างแบบรูไทล์ (AO<sub>2</sub> : โดยที่ A คือ Ti, Sn, Ge เป็นต้น) สามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยเซลล์รูปเตตระโกนอล (tetragonal) ที่มีอะตอม A อยู่ที่แต่ละมุมของเซลล์ และ A ที่เป็นอะตอมกลางจะสร้างพันธะกับออกซิเจน 6 อะตอมแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) ที่บิดเบี้ยวอยู่ตรงกลางดังรูปที่ 3.3 สำหรับออกตะฮีดรอลดังกล่าว อีออนของ A แต่ละอีออนจะล้อมรอบด้วยอีออนของออกซิเจนใกล้ที่สุด 4 อีออน และอยู่ห่างออกไปอีก 2 อีออน อีออนของ A จะอยู่ในหน่วยเซลล์เตตระโกนอล ณ ตำแหน่ง 0,0,0 ;  $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$  และอีออนของออกซิเจนอยู่ ณ ตำแหน่ง  $x, x, 0$  ;  $\bar{x}, \bar{x}, 0$  ;  $\frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}$  ;  $\frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}$

สารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์นี้มีหลายสารประกอบ เช่น GeO<sub>2</sub>, IrO<sub>2</sub>, α-MnO<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub>, NbO<sub>2</sub>, OsO<sub>2</sub>, PbO<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> (H.P.), SnO<sub>2</sub>, AlAsO<sub>4</sub> (H.P.), TeO<sub>2</sub>, CrVO<sub>4</sub> เป็นต้น



**รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์**

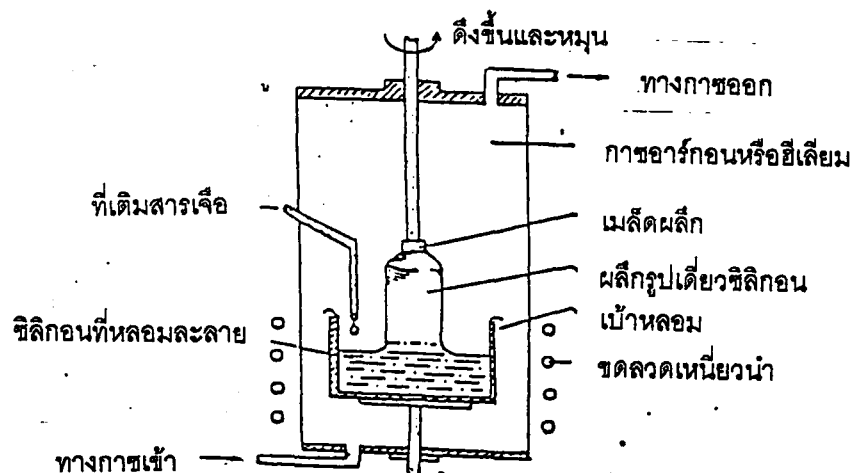
## บทที่ 4 การปลูกผลึก

สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ จะสร้างขึ้นมาจากผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยมีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยผลึกเดี่ยวนี้จัดเป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่สุด กล่าวคือมีสภาพเป็นผลึกตลอดทั้งเนื้อสารนั้น ดังนั้นการสร้างให้ได้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดผลึกเดี่ยวจึงถูกนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ

ในการสร้างผลึกเดี่ยว ปกติมักใช้คำว่า การปลูกผลึก ในการสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดใด จำเป็นต้องใช้สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นมาเป็นแบบ ในปัจจุบันมีวิธีการปลูกผลึกแบบต่าง ๆ ดังนี้

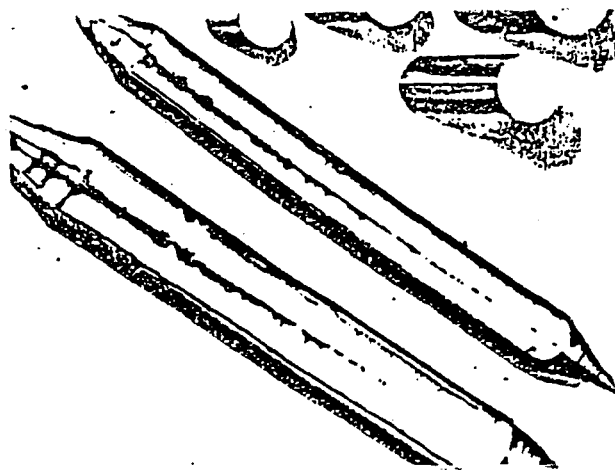
### 4.1 วิธีของไซโคราลสกี ( Czochralski method ) [10]

วิธีของไซโคราลสกี (Czochralski method) หรือบางที่เรียกกันง่าย ๆ ว่า วิธีการดึง ( Pulling method ) โดยวิธีนี้เป็นการสร้างผลึกเดี่ยวจากสารกึ่งตัวนำขณะที่มีสภาพเป็นของเหลวโดยมีอุปกรณ์ในการสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีไซโคราลสกี

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่สกัดมาได้แต่ยังไม่ได้อยู่ในรูปของผลึกจะถูกนำมาใส่ลงในเบ้าหลอมซึ่งบรรจุอยู่ภายในใจกลางเตาหลอมชนิดพิเศษ ภายในเตาจะเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน หรือฮีเลียม ที่เป็นปัญหาใหญ่และต้องระมัดระวังเป็นพิเศษคือ เรื่องความสะอาดภายในเตาหลอม เพราะถ้ามีสารอื่นหรือสิ่งแปลกปลอมชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการปะปนอยู่ภายในแล้วจะทำให้ผลึกที่สร้างขึ้นมานั้นไม่บริสุทธิ์และไม่เป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์ เบ้าหลอมที่ใช้บรรจุสารกึ่งตัวนำจะถูกทำให้ร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ดังนั้นเบ้าหลอมที่ใช้อาจเป็นพวกกราฟไฟท์หรือแก้วควอทซ์ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของสารกึ่งตัวนำ เมื่อทำให้สารกึ่งตัวนำหลอมละลายกลายเป็นของเหลวแล้ว การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีนี้ก็จะเริ่มต้นขึ้น โดยการจุ่มเมล็ดผลึกลงไปให้ติดกับผิวบนของสารกึ่งตัวนำที่เป็นของเหลวปลายของเมล็ดผลึกจะเริ่มหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันภายในเบ้าหลอม จากนั้นเมล็ดผลึกก็จะถูกยกขึ้นอย่างช้าๆ และพร้อมกับหมุนรอบแกนด้วยเห็กระดับของสารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย ทำให้สารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวและติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมานั้นเริ่มแข็งตัวและแปรสภาพเป็นผลึกเดี่ยวเช่นเดียวกับเมล็ดผลึกนั้น และด้วยอัตราการยกขึ้นและหมุนไปรอบ ๆ แกนอย่างช้า ๆ ของเมล็ดผลึกทำให้ได้แท่งผลึกที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ดผลึกที่ใช้ ปัจจุบันสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ส่วนความยาวของแท่งผลึกก็ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการสร้าง ดังรูป 4.2 ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์

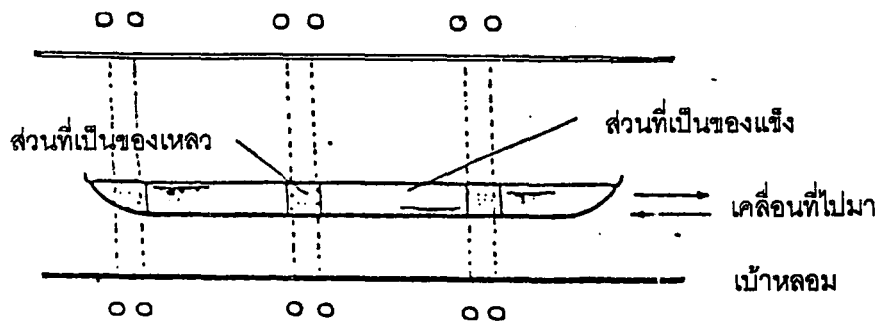


รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของแท่งผลึกเดี่ยวที่สร้างขึ้นได้จากวิธีไซโครสตั๊ก

ในทางปฏิบัติ มักจะเติมสารบางชนิดลงไปในการกึ่งตัวนำขณะที่หลอมเหลวอยู่ สารที่เราใช้เติมลงไปนี้ เราเรียกกันว่า สารเจือ (impurity) ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของผลึกสารกึ่งตัวนำให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามต้องการ เช่นคุณสมบัติความนำไฟฟ้า เป็นต้น วิธีการที่เราเติมสารเจือลงไปขณะสร้างผลึกเช่นนี้เราเรียกว่า การโด๊ป (doping) สารเจือที่เราใช้โดยทั่วไปหมายถึงธาตุโลหะบางชนิด ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 5 ของตารางธาตุเช่น อินเดียม (In) อลูมิเนียม (Al) โบรอน(B) ฟอสฟอรัส (P) สารหนู (As) พลวง (Sb) เป็นต้น สารเจือเหล่านี้เมื่อเติมลงไปในการกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ผลึกที่ได้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เช่น มีความนำไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าผลึกสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์นอกจากนี้แล้วสารเจือในแต่ละชนิดจะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งสารเจือเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด (acceptor impurity) หรือที่เรียกว่าสารเจือชนิดพี (p-type impurity) เช่น ธาตุโบรอน อินเดียม อลูมิเนียม เป็นต้น และอีกชนิดหนึ่งก็คือสารเจือชนิดดี (donor impurity) หรือที่นิยมเรียกว่า สารเจือชนิดเอ็น (n-type impurity) เช่น ธาตุฟอสฟอรัส สารหนู เป็นต้น เมื่อเติมสารเจือชนิดพี หรือสารเจือชนิดเอ็นลงไปในการกึ่งตัวนำแล้วก็จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นตามลำดับ

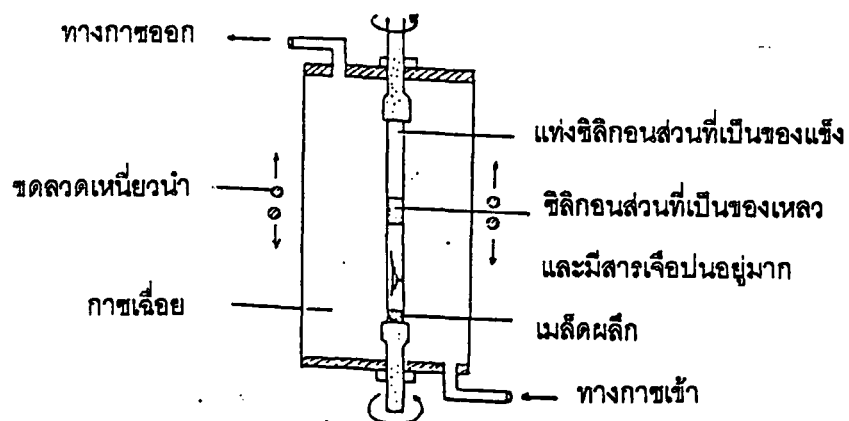
#### 4.2 วิธีโซนรีไฟนิ่ง ( Zone-refining ) [10]

เป็นวิธีการปลูกผลึกเดี่ยว โดยมีอุปกรณ์แสดงดังรูป 4.3 หลักการของวิธีโซนรีไฟนิ่งก็คือ การทำให้แท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำถูกหลอมละลายเป็นของเหลวเฉพาะในบางส่วนของแท่ง ความร้อนหลอมเป็นของเหลวจะยังสามารถอยู่ได้ระหว่างส่วนสองส่วนซึ่งเป็นของแข็งเมื่อเลื่อนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำ หรือเลื่อนแท่งผลึกหลายรูปก็ตามบริเวณหลอมละลายในแท่งผลึกก็จะเปลี่ยนไปส่วนที่เคยหลอมเหลวก็จะแข็งตัวและกลายเป็นผลึกเดี่ยวขึ้นมา ทั้งนี้โดยที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของแท่งผลึกจะต้องมีเมล็ดผลึกติดอยู่ด้วย และสิ่งที่ไม่บริสุทธิ์ทั้งหลายก็จะถูกขับออกมาไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งผลึก เมื่อตัดปลายทั้งสองด้านนี้ทิ้ง ก็จะทำให้ได้แท่งผลึกเดี่ยวที่บริสุทธิ์มากและสมบูรณ์ยิ่ง



รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ  
โดยวิธีโซนรีฟนิ่งค์

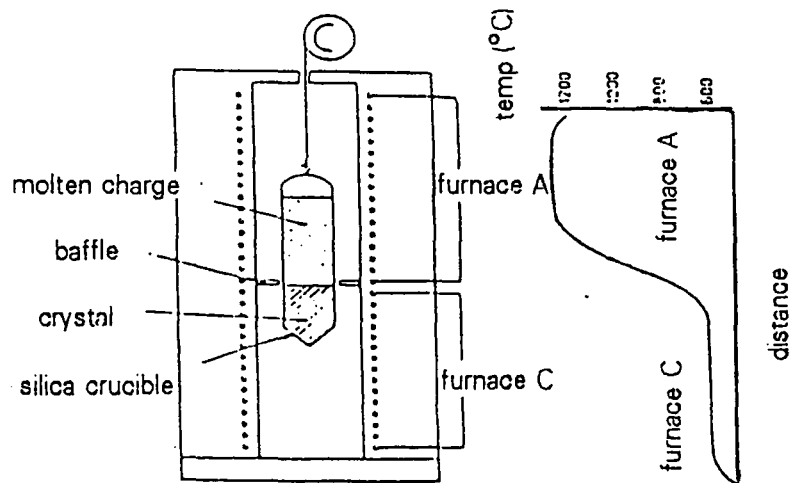
วิธีโซนรีฟนิ่งค์นี้จะใช้สำหรับในกรณีที่ต้องการผลึกรูปเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์มากหรือเมื่อต้องการที่จะโดปด้วยสารเจือก็ยังสามารถทำได้เช่นกัน ทั้งนี้โดยการจัดให้แท่งผลึกหลายรูปอยู่ในลักษณะแนวตั้ง และเติมสารเจือลงไปในที่สุดจะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยว ที่ถูกเจือด้วยสารเจืออย่างสม่ำเสมอซึ่งวิธีการนี้เราเรียกว่า ฟลอยตติ้งโซน (Floating zone) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดคือ ขนาดของแท่งผลึกที่สร้างได้จะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้แท่งผลึกทรงตัวอยู่ได้



รูปที่ 4.4 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีฟลอยตติ้งโซน

#### 4.3 วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์ ( Bridgman-Stockbarger Method )

หลักการโดยทั่วไปของการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์คือการให้ภาชนะที่บรรจุธาตุหรือสารประกอบตั้งต้นเคลื่อนที่ผ่านเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (temperature gradient) ภายในเตาจากส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้นไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมและสม่ำเสมอการเลือกใช้ขนาดของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิก็น่าสนใจอย่างยิ่งในการเตรียมผลึกของสารประกอบซัลโคไฟด์ นิยมใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในช่วง  $15-20\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$  เพื่อให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น การเตรียมผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์ ที่ใช้เตา 2 โชนในแนวตั้งจะแสดงดังรูป 4.5 อุณหภูมิของเตา A จะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่บรรจุอยู่ในภาชนะ แต่เตา C จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวในส่วนของบัฟเฟิล B ( Buffle B ) เป็นเกรเดียนท์ของอุณหภูมิจากเตาทั้งสอง ภาชนะที่บรรจุสารสามารถปรับให้เคลื่อนขึ้นลงไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาได้ เมื่อเริ่มทำการทดลองภาชนะที่บรรจุสารที่จะใช้เตรียมผลึกจะถูกแขวนไว้ที่ตำแหน่งกลางของเตา A จนกระทั่งสารภายในภาชนะหลอมเหลวในระยะเวลาหนึ่งจึงเลื่อนภาชนะลงช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอผ่านบัฟเฟิล B จนเข้าไปอยู่ในเตา C สารกึ่งตัวนำจะเริ่มแข็งตัวจากปลายด้านแหลมจนกระทั่งแข็งตัวหมดทั้งแท่งตามรูปร่างของภาชนะ

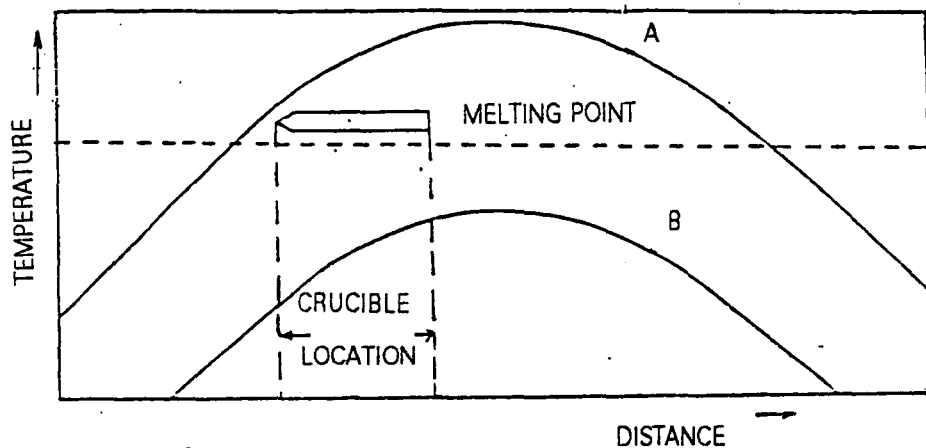


รูปที่ 4.5 ก) แสดงเตา 2 โชนในแนวตั้ง เพื่อเตรียมผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์

ข) แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

จากวิธีดังกล่าวนี้ถ้าใช้การเลื่อนเตาขึ้นแทนที่จะเลื่อนภาชนะลง ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องอยู่นิ่งในตำแหน่งที่เหมาะสมขณะที่เตาเคลื่อนไป วิธีนี้จะเรียกว่าวิธีของสโตบาร์เกอร์ (Stockbarger Method) โดยทั่วไปจะเห็นว่าทั้งสองวิธีให้ผลเกือบเหมือนกัน ดังนั้นจึงนิยมเรียกวิธีการเตรียมผลึกทั้งสองวิธีนี้ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอนไม่ว่าจะเป็นการเลื่อนเตาหรือเลื่อนภาชนะว่าวิธีของบริดจ์แมน-สโตบาร์เกอร์(Bridgman-Stockbarger Method)

การเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีของบริดจ์แมน-สโตบาร์เกอร์ นอกจากจะใช้กับเตาชนิด 2 โซนแล้วยังนิยมใช้กับเตาชนิดโซนเดียว ซึ่งเตาโซนเดียวจะมีลักษณะของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิดังแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดียว

บริเวณตรงกลางเตาจะเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุดและจะค่อย ๆ ต่ำลงไปตามยาวสู่ปลายเตาทั้งสองข้าง เส้นโค้ง A และ B แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิ ( temperature profile ) ซึ่งอุณหภูมิตรงกลางเตาตามโปรไฟล์ B จะต่ำกว่า A ถ้ากำหนดเส้นประในรูปที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารที่จะใช้เตรียมเป็นผลึก สำหรับในกรณีที่มีการออกแบบให้ภาชนะเลื่อนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาได้อย่างสะดวก โดยให้โปรไฟล์ของอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองเป็นไปตามเส้นโค้ง A และภาชนะบรรจุสารที่กำลังหลอมเหลวจะอยู่บริเวณกลางเตา

เป็นไปตามเส้นโค้ง A และภาชนะบรรจุสารที่กำลังหลอมเหลวจะอยู่บริเวณกลางเตา หลังจากที่ใช้เวลาในการหลอมสารระยะหนึ่งจึงเลือกภาชนะไปทางด้านซ้ายมือของรูปอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ สารที่อยู่ในส่วนปลายแหลมของภาชนะจะเริ่มแข็งตัวเป็นผลึกก่อนในขณะที่ผ่านจุดตัดระหว่างโปรไฟล์ A กับเส้นประจนกระทั่งภาชนะผ่านพ้นจุดนี้ไปแล้วสารจึงจะแข็งตัวทั้งหมดเป็นอันยุติการเตรียมผลึก

ในทำนองเดียวกันแทนที่เราจะใช้วิธีการเลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือแต่เปลี่ยนเป็นการเลื่อนเตาไปทางด้านขวามือด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับการเลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือโดยออกแบบให้เตาเลื่อนไปอย่างอิสระและภาชนะต้องนิ่งอยู่กับที่ในขณะที่เตาเลื่อนไปสารจะเริ่มแข็งตัวอย่างช้าๆ ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วของเตาที่เลื่อนไป

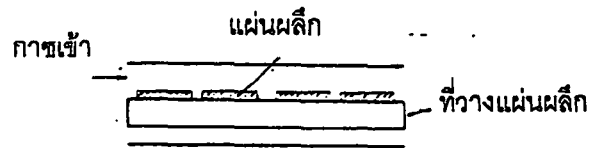
#### 4.4 วิธีการพาไอระเหยสารเคมี ( chemical vapour deposition ) [17]

วิธีการพาไอระเหยสารเคมี หรือที่นิยมเรียกกันย่อ ๆ ว่า CVD คือขบวนการสร้างชั้นของสารประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้นบนฐานรองที่ถูกทำให้ร้อนโดยปฏิกิริยาทางเคมีเนื่องจากความร้อนหรือปฏิกิริยาเนื่องจากการแยกตัวของธาตุในกาซที่เป็นสารประกอบขบวนการ CVD อาจจะทำได้หลายรูปแบบ แต่อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จำเป็นที่จะต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้

##### 4.4.1 ส่วนเกิดปฏิกิริยา (Reaction chamber)

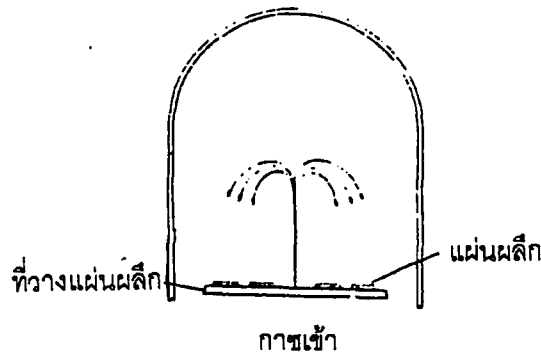
มีลักษณะเป็นครอบแก้วหรือท่อควอทซ์ซึ่งปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นภายในนี้จากลักษณะของส่วนเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถแยกระบบ CVD ออกได้เป็น 4 ระบบใหญ่ดังนี้

ก.ระบบแนวนอน (Horizontal systems) ส่วนเกิดปฏิกิริยา จะมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ทรงกระบอกวางไว้ในแนวนอน แผ่นผลึกจะถูกวางอยู่บนโบริด และใส่เข้าไปภายในท่อควอทซ์นี้การปล่อยกาซเข้าไปทำได้โดยให้เข้าที่ปลายท่อด้านหนึ่งผ่านแผ่นผลึกและออกไปทางปลายท่ออีกด้านหนึ่ง ดังรูป 4.7



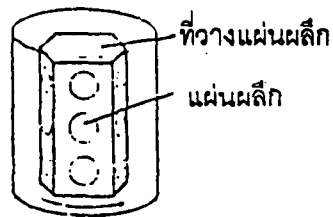
รูปที่ 4.7 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบแนวนอน

ข.ระบบแนวตั้ง ( Vertical systems ) ส่วนเกิดปฏิกิริยาจะมีลักษณะเป็นครอบแก้วโดยมีการปล่อยก๊าซเข้าไปกระทบกับด้านบนของผนังครอบแก้วแล้วสะท้อนกลับลงมากระทบกับผิวของแผ่นพลาสติกดังรูป 4.8 ปกติโบริดซึ่งเป็นที่วางแผ่นพลาสติกจะถูกหมุนไปรอบ ๆ แกนกลาง เพื่อให้อุณหภูมิภายในครอบแก้วนี้สม่ำเสมอ



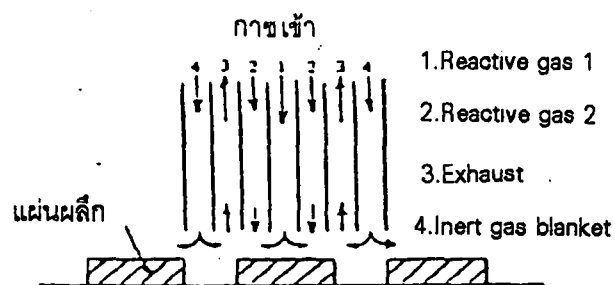
รูปที่ 4.8 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบแนวตั้ง

ค.ระบบทรงกระบอกหรือระบบถัง ( Cylindrical or Barrel systems ) ส่วนเกิดปฏิกิริยาจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แต่ที่วางแผ่นพลาสติกจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปถังทรงกระบอกอาจจะมีหลายเหลี่ยมอยู่ตรงกลางส่วนเกิดปฏิกิริยาแผ่นพลาสติกจะถูกวางติดกับผิวทุกด้านของที่วางรูปถัง ก๊าซจะถูกปล่อยเข้ามาภายในส่วนเกิดปฏิกิริยาทางด้านข้าง และที่วางแผ่นพลาสติกรูปถังนี้จะถูกหมุนไปรอบ ๆ แกน ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบทรงกระบอกหรือทรงถึง

ระบบปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม (Gas-blanketed downflow systems) ในระบบนี้มีลักษณะคล้ายกับระบบในแนวตั้ง กล่าวคือก๊าซจะถูกปล่อยให้ไหลลงมากกระทบกับผิวของแผ่นผลึกที่หมุนอยู่กับแท่นวาง ก๊าซเฉื่อยที่ใช้ได้แก่ไนโตรเจนจะถูกปล่อยลงมาให้คลุมแผ่นผลึกบริเวณรอบนอกเพื่อทำให้ปฏิกิริยาบริเวณภายในบนผิวแผ่นผลึกดำเนินไปได้ด้วยดี ดังรูป



รูปที่ 4.10 แสดงส่วนเกิดปฏิกิริยาระบบปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม

#### 4.4.2 ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซ ( Gas flow control section )

เป็นส่วนซึ่งใช้สำหรับช่วยควบคุมการปล่อยก๊าซให้เข้าไปในส่วนเกิดปฏิกิริยาปริมาณที่เหมาะสมและแน่นอน ประสิทธิภาพของส่วนนี้ขึ้นอยู่กับความแน่นอนในการควบคุมปริมาณของก๊าซ

#### 4.4.3 ส่วนควบคุมเวลาและขั้นตอนต่าง ๆ ( Time and sequence control section )

เป็นส่วนหนึ่งของระบบ CVD ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของส่วนอื่น ๆ ของระบบ เพื่อควบคุมเวลาลำดับขั้นตอนของการทำงานส่วนต่าง ๆ อาจควบคุมโดยระบบอัตโนมัติหรือระบบธรรมดาด้วยมือก็ได้ หรืออาจเป็นการควบคุมอัตโนมัติโดยใช้การส่งงานจากคอมพิวเตอร์

#### 4.4.4 แหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับซับสเตรท ( Heat source for substrates )

เป็นส่วนที่จ่ายความร้อนให้แก่แผ่นผลึกแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือระบบผนังแบบเย็น (Cold-wall) การให้ความร้อนแก่ผลึกทำได้โดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นวิทยุความถี่สูงหรือจากแสงอุลตราไวโอเล็ต โดยคลื่นความถี่สูงหรือแสงอุลตราไวโอเล็ตจะเหนี่ยวนำให้แท่งวางผลึกซึ่งฉาบด้วยคาร์บอนร้อน ดังนั้นแผ่นผลึกที่วางอยู่บนแท่งนี้จึงร้อนด้วย ในระบบนี้ผนังของส่วนเกิดปฏิกิริยาจะได้ระบายความร้อนน้อยกว่าที่แผ่นผลึก ดังนั้นจึงมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวของ ส่วนเกิดปฏิกิริยาน้อย ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของระบบนี้

ระบบผนังแบบร้อน(Hot-wall)การให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกทำได้โดยการให้กระแสจำนวนมากไหลผ่านแท่งความต้านทานที่อยู่รอบ ๆ ส่วนเกิดปฏิกิริยาค่อยกับในเตาเพชรสาร ดังนั้นความร้อนจะกระจายผ่านส่วนเกิดปฏิกิริยาเข้าไปถึงแผ่นผลึกที่วางอยู่ภายใน กรณีนี้ผิวของส่วนเกิดปฏิกิริยาจะได้รับความร้อนสูง ทำให้เกิดมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวด้านในของส่วนเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย

#### 4.4.5 ระบบควบคุมก๊าซ( Effluent handing )

เป็นส่วนสำคัญส่วนสุดท้ายของระบบ CVD ทำหน้าที่ควบคุมให้ก๊าซที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วรวมทั้งก๊าซเฉื่อย ไหลออกไปจากส่วนเกิดปฏิกิริยาก๊าซเหล่านี้จะถูกทำให้สะอาดปราศจากพิษ และถูกทำให้เย็นลงแล้วจึงปล่อยออกสู่อากาศภายนอก

#### 4.5 การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ [1]

การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เป็นวิธีการปลูกผลึกจากสารละลาย โดยตัวทำละลาย อุณหภูมิสูงซึ่งหมายถึงฟลักซ์ เพราะทำให้การปลูกผลึกดำเนินไปได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของตัวถูกละลาย สิ่งนี้เป็นข้อดีของการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคในการปลูกผลึกแบบอื่น นอกจากนี้ยังมีเหตุผลอื่นอีกที่ใช้วิธีการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ ก็คือ

1. จุดหลอมเหลวของสารนั้น(ตัวถูกละลาย)สูงเกินกว่าที่เครื่องมือที่จัดหาสามารถทำได้
2. ลักษณะของสารที่มีจุดหลอมเหลวเป็นช่วงจะทำให้ได้สารที่เป็นของเหลวยาก เพราะมีสารบางส่วนระเหิดไปก่อนที่จะเป็นของเหลว

การปลูกผลึกวิธีนี้ยังสามารถใช้ได้กับการปลูกโลหะ , สารประกอบของสารกึ่งตัวนำ ฯลฯ

การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์มีประวัติว่ามีการใช้มาเป็นร้อยปีแล้ว โดยใช้ในการปลูกผลึกของเครื่องประดับ อย่างทับทิมและมรกต ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของยุคเล่นแร่แปรธาตุ และเสื่อมความสนใจลงไปจนกระทั่งในปี ค.ศ.1948 ก็ได้มีการกลับมาสนใจใหม่จากความก้าวหน้าทางด้านโซลิตสเตทฟิสิกส์ เริ่มด้วยการปลูกผลึกแบบเรียบโททานิต โดย รีมัยกา (Remeika (1954)) และ ยิทเทรียม-ไอร์ออน-การเนต (yttrium iron garnet : YIG) โดย นีลเซนและเดียร์บอร์น (Nielsen & Dearborn (1958))

##### 4.5.1 การเลือกฟลักซ์

ในการเลือกฟลักซ์ คือ ฟลักซ์จะต้องมีความสามารถในการละลายสูง โดยไม่ไปรวมตัวเป็นสารประกอบอย่างถาวร และมีความสามารถในการละลายต่ำสำหรับแพลทินัมหรือสารที่ใช้ทำเบ้าหลอม (crucible) อื่น เช่น ตัวทำละลายที่มีตะกั่ว ไม่เหมาะกับการปลูกสารประกอบพวก โครเมต เนื่องจากจะรวมตัวแล้วเกิดเป็นสารประกอบตะกั่วโครเมต (lead chromates)

ฟลักซ์ที่จะใช้ในการปลูกผลึกนั้นมีจำนวนมากมาย และหลักการในการเลือกใช้ฟลักซ์เป็นตัวทำละลายที่ได้ผลดีที่สุดสำหรับการปลูกผลึกที่ต้องการนั้นยังไม่ได้มีกำหนดไว้ทุกชนิด

ทางเลือกหนึ่งในการเลือกใช้ตัวทำละลายก็คือ การทดลองตามเอกสารอ้างอิงสำหรับฟลักซ์ชนิดที่เคยมีผู้ใช้กับการปลูกสารประกอบที่ใกล้เคียงกับที่เราต้องการและประสบผลสำเร็จ มาแล้ว ในทางปฏิบัติ มีฟลักซ์จำนวนน้อยที่สามารถใช้กับการปลูกผลึกมากกว่า 1 หรือ 2 ชนิด ฟลักซ์ที่นิยมใช้จะปรากฏอยู่ในตารางที่ 4.1 เป็นตัวอย่างของผลึกที่ได้จากวิธีใช้ฟลักซ์ ข้อมูลในตารางจะรวมถึงฟลักซ์บางตัวที่ไม่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางนัก

ฟลักซ์ที่นิยมใช้ส่วนมากจะเป็นออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) และ เลดฟลูออไรด์ (PbF<sub>2</sub>) แต่ก็เป็นการที่มีพิษเพราะเป็นสารประกอบของตะกั่ว ความสามารถในการละลายของออกไซด์ที่หลอมยากในฟลักซ์เหล่านี้มีมาก แต่เหตุผลหลักในการเลือกใช้ฟลักซ์เหล่านี้ก็คือ ผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าและจำนวนมากกว่าที่ได้จากตัวทำละลายอื่น ๆ นิยมใช้ร่วมกับ โบรอนออกไซด์ (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เพราะพบว่า B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ช่วยลดจำนวนจุดที่ก่อให้เกิดผลึก (nucleated crystal) ทำให้ได้ผลึกจำนวนน้อยลงแต่มีขนาดใหญ่มากขึ้น

ตารางที่ 4.1 รายชื่อฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะกับการปลูกผลึกสารแต่ละชนิด [1]

Flux	Melting point/eutectic	Room temperature solvent	Examples of solute	Reference
BaO/B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	870	HNO <sub>3</sub>	Ba <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>22</sub> , YIG	Linares (1962)
BaO/Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600	HNO <sub>3</sub>	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Elwell <i>et al.</i> (1972)
Bi <sub>2</sub> V <sub>2</sub> O <sub>17</sub>	~900	HNO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Wanklyn (1970)
Li <sub>2</sub> O/MoO <sub>3</sub>	532	H <sub>2</sub> O	BeO, ZrSiO <sub>4</sub>	Newkirk & Smith (1965)
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	741	HNO <sub>3</sub>	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Galt <i>et al.</i> (1950)
Na <sub>2</sub> W <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	620	H <sub>2</sub> O	CaWO <sub>4</sub> , CoV <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Kunmann <i>et al.</i> (1965)
PbF <sub>2</sub>	840	HNO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	White & Brightwell (1965)
PbO/B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	500	HNO <sub>3</sub>	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , YFeO <sub>3</sub>	Remeika (1963)
PbO/PbF <sub>2</sub>	494	HNO <sub>3</sub>	GdAlO <sub>3</sub> , Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Nielsen (1960)
PbO/PbF <sub>2</sub> /B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~494	HNO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Van Uitert <i>et al.</i> (1965)
Pb <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	824	HNO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GdPO <sub>4</sub>	Wickham (1962)
Pb <sub>2</sub> V <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	720	HNO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub> , YVO <sub>4</sub>	Feigelson (1968)

#### 4.5.2 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปฏิบัติ

ไม่ว่าจะใช้เทคนิคใด ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ก็คือ ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ และ คุณสมบัติของขั้นตอนการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์

การทดลองโดยส่วนมากจะใช้แก้วหลอมที่ทำจากแพลทินัม ซึ่งมีข้อเสียคือ มีราคาสูงและเปราะบางโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง จึงผสม Rh ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้มีความแข็งแรงขึ้น แก้วหลอมที่ใช้จะต้องมีผนังหนาที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะผนังบางจะมีอายุการใช้งาน (lifetime) สั้น

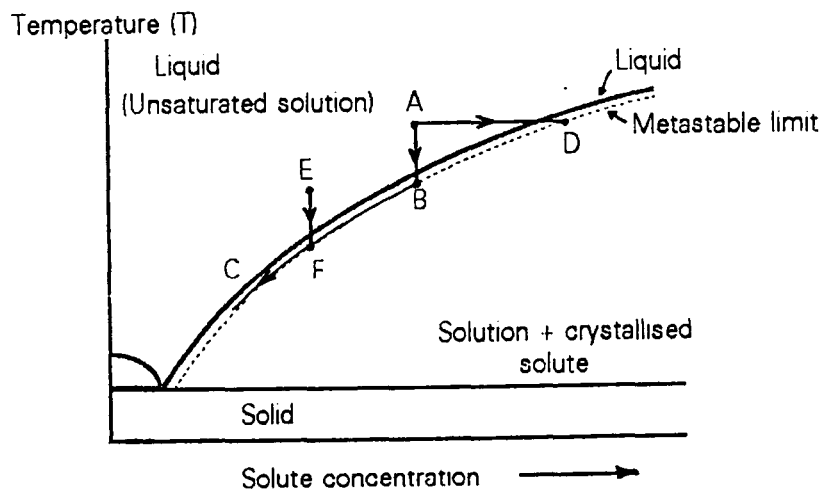
เตาสำหรับการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เป็นเตาที่ออกแบบง่าย ๆ มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปิดอย่างมิดชิด หรือ เป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง

การควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการปลูกผลึก และ เครื่องควบคุมสามารถควบคุมให้มีความสม่ำเสมอในช่วง  $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

หลังจากทำการปลูกผลึกแล้ว จำเป็นจะต้องแยกผลึกจากสารละลายที่เหลืออยู่ ผลึกจะออกมาได้ง่าย ถ้าการปลูกผลึกเกิดขึ้นบน " cold finger" ซึ่งจะนำออกมาจากเบ้าหลอม โดยการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิต่ำลง ถ้าการปลูกผลึกเกิดขึ้นบนผนังของเบ้าหลอม จะประหยัดเวลาได้โดยปล่อยให้สารละลายกลายเป็นของแข็ง หรืออีกทางหนึ่ง โดยการทำให้เบ้าหลอมเย็นและวางที่อุณหภูมิต่ำแล้วแยกตัวทำละลายออกจากผลึก กระบวนการนี้จะใช้เวลานานหลายสัปดาห์ ถ้าใช้เบ้าหลอมที่มีขนาดใหญ่

#### 4.5.3 การลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ (Slow Cooling)

การปลูกผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว ต้องการให้เกิดการอิมิตัวอย่างยิ่งยวดซึ่งทำได้โดยการลดอุณหภูมิของสารละลายอย่างช้า ๆ ทำให้ตัวทำละลาย หรือฟลักซ์หายไป หรือโดยการใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วิธีการที่จะได้ผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว : ABC เป็นวิธีการลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ .  
AD เป็นวิธีที่ทำให้ฟลักซ์หายไป และ EF เป็นวิธีใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ [1]

วิธีทำให้ฟลักซ์หายไป วิธีนี้จะมีอุณหภูมิคงที่แต่เปลี่ยนอัตราส่วนของฟลักซ์กับสารที่ ต้องการให้เกิดผลึก ฟลักซ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวจะค่อย ๆ ระบายไปที่ละน้อย ทำให้ความเข้มข้นของ สารที่ต้องการให้เกิดผลึก (solute) เพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สารละลายค่อย ๆ เปลี่ยนจากสถานะของ หลวมมาอยู่ในสถานะเมตาสเตเบิล (metastable) และเกิดผลึกได้

วิธีใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ จะลดอุณหภูมิสัมพันธ์กับระยะทางภายในเตา อยู่ในรูปอัตรา ส่วนระหว่าง อุณหภูมิต่อระยะทาง ( $dT/dx$ ) หรือ สัมพันธ์กับระยะเวลา อยู่ในรูปอัตราส่วน ระหว่าง อุณหภูมิต่อระยะเวลา ( $dT/dt$ ) สารละลายก็จะเปลี่ยนสถานะจากของหลวมมาเป็นสถานะเมตาสเตเบิล และเกิดผลึก เช่นกัน

วิธีการลดอุณหภูมิต่าง ๆ จะลดอุณหภูมิจากจุด A มายังจุด B สารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสถานะของหลวมมาเป็นสถานะเมตาสเตเบิล และเกิดเป็นผลึกบางส่วนแล้วลดอุณหภูมิลง เรื่อย ๆ ก็จะเกิดผลึกมากขึ้น วิธีนี้นิยมใช้กันมาก เพราะใช้เครื่องมือง่าย ๆ ราคาถูก เหมาะสำหรับการ ปลูกผลึกสารชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็ก

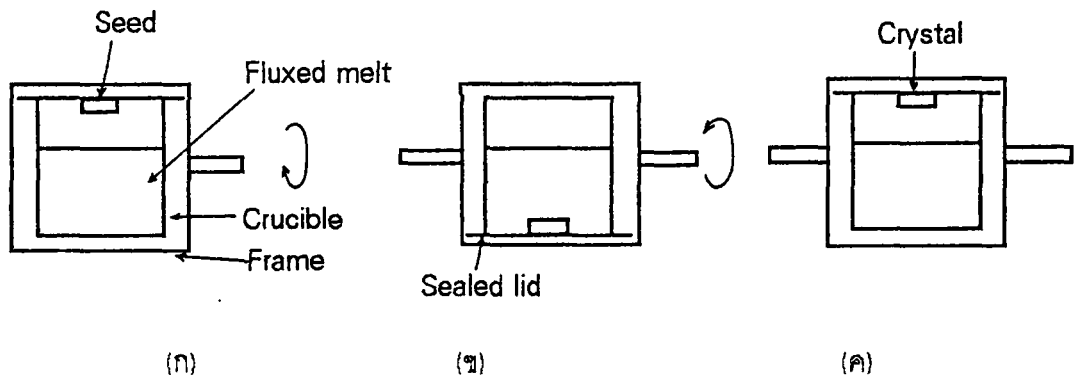
ก่อนจะทำการลดอุณหภูมิจากฟลักซ์ที่หลอม จำเป็นจะต้องรักษาอุณหภูมิที่สถานะของหลวมให้คง ที่ ประมาณ 12 - 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลาย ละลายได้สมบูรณ์แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะถ้าสารละลาย ละลายไม่ดีแล้ว อุณหภูมิที่อยู่ในสารละลายจะประทุติตัวเป็นจุดที่ก่อให้เกิด ผลึก

ในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะต้องอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นการ เกิดผลึกจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับฐานของเบ้าหลอม เมื่อลดอุณหภูมิจากบริเวณสถานะเมตาสเตเบิล ผลึกจะเริ่มเกิดจากจุดเล็ก ๆ

#### 4.5.4 การปลูกผลึกโดยใช้ผลึกเป็นตัวอย่าง (Seeded Growth)

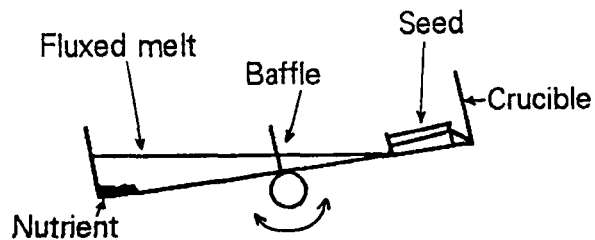
ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับจุดที่ก่อให้เกิดผลึกเล็ก ๆ จะกำจัดได้โดยการใช้ผลึกตัวอย่างที่นำมาละลายจะนำ มาลอยไว้บนผิวหน้าของสารละลาย , โดยการติดที่ฐานของเบ้าหลอม หรือ ใช้ที่จับ ความยากของ วิธีนี้ก็คือ การนำให้เกิดผลึกของตัวอย่างเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด และต้องเกิดก่อนผลึก ที่จะเกิดบนจุดที่ก่อให้เกิดผลึกเล็ก ๆ เบนเนตต์ (Bennett (1968)) และ โทลด์คอร์ดฟ(Tolksdorf (1968)) ได้ทำการทดลองโดยติดผลึกตัวอย่างที่ฝาปิดของเบ้าหลอมที่ปิดสนิท ดังรูปที่ 4.12 (ก) ลดอุณหภูมิลง ส่วน ล่างที่เป็นของเหลวช้า ๆ และพลิกเบ้าหลอม (รูปที่ 4.12 (ข)) ดังนั้นตัวอย่างก็จะจมอยู่ในสารละลายที่อิ่ม

ตัวยิ่งยวด ลดอุณหภูมิลงช้า ๆ อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานพอสมควร หลังจากนั้นจึงพลิกเบ้าหลอมกลับ (รูปที่ 4.12 (ค))



รูปที่ 4.12 เทคนิคการปลูกเบ้าหลอม

ลินเอร์ส (Linares (1968)) ใช้วิธีการคล้าย ๆ กัน แต่ใช้การเอียงเบ้าหลอมไปมา ดังรูปที่ 4.13 เมื่อเสร็จ กระบวนการปลูกผลึก เบ้าหลอม ก็จะกลับมาอยู่ในตำแหน่งปกติแล้วทำการกำจัดฟลักซ์



รูปที่ 4.13 เทคนิคการเอียงเบ้าหลอม

## บทที่ 5

### หลักในการออกแบบเตา 2 โซน

#### หลักในการออกแบบเตา [14]

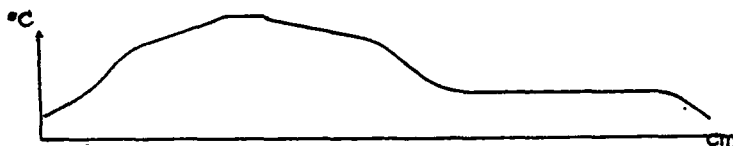
สาเหตุในการเลือกเตาไฟฟ้าชนิดขดลวดเหนียวนำ

1. สามารถควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอนและมีความไวสูง รวมทั้งการเพิ่มและลดอุณหภูมิได้ง่าย
2. อุณหภูมิที่ได้มีความสม่ำเสมอ และมีเสถียรภาพสูง ตลอดจนสามารถใช้กับขบวนการผลิตได้อย่างต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี
3. สามารถป้องกันสิ่งเจือปนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่าย
4. ในขณะที่ทำการทดลองหรือใช้งานเตาไฟฟ้าชนิดขดลวดเหนียวนำนี้จะไม่ทำให้เกิดมลภาวะ
5. สามารถสร้างขึ้นเองได้
6. ขดลวดเหนียวนำสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด

#### 5.1 ส่วนสำคัญของเตาที่ควรคำนึงถึง

##### 5.1.1 อุณหภูมิของเตา

ในการเตรียมผลึกเดี่ยว single crystal เราต้องปฏิกิริยาที่มีสูงถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  และ  $850^{\circ}\text{C}$  เพราะฉะนั้นอุณหภูมิของเตา 2 โซนสำหรับใช้ปลูกผลึกเดี่ยวจะมีลักษณะดังนี้คือ โซนแรกมีอุณหภูมิประมาณ  $1200^{\circ}\text{C}$  และโซนที่สองมีอุณหภูมิประมาณ  $850^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิของเตาจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ในขณะที่ใช้งาน นอกจากนี้สิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งก็คือจะต้องทราบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาแบบ 2 โซนนี้เพื่อที่จะให้ได้รับบริเวณที่จะต้องใช้งานก่อนการเตรียมสาร เตา 2 โซนที่ได้สร้างขึ้นนี้จะมีการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา [11]

### 5.1.2 ขดลวดนำความร้อน

วัสดุที่ใช้ในการสร้างเตานั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการใช้ในการทดสอบ ตัวอย่างเช่น ขดลวดนิโครม (nichrome) สามารถใช้ได้ถึง 1100°C ขดลวดความร้อนแคนทัล (kanthal) สามารถใช้ได้ถึง 1375°C แพททินัม (platinum) ใช้ได้ถึง 1500°C กราไฟท์ (graphite) 2200°C เนื่องจากเราใช้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 1200°C ดังนั้นขดลวดที่เลือกใช้จะต้องมีความทนต่ออุณหภูมิได้สูงกว่า 1200°C ซึ่งในการใช้งานจริง ๆ เราเลือกใช้ ขดลวดโลหะประเภทแคนทัล kanthal alloy grade A1 ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1375°C และมีราคาไม่สูงมากนัก โดยเลือกชนิดที่เป็นเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 cm

### 5.1.3 ฉนวนเตา

วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนเตาจะต้องคำนึงถึง อุณหภูมิการใช้งาน เพราะปัจจัยเหล่านี้จะมีผลอย่างมาต่ออายุการใช้งานของเตา ซึ่งโดยทั่วไปจะเลือกวัสดุที่มีอายุการใช้งานนาน ๆ ในกรณีเตาอุณหภูมิสูงนี้ พื้นที่ผิวของท่อที่จะใช้พันขดลวดจะต้องมากพอเพื่อรักษาการกระจายความร้อน สำหรับเตา 2 โชนนี้เราเลือกใช้ ปูนซีเมนต์ทนไฟ ซึ่งเลือกใช้ชนิดที่ทนอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500°C มาห่อลวดที่ขดลวดซึ่งพันอยู่รอบท่อพีวีซี ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 7.8 cm

### 5.1.4 ขนาดเตา

เตาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 7.8 cm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของปูนซีเมนต์ทนไฟที่เราห่อหรือโบกทับลงไป ซึ่งจะมีค่าประมาณ 10-12 cm



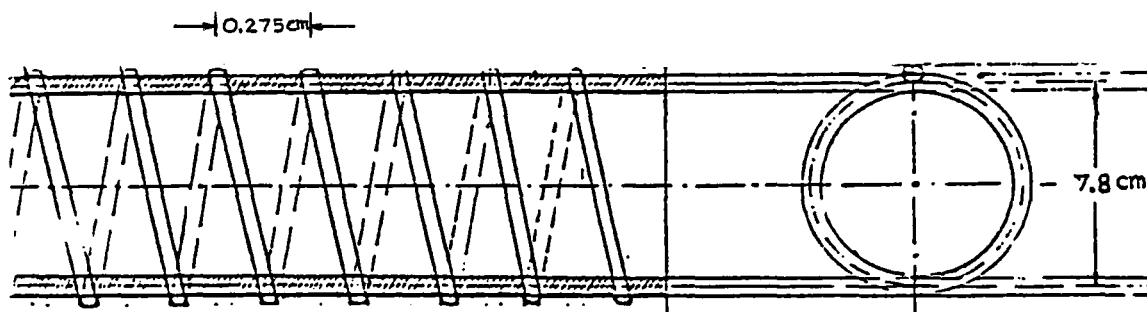
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะของเตาและขนาดเตา

### 5.1.5 การขยายตัวของขดลวด

เมื่ออุณหภูมิสูงมาก ๆ สิ่งที่ต้องเกิดขึ้นก็คือ การขยายตัวของขดลวดนำความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงสุดที่ลวดนำความร้อนสามารถทนได้จะเป็นกำหนดขอบเขตของพื้นผิวของขดลวด เพราะฉะนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงจุดนี้ เมื่อใช้ขดลวดกับเตาอุณหภูมิสูงมาก ๆ ขนาดของลวดจึงต้องไม่ใหญ่เกินไป หรืออาจกล่าวได้ว่า ขนาดของขดลวดจะแปรผันกับอุณหภูมิของเตา ซึ่งความสัมพันธ์นี้ไม่สามารถให้เห็นได้อย่างชัดเจนมากในทุก ๆ กรณี แต่จะทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของขดลวด โดยจะสามารถใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งก็คือ ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความแข็งแรงของลวดนำความร้อนจะลดลง ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ปูนซีเมนต์ทนไฟที่ทนความร้อนได้สูงกว่าความร้อนที่เราต้องการเพื่อป้องกันการขยายตัวของขดลวดจะเป็นการบังคับให้ขดลวดไม่ให้สามารถขยายตัวไปได้มากจนเกินไปเพราะเนื่องจากถูกโอบหุ้มด้วยปูนซีเมนต์ทนไฟนี้

### 5.1.6 รูปแบบของการพันขดลวด

เนื่องจากเตา 2 โชนที่เราใช้นั้นเป็นแบบอุโมงค์ (tunnel) ดังนั้นการพันขดลวดจะพันในลักษณะรอบแกนของท่อพีวีซี แล้วหล่อปูนหรือโอบหุ้มก่อนที่จะดึงท่อพีวีซีออก ในการออกแบบเราใช้ขดลวดแกนทลเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2cm พันรอบท่อมีระยะห่างระหว่างขดลวดประมาณ 0.275cm



รูปที่ 5.3 แสดงรูปแบบของการพันขดลวด

### 5.1.7 กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตา

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดนำความร้อนนั้น จะต้องสามารถให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อชดเชยความร้อนบางส่วนที่เกิดการสูญเสียไปสำหรับอุณหภูมิ ส่วนที่เกินจุดที่เราต้องการก็สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ซึ่งจะใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัวตรวจสอบ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่เราต้องการ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ก็จะทำการเปิดวงจรตัดกระแสไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง เครื่องควบคุมอุณหภูมิจึงจะทำการปิดวงจรทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปในขดลวดทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เราต้องการนั้นสามารถเลือกได้โดยตั้งที่ตัวเครื่องควบคุม เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่า เกือบไม่มีผลต่อการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพของเตาเลยเพราะอุณหภูมิของเตาจะถูกตัดโดยอัตโนมัติ ดังนั้นความต้องการพลังงานและประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ การสูญเสียความร้อน ซึ่งอาจจะเชื่อมโยงไปถึงประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนที่ใช้ อย่างไรก็ตามการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเตาก็ต้องคำนึงถึงขนาดของเตาที่ใช้ด้วยเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเปล่าประโยชน์ โดยปกติกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตานั้นนิยมใช้แวริแอค (variac) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกำลังที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามที่ต้องการ

### 5.1.8 กล่องใส่เตาและฝาปิดทั้ง 2 ด้าน

วัสดุที่นำมาทำเป็นกล่องใส่เตานั้นจะต้องมีความแข็งแรงทนทาน ซึ่งในที่นี้เลือกใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาประมาณ 0.125 cm โดยนำมาตัดและพับเป็นกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง 40 cm ยาว 40 cm และสูง 80 cm ภายในจะบรรจุเซรามิกไฟเบอร์ ซึ่งใช้เป็นฉนวนกันความร้อนโดยเซรามิกไฟเบอร์นี้มีความสมบัติเป็นฉนวนป้องกันความร้อน มีลักษณะคล้ายกับใยแก้ว สีขาว

ฝากล่องด้านบนและด้านล่าง จะหล่อขึ้นจากปูนซีเมนต์ทนไฟเพื่อความแข็งแรงในการตั้งให้เตาอยู่ในแนวตั้ง โดยหล่อให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้าง 40 cm ยาว 40 cm และหนาประมาณ 1.5-2.0 cm และเจาะให้เป็นรูตรงกลางเพื่อให้เตายื่นออกมาทั้ง 2 ด้าน

## 5.2 ระบบควบคุม

ในการควบคุมเตา 2 โชนจะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากในกระบวนการอุตสาหกรรมแบบหนึ่ง โดยจะนำสัญญาณจากกระบวนการที่ถูกควบคุมกลับมาใช้ตัดสินใจให้เป็นไปตามต้องการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

### 5.3 เทอร์โมคัปเปิล

ระบบของเตา 2 โซนจะต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลจำนวน 2 อัน เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม โดยเทอร์โมคัปเปิล 1 อันจะต่ออยู่กับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 1 ชุด เตาโซนที่มีอุณหภูมิ 1200 °C จะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด S (type S) ซึ่งสามารถใช้ในการวัดอุณหภูมิได้สูงถึงประมาณ 1600°C และเตาโซนที่อุณหภูมิ 850°C ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (type K) ซึ่งสามารถใช้งานอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 1260°C

### 5.4 ภาชนะสำหรับใส่สาร

ในการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ การเลือกภาชนะใส่สารก็มีส่วนสำคัญมากเช่นกัน วัสดุที่ใช้โดยปกติแล้วจะมีทั้งโลหะและโลหะในการสร้างภาชนะใส่สาร ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ก็คือ นิกเกิล inconal และแอสแตนเลส ที่ต่ำกว่า 1000°C และแพททินัม-อัลลอยด์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1750°C ส่วนโลหะที่นิยมใช้แก้ว ซิลิกา ซินเทรต อลูมินา แต่ที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ (2800°C) จะต้องใช้วัสดุที่หลอมยาก

การทดสอบการปลูกผลึก IGO นี้เลือกใช้เบ้าหลอมอลูมินา (alumina crucible) เนื่องจากหาได้ง่ายและสามารถใช้ได้กับวิธีการปลูกผลึกในการทำโครงงานนี้

## บทที่ 6 การทดลอง

ขั้นตอนการทดลองในการสร้างเตา 2 โชนมีดังต่อไปนี้

### 6.1 เตา 2 โชน

#### 6.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตา

1. ขดลวดความร้อน ชนิดแคนทิล มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm
2. ปูนซีเมนต์ทนไฟ มีชื่อทางการค้าว่า CAST 15
3. ฉนวนกันความร้อน ใช้เซรามิคไฟเบอร์
4. แผ่นอลูมิเนียม ใช้สำหรับฉาบกล่องใส่เตาหนา 0.125 cm
5. โครงลวดตาข่าย ช่วยให้ปูนยึดเกาะกันแน่นและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เตา
6. ท่อพีวีซี, แผ่นสังกะสี, แผ่นไม้และแผ่นพลาสติก นำมาใช้เป็นแม่แบบในการหล่อเตา

#### 6.1.2 ขั้นตอนในการสร้างเตา สามารถแยกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

##### 6.1.2.1 ท่อเตา

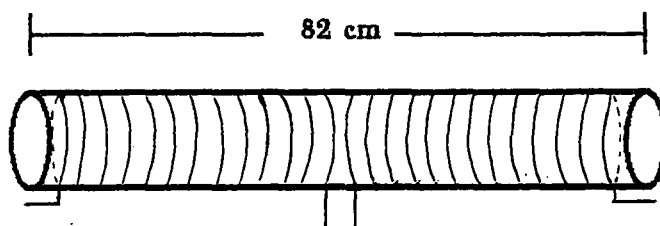
ท่อเตาจะทำการหล่อขึ้นเองโดยใช้ปูนซีเมนต์ทนไฟ มีขั้นตอนการทำดังนี้

1. นำท่อพีวีซีที่จะมาใช้เป็นแม่แบบมาผ่าออกเป็น 2 ซีกตามยาว ท่อพีวีซีที่นำมาใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 7.8 cm ยาวประมาณ 82 cm

2. นำแผ่นไม้ขนาด 3\*80\*0.4 cm จำนวน 2 แผ่น มาวางระหว่งรอยผ่าให้เสมอกับผิวนอกของท่อ แล้วใช้แผ่นไม้ขนาดเล็ก 2 แผ่น มาขันนอตยึดแผ่นไม้ไว้เพื่อไม่ให้เคลื่อนและทำให้ท่อที่ผ่าแล้วคงรูปเดิมโดยการนำแผ่นสังกะสีมาพันรอบท่อพีวีซี และรัดด้วยเข็มขัดรัดท่อ จากนั้นนำแผ่นพลาสติกมาพันรอบทับแผ่นสังกะสีอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ปูนติดกับแผ่นสังกะสีและเพื่อประโยชน์ในการถอดท่อพีวีซีอีกด้วย

3. พันขดลวดนำความร้อนไปรอบ ๆ ท่อ โดยยึดปลายข้างหนึ่งด้วยเข็มขัดรัดสายในการพันขดลวดต้องพันให้แน่นและขดลวดในแต่ละรอบจะต้องไม่สัมผัสกันด้วยเพราะอาจทำให้เกิดการลัดวงจรในขณะที่ทำการทดลองได้ ขดลวดในแต่ละรอบมีระยะห่างกันประมาณ 0.275 cm การพันขดลวดสำหรับเตา 2 โชนนี้จะต้องพันทั้งหมด 2 ชุด โดยชุดแรกมีความยาว 40 cm มีจำนวนการพันขดลวด 68 รอบ และในชุดที่สองมีความยาว 39 cm และจำนวนรอบทั้งหมด 66 รอบ และมีระยะห่างระหว่างขดลวดชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ประมาณ 3 cm ปลายของขดลวดที่บริเวณรอยต่อก็ใช้เข็มขัดรัดสายไว้เหมือนกัน หลังจากทีพันขดลวดเสร็จแล้วควรเหลือปลายในแต่ละข้างของขด

เสริมขั้วรีดสายไว้เหมือนกัน หลังจากตีพันขดลวดเสร็จแล้วควรเหลือปลายในแต่ละข้างของขดลวดไว้พอประมาณเพื่อนำมาต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานภายนอกเตา ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 6.1

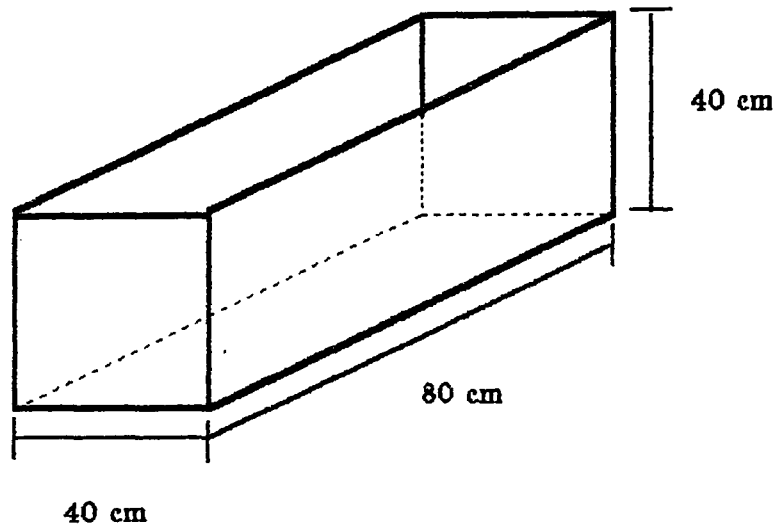


รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะการพันขดลวด

4. ทาน้ำมันให้ทั่วขดลวดและแผ่นพลาสติก เพื่อป้องกันไม่ให้ปูนติดกับแผ่นพลาสติก
  5. นำปูนซีเมนต์ทนไฟมาผสมน้ำตามอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยสังเกตจากผิวหน้าของปูนว่าจะมีลักษณะค่อนข้างแฉะ จากนั้นนำปูนที่ผสมได้มาโอบรอบขดลวดที่พันไว้แต่ไม่ต้องหนามากนัก ในการโอบปูนจะต้องโอบทีละข้างเพื่อเหลือส่วนที่อยู่ระหว่างขดลวดทั้ง 2 ขุดไว้
  6. รอให้ปูนแห้งหมาด ๆ แล้วนำลวดตาข่ายมาพันรอบปูนที่โอบทับไว้
  7. ถอดเสริมขั้วรีดสายที่อยู่ระหว่างขดลวดทั้งสองขุดออก และโอบปูนทับลงไปที่ยึดต่อแทน
  8. พันลวดตาข่ายเช่นเดียวกัน จากนั้นทำการโอบปูนทับต่อทั้งหมดอีก 1 ชั้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของท่อเตา
  9. เมื่อปูนแห้ง ถอดเอาพิมพ์ภายในออก โดยการถอดน็อตที่ติดอยู่ระหว่างแผ่นไม้ออกก่อนแล้วทำการดึงแผ่นไม้ออก จะทำให้ท่อพีวีซีที่ประกบกันอยู่ด้วยแผ่นไม้ทั้ง 2 สามารถถอดออกได้โดยง่าย จากนั้นดึงแผ่นพลาสติกออก
  10. นำท่อเตาที่ถอดแบบออกแล้วมาทำการบ่มโดยนำแช่ในน้ำเป็นเวลา 2-3 สัปดาห์ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ท่อเตา และทำให้ไม่แตกร้าวง่ายด้วย เนื่องจากน้ำจะไปทำให้ปูนเกิดการอิมตัวและขยายตัวได้อย่างเต็มที่
- ปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการหล่อเตา จะแห้งค่อนข้างเร็วคือจะแห้งภายในเวลาประมาณครึ่งชั่วโมงจึงต้องทำการหล่อด้วยความระมัดระวัง และในการหล่อเตาจะต้องพยายามไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นให้หมดเพื่อป้องกันการแตกร้าว

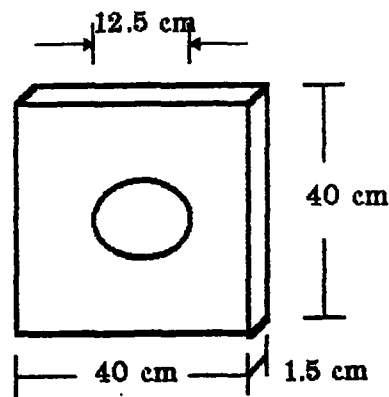
### 6.1.2.2 ส่วนประกอบอื่น ๆ ของเตา

กล่อง : นำแผ่นอลูมิเนียมมาพับ ให้มีขนาด  $40 \times 80 \times 40$  cm ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงลักษณะและขนาดของแผ่นอลูมิเนียม

ฝาเตา : หล่อปูนให้มีขนาด  $40 \times 1.5 \times 40$  cm โดยเว้นช่องเป็นวงกลมบริเวณตรงกลางให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12.5 cm เพื่อให้ท่อเตาสอดวางได้ ดังรูปที่ 6.3

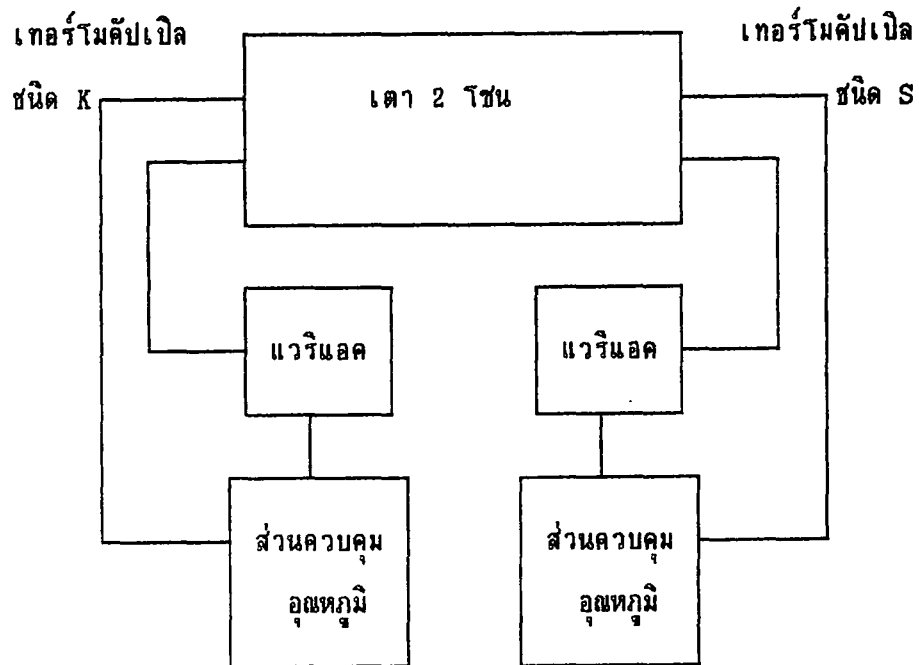


รูปที่ 6.3 แสดงลักษณะของฝาเตา

ประกอบส่วนต่าง ๆ ลงในกล่องโดยช่องว่างที่เหลือภายในบริเวณกล่องจะบรรจุเซรามิกไฟเบอร์ลงไปให้แน่นพอสมควรเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกมาภายนอกเตา

## 6.2 แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบควบคุมอุณหภูมิและแหล่งจ่ายไฟโดยระบบควบคุมอุณหภูมิเลือกใช้ระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด ( on-off ) ซึ่งระบบควบคุมนี้ทำงานร่วมกับแมกนีติกสวิตช์โดยแมกนีติกสวิตช์จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์อัตโนมัติทำหน้าที่ควบคุมการเปิดหรือปิดวงจรของระบบควบคุม และนำระบบควบคุมมาต่อกับแหล่งจ่ายไฟแบบปรับค่าได้ คือ แวริแอก ดังรูป



รูปที่ 6.4 แสดงการต่อแหล่งจ่ายพลังงานและระบบควบคุมอุณหภูมิกับเตา

ในการป้อนจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนภายในเตาทั้งสองชุดจะเหมือนกันคือ เทอร์โมคัปเปิลจะทำหน้าที่วัดอุณหภูมิแล้วส่งค่าที่อ่านหรือวัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ที่ระบบควบคุมอุณหภูมิ โดยที่ระบบควบคุมอุณหภูมิจะมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิและแมกนีติกสวิตช์ ค่าที่อ่านหรือวัดได้จะนำมาเปรียบเทียบที่เครื่องควบคุมอุณหภูมินี้จากนั้นเครื่องควบคุมจะส่งสัญญาณมาควบคุมที่แมกนีติกสวิตช์เพื่อทำการเปิดหรือปิดวงจรทำให้ได้ค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ

## 6.3 การเลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขดลวด

ในการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่ขดลวด จะต้องคำนึงถึงการขยายตัวของขดลวดนำความร้อนเมื่อขดลวดนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของขดลวดลดน้อยลง

ค่าความต้านทานของขดลวดแกนทึบ ในแต่ละชุดมีดังนี้คือ ชุดที่มีความยาว 40 cm มีค่าความต้านทาน 8.2  $\Omega$  ชุดที่มีความยาว 39 cm มีค่าความต้านทาน 7.8  $\Omega$

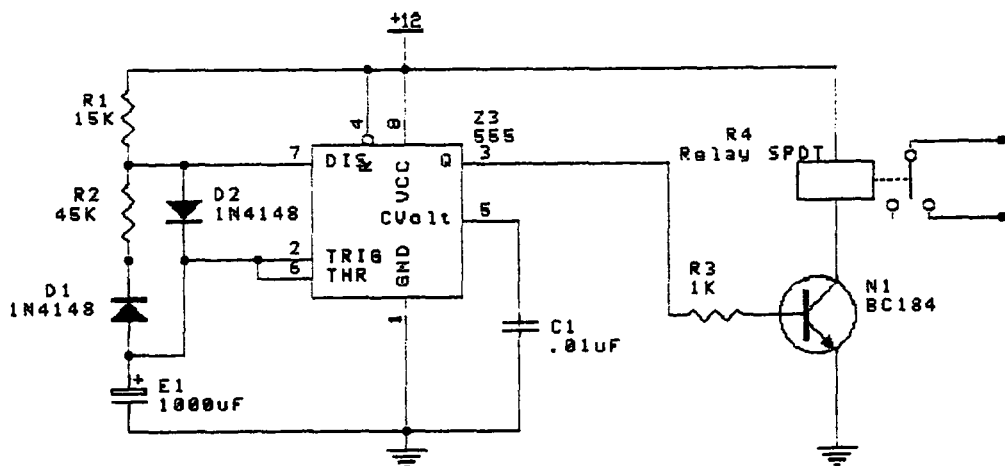
ชุดที่มีความต้านทาน  $8.2\Omega$  จะใช้เป็นโซนที่อุณหภูมิสูงจะป้อนค่าโวลท์ในช่วงที่เริ่มทำการจ่ายความร้อนในช่วงแรก ๆ 100 V แต่หลังจากที่เตาอยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว จะป้อนโวลท์ประมาณ 84 V

ชุดที่มีความต้านทาน  $7.8\Omega$  จะใช้เป็นโซนที่อุณหภูมิต่ำจะป้อนโวลท์ในลักษณะเดียวกันคือในช่วงเริ่มต้น 55 V และในช่วงสภาวะสมดุลจะเหลือ 40 V

#### 6.4 ระบบมอเตอร์

ระบบมอเตอร์นี้จะใช้สำหรับการเลื่อนสารขึ้นซึ่งจะเป็นการลดอุณหภูมิจาก  $1200^{\circ}\text{C}$  จนถึงอุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  โดยอัตราในการเลื่อนสารจะใช้อัตราประมาณ  $0.12\text{-}0.15\text{ cm/h}$

ในการเลือกมอเตอร์จะใช้มอเตอร์รอบช้าที่มีอัตราการหมุน 1 รอบ/h แต่หลังจากที่ทำการทดลอง 1 ชั่วโมงจะหมุนขึ้นเป็นระยะทาง 1 cm จึงนำวงจรรีเลย์มาควบคุมการอีกชุดหนึ่งเพื่อที่จะทำให้มอเตอร์เลื่อนขึ้นให้ได้ตามระยะที่ต้องการ



รูปที่ 6.5 แสดงวงจรรีเลย์

#### 6.5 การเตรียมสาร

##### 6.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้

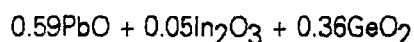
1. เ้าหลอมที่ทำจากอลูมินา ( alumina crucible )
2. สารเคมี  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ , ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

$\text{PbO}$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ Cerac

3. เครื่องซึ่งไฟฟ้าที่สามารถอ่านค่าได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. ครอบบดสาร
5. กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และเมทานอล ที่มีความเข้มข้น
6. น้ำดีไอออนซ์
- 6.5.2 ขั้นตอนในการปลูกผลึก

ก่อนที่จะทำการปลูกผลึกจะต้องทำการทดสอบเตาก่อน เพื่อหาช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมและบริเวณที่จะใช้งาน

1. ทำความสะอาดเบ้าหลอม และครอบบดสาร ด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วเป่าให้แห้ง
2. ชั่งสาร  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  และ  $\text{PbO}$  ให้มีน้ำหนักรวมกัน 40 กรัม ตามอัตราส่วนดังนี้



$$\text{น้ำหนักของ PbO} = 40 \times 0.59 = 23.6000 \text{ g.}$$

$$\text{น้ำหนักของ In}_2\text{O}_3 = 40 \times 0.05 = 2.0000 \text{ g.}$$

$$\text{น้ำหนักของ GeO}_2 = 40 \times 0.36 = 14.4000 \text{ g.}$$

3. นำสารที่ชั่งได้ทั้งหมดมาบดรวมกันให้ละเอียด ประมาณ 30 นาที

4. นำสารที่บดแล้วมาใส่เบ้าหลอมอลูมินา ปิดฝา แล้วนำมาใส่ไว้ในเตาโดยนำเบ้าหลอมอลูมินามาวางไว้ในกระเช้าที่ต่ออยู่กับระบบมอเตอร์ โดยวางไว้ในบริเวณที่เลือกจากการทดสอบเตา จากนั้นปิดฝาเตาให้สนิท เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนเกิดการถ่ายเทระหว่างภายในเตากับภายนอกเตาและเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมเข้ามากระทบกระเทือนระบบที่ทำการปลูกผลึก

5. เริ่มเผาโดยการจ่ายไฟให้กับขดลวดทั้งสองชุดพร้อม ๆ กัน โดยในโซนร้อนจะป้อนโวลต์สูงกว่าในโซนที่อุณหภูมิต่ำกว่า ค่อย ๆ ปรับโวลต์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั่วโมงละ  $100^\circ\text{C}$  จนถึง  $1200^\circ\text{C}$  และ  $650^\circ\text{C}$  ตามลำดับ และคงที่ที่อุณหภูมินี้ จะทำการเผาที่อุณหภูมิ  $1200^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

6. จากนั้นทำให้ระบบมอเตอร์ทำงาน

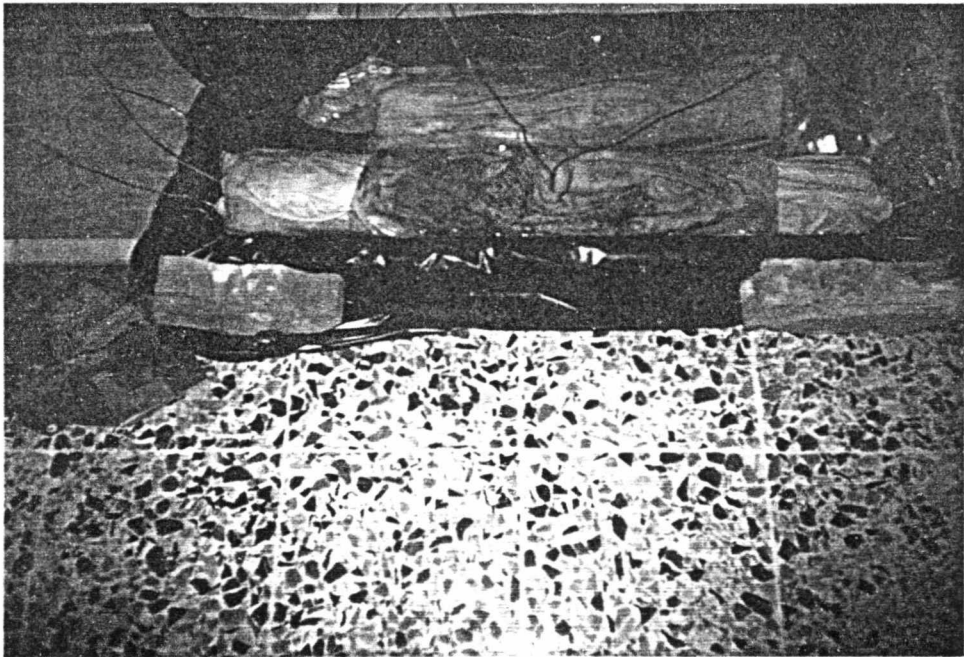
7. เมื่อระบบมอเตอร์ทำงานจนได้ระยะที่กำหนด ลดอุณหภูมิโดยการปิดแบริแอกและปล่อยให้เตาเย็นลงเอง

8. นำเบ้าหลอมออกจากเตา สังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะนำไปทดสอบต่อไป

**บทที่ 7**  
**ผลการทดลอง**

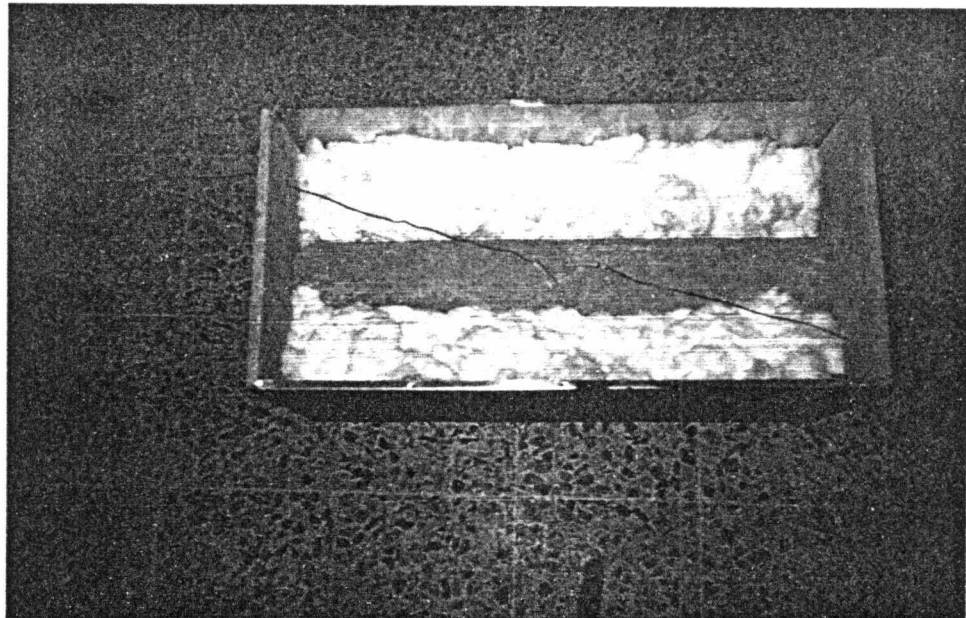
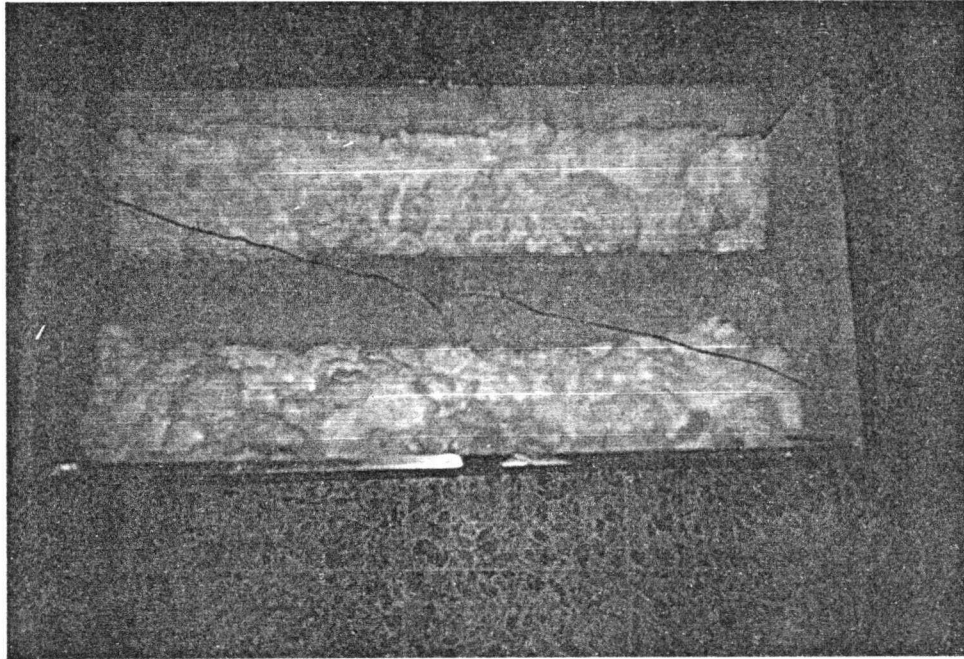
เตา 2 โชนที่ทำกาการสร้างขึ้นจะมีลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

**7.1 ท่อเตา** ภายหลังจากแกะแบบภายในออก นำมาปรมโดยการนำไปแช่ในน้ำเพื่อสร้างความแข็งแรงมากขึ้น ดังรูป 7.1



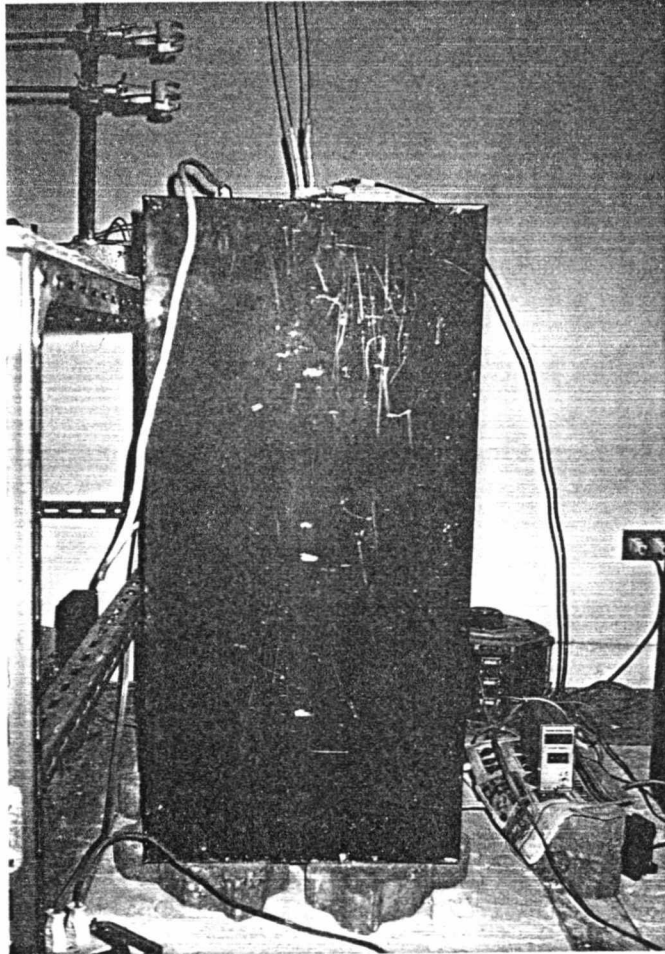
รูปที่ 7.1 แสดงท่อเตา

7.2 กล่องเตา ภายในบรรจุด้วยเซรามิกไฟเบอร์ ปลายท่อเตาจะวางอยู่ที่ฝาเตา ดังรูปที่ 7.2



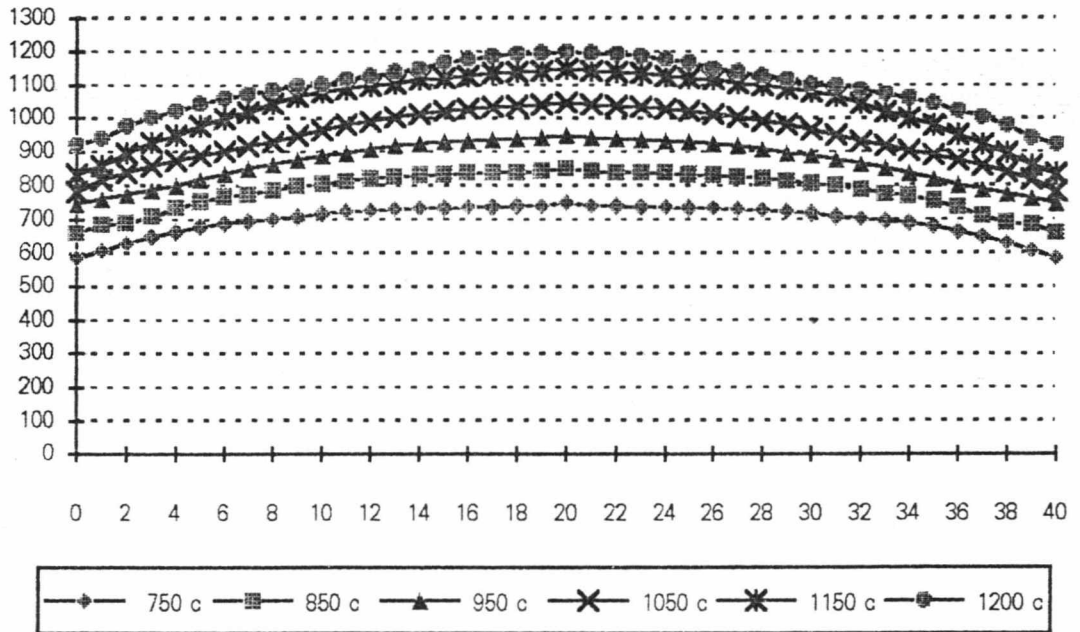
รูปที่ 7.2 แสดงลักษณะภายในกล่องเตา

จากนั้นนำเตามาต่อกับแหล่งจ่ายไฟและระบบควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 7.3

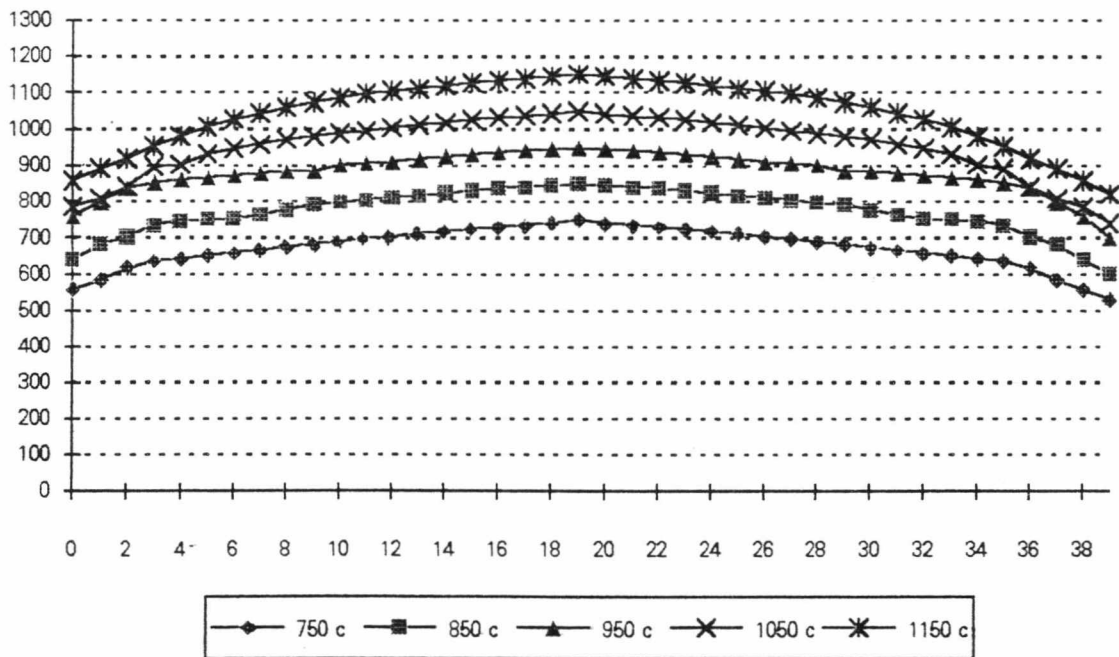


รูปที่ 7.3 แสดงการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ กับเตา

ทำการจ่ายไฟให้แก่ชุดลดความร้อนที่ละข้างปริมาณน้อย ๆ เพื่อทำการไล่น้ำออกจากเตาที่อุณหภูมิประมาณ  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงค่อย ๆ เพิ่มไฟขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อทำการทดสอบเตา พิจารณาอุณหภูมิของเตาที่ระยะต่าง ๆ ภายในเตา

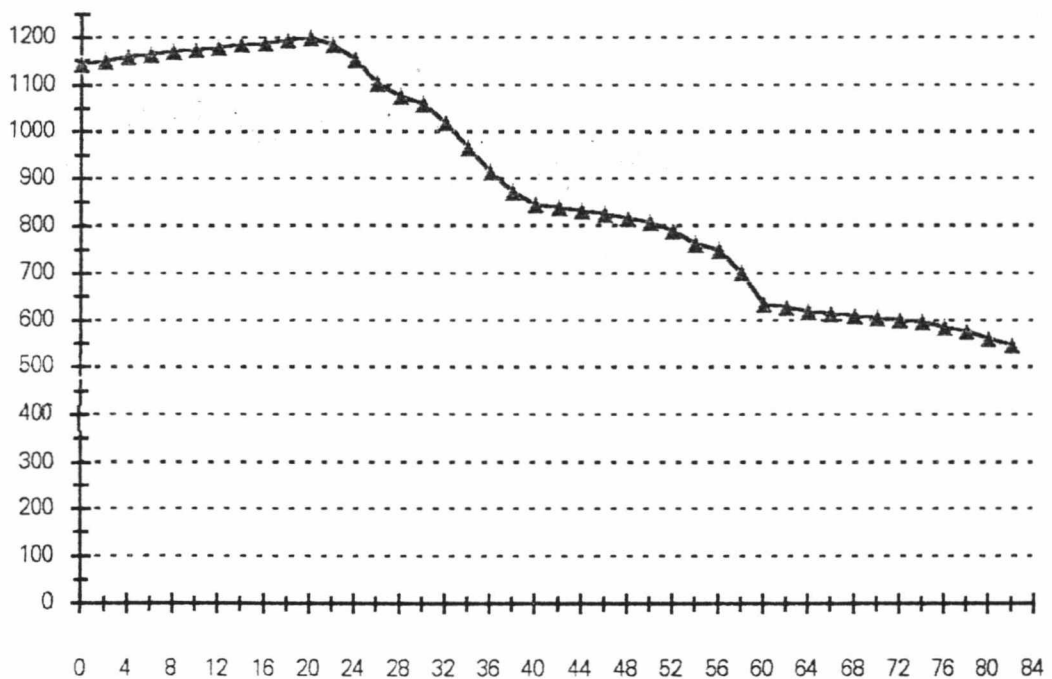


รูปที่ 7.4 แสดงลักษณะของอณุมิตที่ระยะต่าง ๆ ของเตาด้าน  $8.2 \Omega$



รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะของอณุมิตที่ระยะต่าง ๆ ของเตาด้าน  $7.8 \Omega$

หลังจากนั้นทำการโปรไฟล์เตาทั้งสองข้างพร้อม ๆ กัน โดยกำหนดให้เตาด้านที่มีความต้านทาน  $8.2 \Omega$  เป็นเตาโซนที่มีอุณหภูมิ  $1200^{\circ}\text{C}$  และกำหนดให้เตาด้านที่มีความต้านทาน  $7.8 \Omega$  เป็นเตาที่มีอุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  ทำการจ่ายไฟให้กับเตาทั้งสองด้านพร้อม ๆ กัน เพื่อทำการทดสอบเตา และนำลักษณะโปรไฟล์เตาที่ระยะทางต่าง ๆ มาทำการเลือกบริเวณที่จะทำการปลูกผลึก ลักษณะของโปรไฟล์เตา 2 โซนที่สร้างขึ้น เป็นดังรูป 7.6

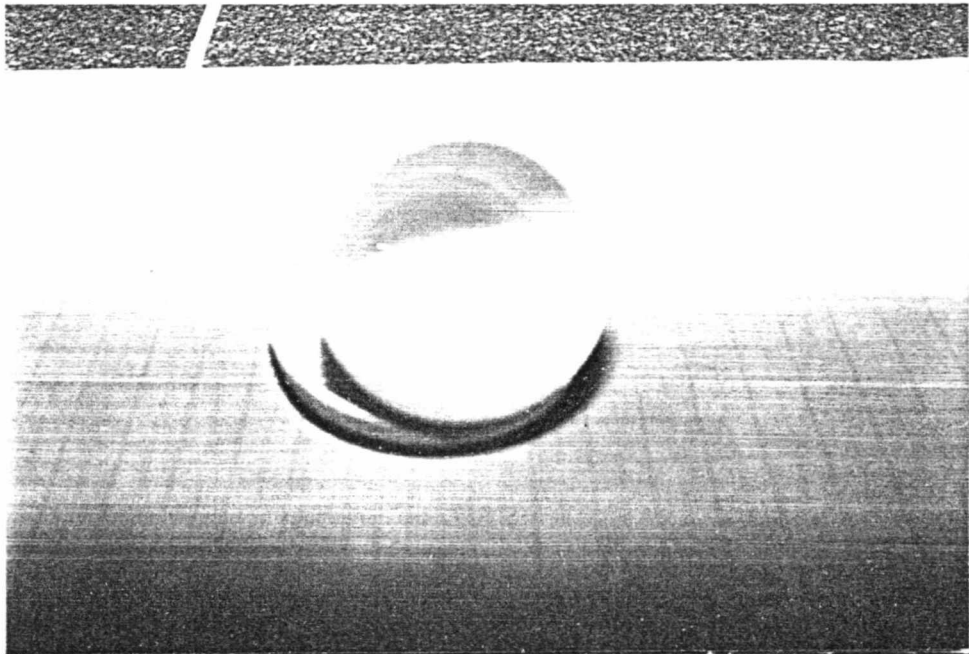


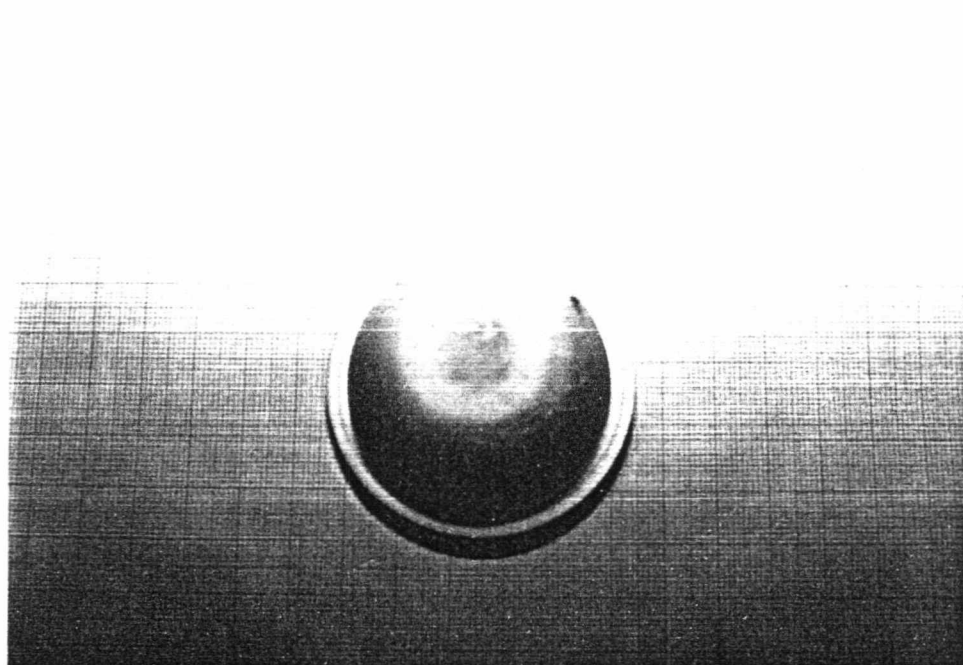
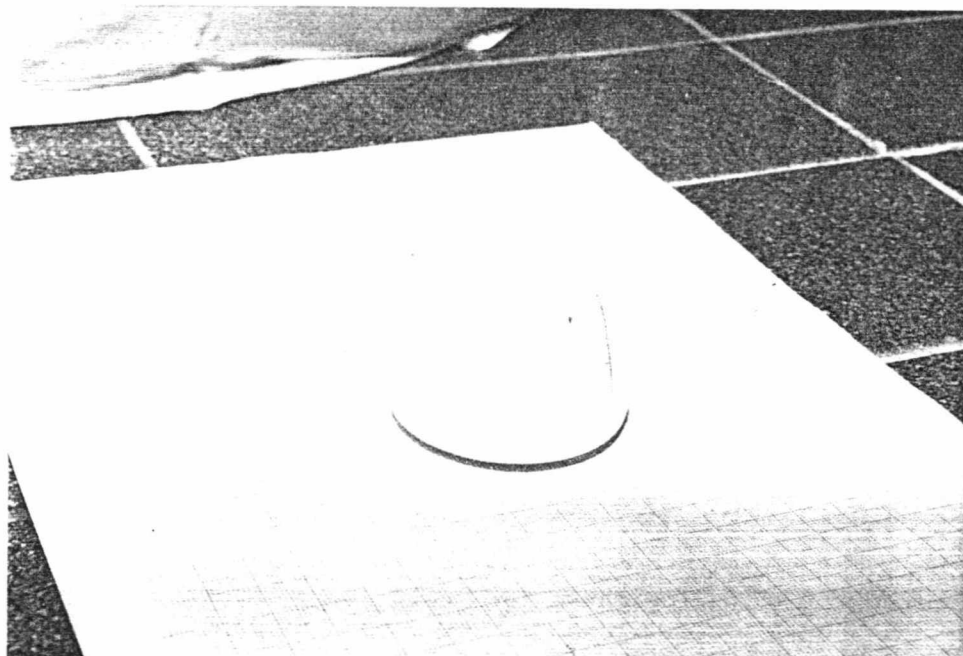
รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะของโปรไฟล์เตา 2 โซนที่สร้างขึ้น

เมื่อพิจารณาจากโปรไฟล์เตา จะได้บริเวณที่ต้องการ คือ ที่ระยะ 20-38 cm เนื่องจากโซนของอุณหภูมิที่ต้องการคือ  $850-1200^{\circ}\text{C}$  และระยะทางที่ต้องการอยู่ภายในบริเวณนี้ จากรูปที่ 7.6 เกรเดียนท์ของอุณหภูมิตามลักษณะของโปรไฟล์เตาที่ได้มานั้นจะแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงระยะ 20-26 cm ซึ่งมีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ  $16^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  ช่วงระยะ 26-30 cm มีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิเท่ากับ  $10.75^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  และช่วงสุดท้ายคือ ระยะ 30-38 cm จะมีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ  $23.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$

ในระหว่างการปลูกผลึก หลังจากที่เขาที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก็ทำการเปิดระบบการทำงานของมอเตอร์เพื่อทำการลดอุณหภูมิให้กับสารโดยการเลื่อนเบ้าหลอมขึ้นในอัตรา 1.3-1.5 cm/h หลังจากระบบมอเตอร์ทำงานจนถึงระยะที่กำหนด ทำการลดอุณหภูมิจึงโดยการปิดแบริแอด

เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิต้อง นำเบ้าหลอมออกจากเตา ลักษณะของเบ้าหลอมมีลักษณะดังรูป 7.7





รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะของเบ้าหลอมหลังจากนำออกจากเตา

พิจารณาที่น้ำหอม จะพบว่าภายในน้ำหอมจะมีลักษณะเว้าลงไป บางขึ้น มีของแข็งสีขาวปนกับสีเหลืองเหลืองอยู่ภายในบริเวณก้นและปรากฏผลึกใส โดยมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบเดรนไดรท์ ( dendrite ) มีลักษณะใส เป็นมันวาว แต่จะมีขนาดเล็กมากไม่สามารถนำมาทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้

จากการที่น้ำหอมมีลักษณะเว้าลงไปและบางขึ้นสันนิษฐานได้ว่า เกิดจากสารละลายที่อุณหภูมิสูงทำปฏิกิริยากับน้ำหอมจึงทำให้เกิดการสีกกร่อนที่ผิวของน้ำหอม นอกจากนั้นยังพบของแข็งเหลืองอยู่ในน้ำหอมน้อยมากอาจเกิดจากสารละลายระเหยไปมากขณะหลอมที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งสารละลายนั้นเกิดการซึมผ่านผนังของน้ำหอมออกมา และทำปฏิกิริยากับผนังของตระกร้าที่รองรับน้ำหอมอยู่อย่างเห็นได้ชัด

## **บทที่ 8**

### **สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ**

จากผลการทดลองในบทที่ 7 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

เตา 2 โชนที่สร้างขึ้นด้วยปูนซีเมนต์ทนไฟสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ตรงตามที่เราต้องการ คือ เตาโชนทั้ง 2 โชนทนได้สูงถึงประมาณ 1200°C แต่การนำไปใช้ในการทดสอบการปลุกผลึกของอินเดียมเยอร์มันเนียมออกไซด์ ในเตาโชนแรกจะมีอุณหภูมิสูง 1200°C และในเตาโชนที่สองจะมีอุณหภูมิสูงประมาณ 650°C เพื่อทำให้เกิดช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ คือ 850°C ในระหว่างรอยต่อของเตา 2 โชน

ระบบมอเตอร์ที่นำมาใช้ในกระบวนการปลุกผลึก ซึ่งเป็นมอเตอร์รอบช้าสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการคือ ประมาณ 1.5-1.8 cm/h

แต่ในการทดสอบการปลุกผลึกเกิดปัญหาขึ้น คือ เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่นำมาทำการปลุกผลึกกับเบ้าหลอมอลูมินาที่นำมาใช้ และผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถนำมาทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ได้

ดังนั้นในการแก้ไขปรับปรุงควรเลือกใช้เบ้าหลอมที่ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยากับสารที่นำมาทดสอบ และเพิ่มระยะในการเลื่อนของเบ้าหลอมให้มีระยะเพิ่มมากขึ้นเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายและเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายให้มากขึ้นโดยการใส่แกนเหล็กที่มีขนาดยาวกว่าเดิม

### เอกสารอ้างอิง

1. Pamplin , Brain R. , "Crystal Growth" , Vol. 6. pp. 530-538 , Pergamon Press Ltd. ,New York , 1975.
2. Laughton , MA. and Say MG. , "Electrical Engineer's Reference Book" , 14<sup>th</sup> edt. pp. 26/11-26/12 , Butterworth&Co (Publishers) Ltd. ,London , 1985.
3. Guyer , Eric C. , "Handbook of Applied Thermal Design" , pp. (12-6)-(12-7) , McGraw-Hill book Company, New York , 1988.
4. D.McGee , Thomas. , "Principle and Methods of Temperature Measurements" , pp.552-554 , John Wiley & Sons , New York , 1988.
5. Chase, A.B. and Wilcox , W.R. , "Temperature Fluctuation and Striations in Flux Crystal Growth" J.Am. Ceram. Soc. 50(6). (1967) : 332-333.
6. Wen,S.J.,Campet,G.,Portier,J.,Couturier,G. and Goodenough,J.B. "Correlation Between the Electronic Properties of Doped Indium Oxide - Ceramic and the Nature of the Doping Element" Master. Sci.Engng. B14(1992) : 115-119.
7. Galaso,F.S. in Structure and Propertiers of Inorganic Solids 1st ed.,pp. 26-27, Pergamon Press, London, 1970.
8. Suchet, J.P. in Crystal Chemistry and Semicoduction in Transition Metal Binary Compound. pp. 236-237, Academic Press, New York, 1971.
9. Mavezio, M. , "Refinement of the Crystal Structure of  $\text{In}_2\text{O}_3$  at two Wavelengths" Acta Crystal. 20(1966) . 723.
10. Electronic research Center , "Solid State technology", pp.(1-6)-(1-12), Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
11. R.Ueda and J.B. Mullin, "Crystal growth and Characterization" , pp.68-69, John Wiley & Sons, Sydney, 1974.
12. R.A.Landise, "The Growth of Single Crystal" ,pp. 240-249, Prentice-Hill,Inc., New York,1970.
13. ดุสิต เครื่องงาม, ดร."โซลิตสเดทฟิสิกส์" ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2535.

- 14.อนันต์ สมบุรณ์ศรี, สมชาย ประภามณฑล และ สมศักดิ์ ยิ่งยงศักดิ์ถาวร "การศึกษาสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, สจล., 2531.
- 15.ชาวดี พิชัยรัตน์, ศราวุธ วังบุญคง และ สมภพ ภูริวิทย์พงศ์, "เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้", โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, สจล., 2532.
- 16.พุดมีพงศ์ กนกบรรณกร และ ศุภชัย สายพิมพ์ "การสร้างเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลเทอมอลอนาไลซิส" ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์, สจล., 2535.
- 17.สมเกียรติ สุภเดช, ผศ., "ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ", พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 120-124,วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์, 2525.
- 18.สุเธียร เกียรติสุนทร, "พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม", คณะวิศวกรรมศาสตร์, สจล., 2535.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คู่มือการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ



# Digital Setting / Digital Indicator Temperature Controllers

## เครื่องวัด และควบคุม อุณหภูมิ แบบ ดิจิตอล

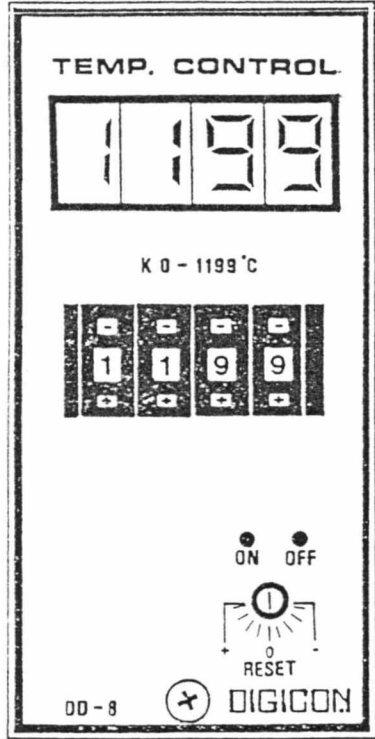
MODEL : 00-8  
00-8S

### ลักษณะเด่น

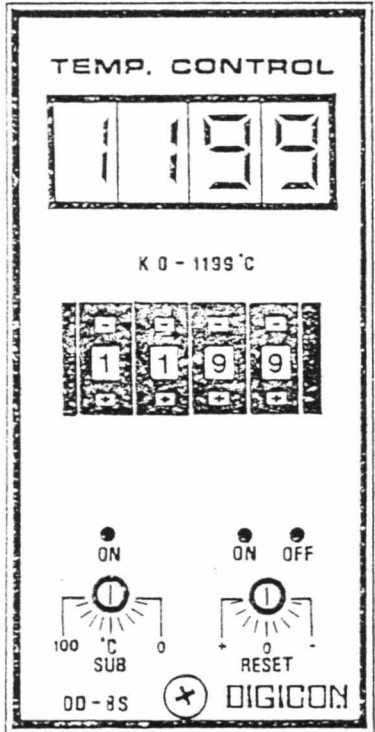
- มีขนาดรูปร่างกะทัดรัด ได้มาตรฐาน DIN (96X48 มม.)
- มีความเที่ยงตรงและประสิทธิภาพสูงด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ดิจิตอล
- การตั้งค่าของอุณหภูมิสามารถทำได้ง่ายและละเอียดถึง 1 C เพราะใช้แบบ Digital switch และข้อดีอีกอย่างคือถ้าติดคั้งกับ เครื่องที่สิ้นสະ เทือนค่าที่คั้งไว้จะ ไม่เคลื่อน
- สามารถอ่านค่าของอุณหภูมิที่วัดได้อย่างเที่ยงตรงและแน่นอน เนื่องจากใช้ LED 7 Segment เป็นตัวแสดงผล
- มีหลอด LED แสดงสภาวะการทำงานของเครื่องโดยหลอด LED สีแดงแสดงสภาวะ ON และหลอด LED สีเขียวแสดงสภาวะ OFF
- ตัวเครื่องและฝาหลังใช้วิธีการเสียบเข้าและถอดออกทางด้านหน้าโดยที่ไม่ต้องถอดสายด้านหลัง (ระบบ plug-in) ทำให้สะดวกในการตรวจสอบบำรุงรักษา
- ตัวเครื่องออกแบบให้ทนต่อแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างดี
- มีช่วงอุณหภูมิให้เลือกหลายแบบตามความเหมาะสมกับการใช้งาน รุ่น DD-8S HLH มีวงจรหน่วงเวลา การทำงานของระบบควบคุมรอง โดยให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้สูงถึงค่าอุณหภูมิที่คั้งไว้ก่อนระบบควบคุมรอง จึงจะทำงานเพื่อป้องกัน Alarm คั้งในขณะเริ่มเปิดเครื่อง เพราะอุณหภูมิยังต่ำกว่าค่าที่คั้งไว้

### คุณสมบัติมาตรฐาน

- |   |  |
|---|--|
| อินพุท                                      | : เทอร์โมคัพเพิ้ล (T/C), RTD   |
| จอแสดงผล                                    | : LED 7 segment สีแดง 3 หลักและ 3½ หลัก  |
| ระบบควบคุม                                  | : แบบ ON-OFF หรือแบบ Proportional : cycle time 20 sec.   |
| เอาต์พุท                                    | : SPDT contact relay 220V 2A   |
| ระบบควบคุมรอง (subsetting) (มีในรุ่น DD-8S) | : ควบคุมแบบ ON-OFF มีให้เลือก 3 แบบคือ Lower Limit หรือ Upper Limit (โดยหมุนปุ่ม SUB SET ไปทางลบหรือบวกตามต้องการ) Lower -Upper Limit with Hold Circuit (HLH)      |
| เอาต์พุตรอง (มีในรุ่น DD-8S)                | : SPDT contact relay 220V 2A   |
| ค่าต้านทานภายนอก                            | : สูงสุด 100 Ω สำหรับ เทอร์โมคัพเพิ้ล, 10 Ω สำหรับ RTD   |
| การชดเชยอุณหภูมิ T/C Break Protection       | : อัตโนมัตินี้ มีระบบป้องกัน เทอร์โมคัพเพิ้ลขาดหลุดหรือเสื่อมโดยตัดแหล่งจ่ายไฟเข้า Heater ทันที เมื่อเทอร์โมคัพเพิ้ล ชำรุด เพื่อไม่ให้ความร้อนสูงเกินจุดที่คั้งไว้ |
| ความเที่ยงตรงในการคั้งอุณหภูมิ              | : +0.5% ของ Full Scale   |
| ความเที่ยงตรงในการแสดงผล                    | : +0.3% ของ Full Scale   |
| วัสดุที่ทำตัวเครื่องภายนอก                  | : แผงหน้า-อลูมิเนียม ฝาครอบตัวเครื่อง-อลูมิเนียม   |
| ความชื้นสัมพัทธ์                            | : 45-85%   |
| อุณหภูมิใช้งาน                              | : 0-50 C   |
| กำลังสูญเสีย                                | : น้อยกว่า 4 VA.   |
| ใช้ไฟ                                       | : 110V/220V, 50/60HZ   |
| ขนาด  | : 96x48x145 มม.  |
| น้ำหนัก                                     | : 650 กรัม   |



DD-8



DD-8S

สำหรับ เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล MODEL DD-8 series มี 2 รุ่นคือ

- 1 รุ่น DD-8 ที่มีส่วนควบคุมหลักเพียงอย่างเดียว
- 2 รุ่น DD-8S เป็นรุ่นที่เพิ่ม SUB SET ทำให้สามารถต่อ ALARM หรือต่อพัดลม ลม-อุณหภูมิ เมื่อกรณีอุณหภูมิเกินจากที่คั้งไว้ (SUB SET)

■ ย่านความสามารถในการวัด

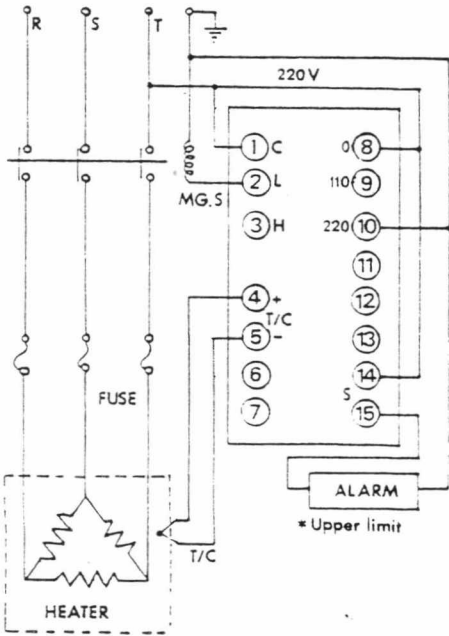
รุ่น	อินพุท	ย่านการควบคุม	Hysteresis Width	Proportional Zone	
DD-8 ไม่มี Sub Set	T/C	TYPE K	0-399°C	1.2°C	
		TYPE J	0-599°C	1.2°C	
		TYPE K	0-799°C	2.4°C	
		TYPE J	0-799°C	2.4°C	
	RTD	PT 100	-99°C ถึง +99°C	0.6°C	6°C
		PT 100	0-399°C	1.2°C	12°C

รุ่น	อินพุท	ย่านการควบคุม	Hysteresis Width	Proportional Zone	ย่าน Sub Set	
DD-8S มี Sub Set	T/C	TYPE K	0-399°C	1.2°C	12°C	
		TYPE J	0-599°C	1.2°C	12°C	
		TYPE K	0-799°C	2.4°C	24°C	
		TYPE J	0-799°C	2.4°C	24°C	
	RTD	PT 100	0-1199°C	2.4°C	24°C	0-100°C
		PT 100	0-1599°C	2.4°C	24°C	0-200°C
		PT 100	-99°C ถึง +99°C	0.6°C	6°C	
		PT 100	0-399°C	1.2°C	12°C	

หมายเหตุ 0-1599°C ช่วงการควบคุม 0-600°C จะไม่ Linear

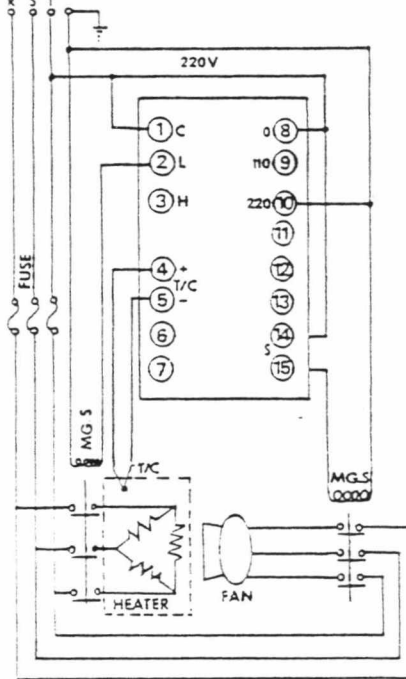
■ ตัวอย่างการต่อสายใช้งาน

AC POWER SUPPLY



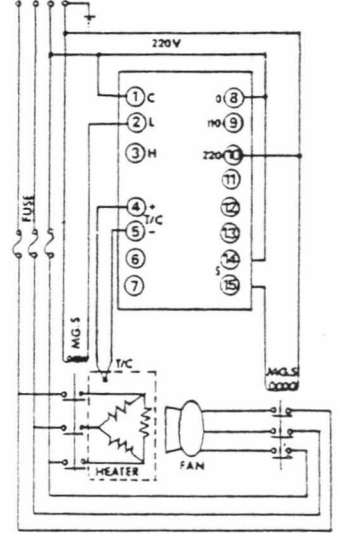
DD-8

AC POWER SUPPLY



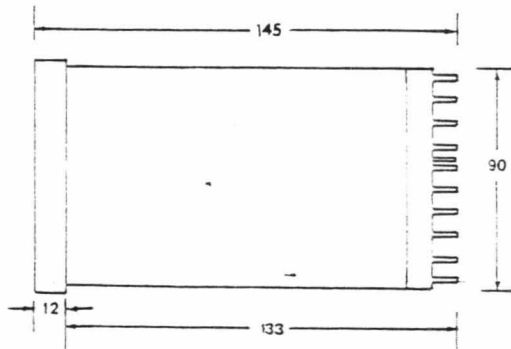
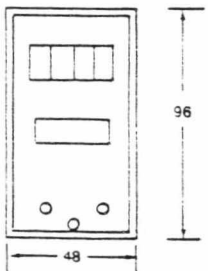
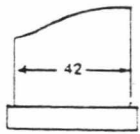
**หมายเหตุ** ในรุ่น DD-8S สามารถต่อ Alarm เป็นแบบ Lower Limit, Upper Limit หรือ Lower-Upper Limit ได้อีกด้วยและในรุ่น DD-8S HLH จะต่อ Alarm เป็นแบบ Lower Upper limit with Hold Circuit

AC POWER SUPPLY

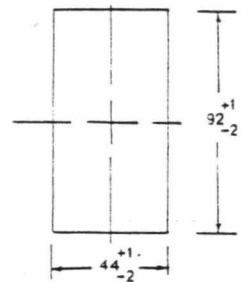


DD-8S, DD-8S  
HLH  
WITH SUB SETTING

■ ขนาดเครื่องและการติดตั้ง (หน่วยเป็น มม.)



ขนาดรูเจาะแผง



694 / 25-26 ถนนพหลโยธิน ตรงข้ามซอยวัดไม้ต้น (ซอย 15)

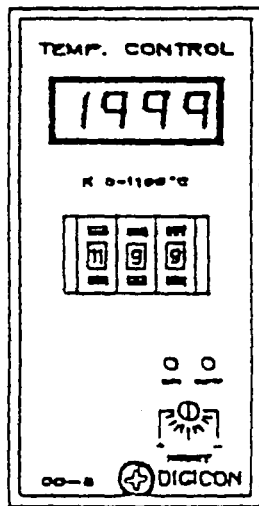
สะพานควาย กรุงเทพฯ 10400 โทรเลขชื่อย่อ อินสกรูเมนต์ กรุงเทพฯ

โทร 271-0239 (10 LINES), 271-4969-77, 270-1980-2, 278-5525, 279-7550, 279-0894-5. Fax: (02) 271-1030. Telex: 87253 SCM TH.

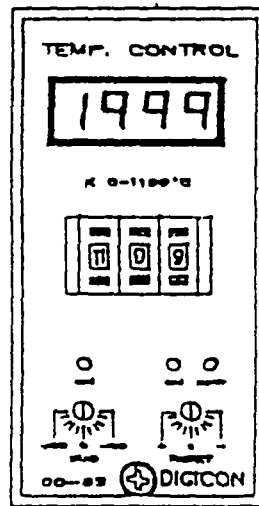
บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด



INSTRUCTION MANUAL  
OF  
TEMPERATURE CONTROLLER  
DD-8 , DD-8S



DD-8

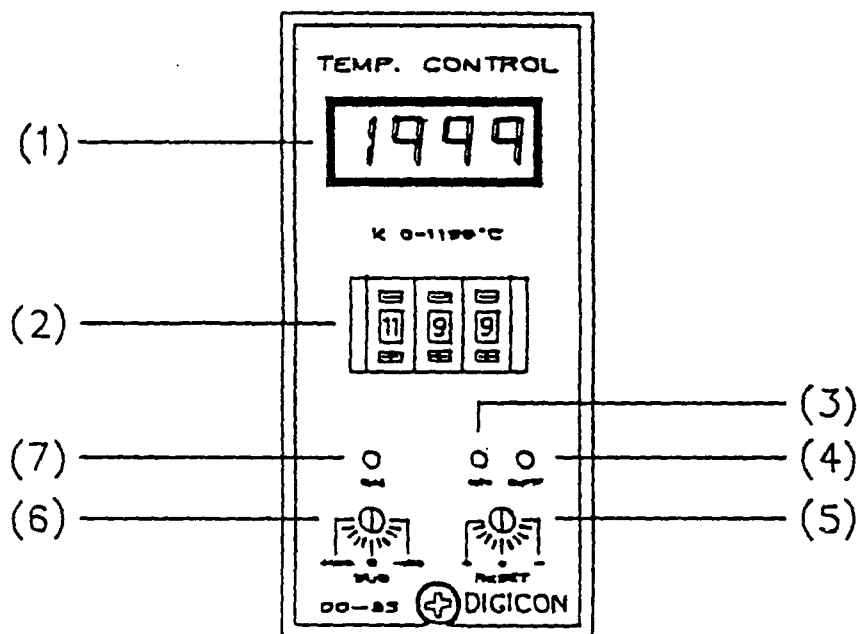


DD-8S

### CONTENTS

1. Names and Functions of the Sections .....	P.2
2. Mounting to Control Panel.....	P.3
3. Wiring Connection .....	P.4
4. Operation , Maintenance .....	P.6
5. Standard Specifications .....	P.7
6. Standard Scale Ranges .....	P.8

## 1. Names and Functions of the Sections



1) Digital display unit : Indicates the actual temperature

2) Main temperature control digital setter

: Set to the temperature to be controlled

: Relay contact output

3) Main control action ON lamp (Red)

4) Main control action OFF lamp (Green) -

5) RESET : Offset (constant deviation) is electrically corrected by reset operation (proportional action).

6) Sub action setting DD-8S HL Upper/Lower limit setting to main setting.  
DD-8S HLH Upper/Lower limit setting to main setting

with standby function.

Output is relay contact output.

Sub action ON lamp (Red)

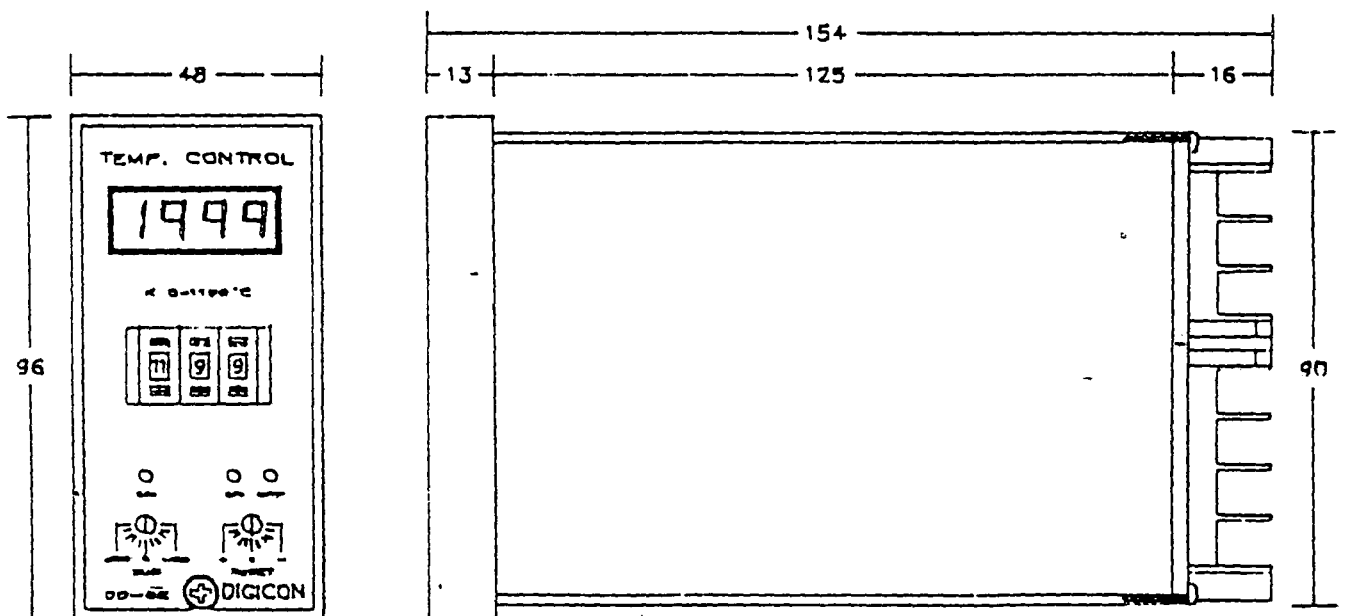
## 2. Mounting to Control Panel

### 2.1 Site selection

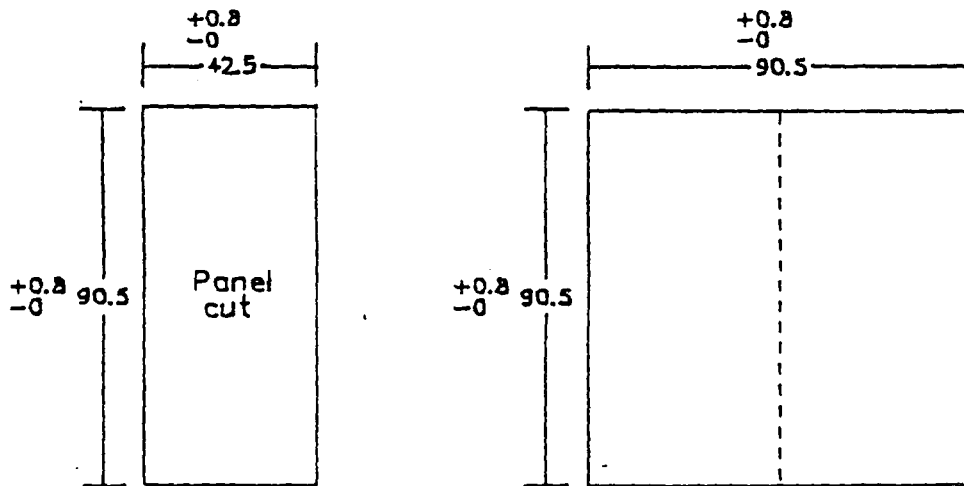
Avoid installation in such locations as shown below :

- (1) Locations where there is much dust and where corrosive gas is present.
- (2) Locations where the ambient humidity is high (85% RH or more)
- (3) Locations where the ambient temperature is below 0 °C or over 50 °C.
- (4) Locations where the device is exposed to direct sunlight.
- (5) Locations where mechanical vibration or shock is excessively large.
- (6) Locations where the device is near or around the electromagnetic switch of large capacity or cables through which high current flows.

### 2.2 External dimension drawing

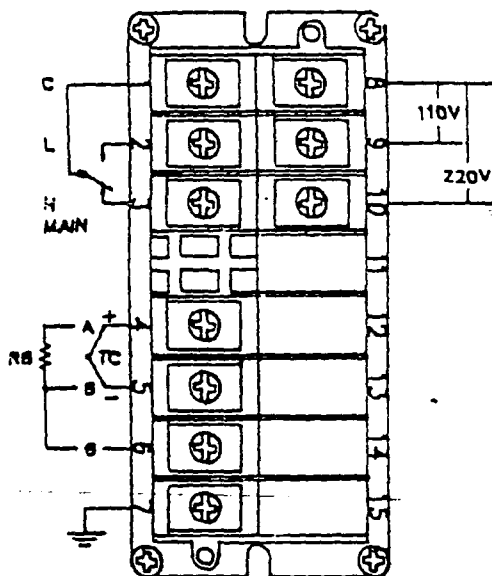


## 2.3 Panel cutout

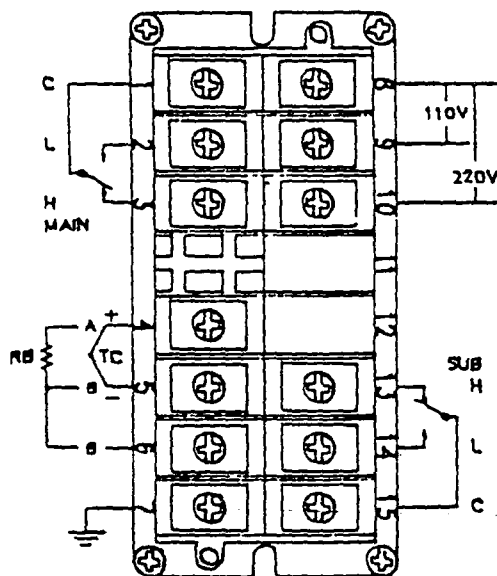


## 3. Wiring Connection

### 3.1 Terminal arrangements



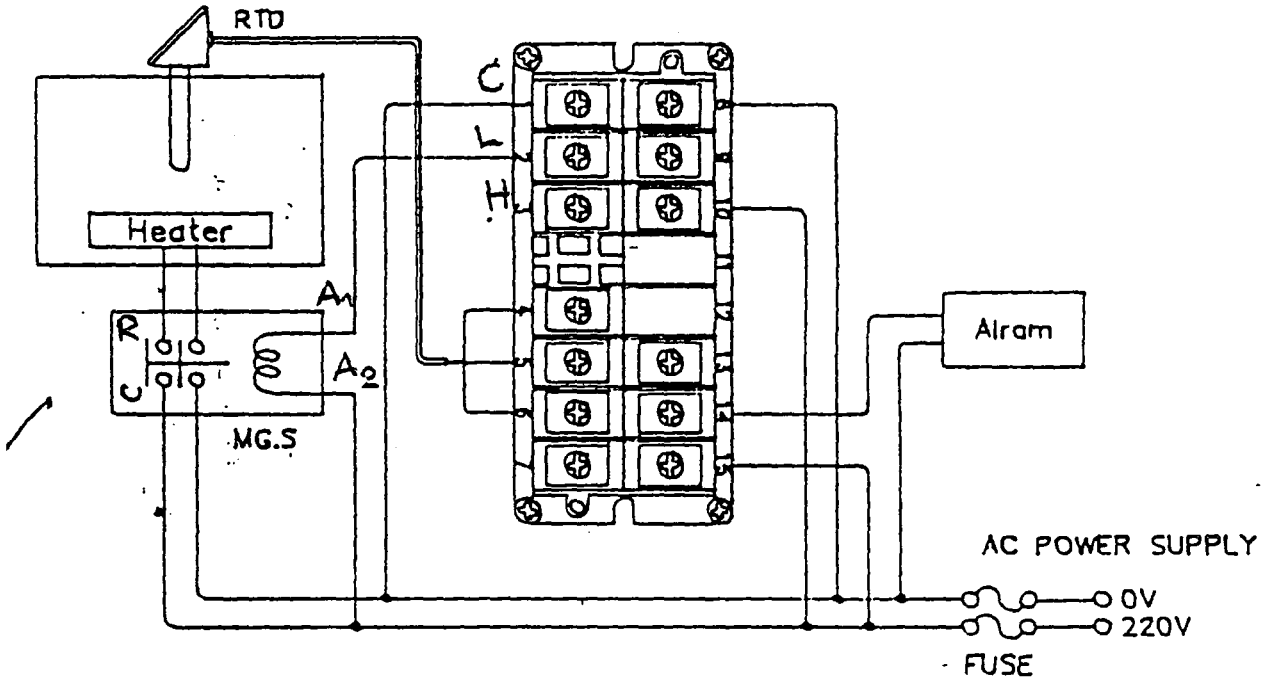
DD-8



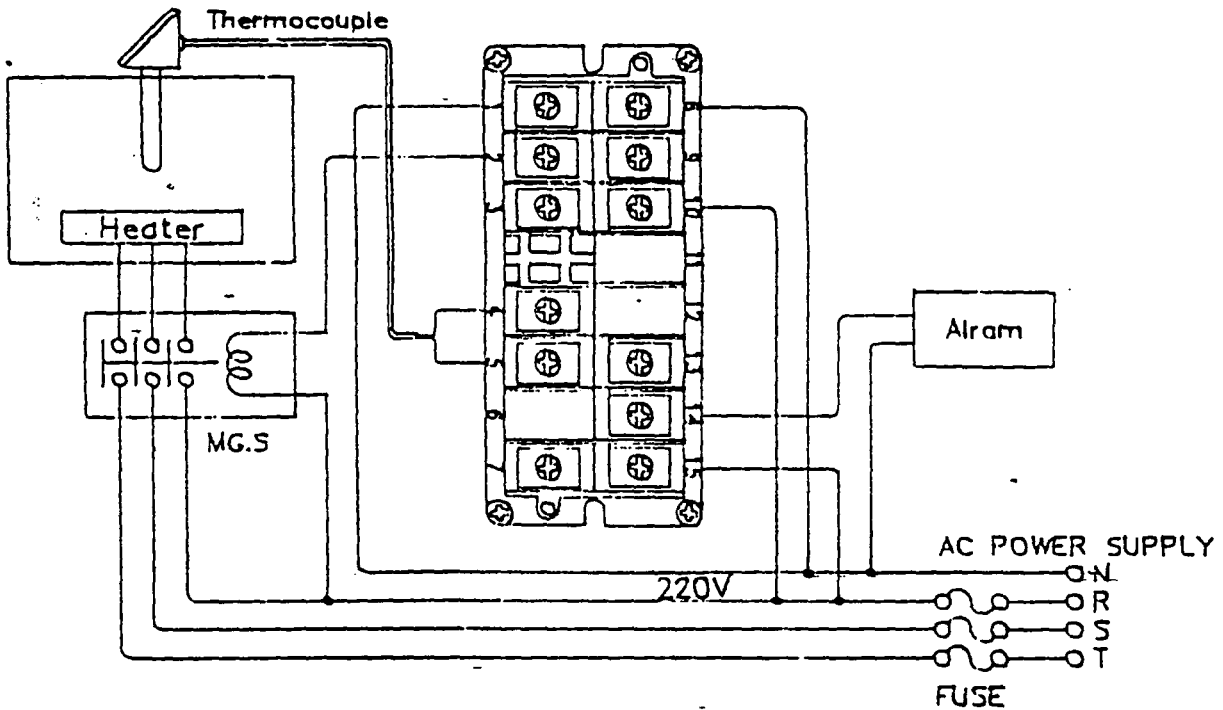
DD-8S

## 3.2 Sample wiring connections

In the case of RTD.



In the case of thermocouple.



## Operation

- 1) Set the desired temperature.
- 2) If subset (alarm) is supplied, set subset.
- 3) Apply power to the instrument.
- 4) Output ON lamp remains on till the temperature reaches the setpoint.  
In the case of proportioning controller the output ON lamp starts lighting on and off when the temperature reaches the proportional band.
- 5) With a proportioning controller the temperature may stabilize somewhere within the proportional band (offset). To eliminate this deviation, adjust reset. If the offset appears on the higher side than the setpoint, rotate reset counter clockwise. If the offset appears on the lower side than the setpoint, rotate reset clockwise.

## Maintenance

It is recommended that the instrument be checked regularly to maintain its performance.

### 1) Sensor

- Check if it is installed at a correct position.
- Replace it before its characteristics deteriorate.
- Check if it is not short-circuited or damaged.

### 2) Instrument

- Check instrument operates correctly (check output lamp action).
- Attempt regular calibration.

### 3) Output and Load Circuit

- For a relay output type, examine relay for burnout, wornout and poor contact.
- Check external operating device.

## 5. Standard Specifications

Setting	Digital setting type
Display unit	7-segment LED (red) Figure size 8.0(H) X 3.5(W) mm
Accuracy	$\pm 0.5\%$ +1 digit of scaling range full scale
Resolution	1 °C
Control operation	Two-position ( ON-OFF ) operation See hysteresis width and standard ranges Proportional operation with manual reset See proportional zone and standard ranges Cycle time is 20 seconds
Input	Thermocouple CA (K) , IC (J) , PR13% (R) R.T.D Pt-100 $\Omega$ (3-wire)
Maximum external resistance	No need adjustment up to 100 $\Omega$ (Thermocouple type) No need adjustment up to 10 $\Omega$ /wire (R.T.D. type)
Output	Main control Relay contact 5A.220V (resistive load) Sub control Relay contact 1A.220V (resistive load)
Ambient temperature	0~50 °C
Ambient humidity	45 to 85 %
Supply voltage	110V/220V AC 50/60 Hz Voltage variations $\pm 10\%$
Power consumption	Approx 2W
Dimensions	96(H) X 48(W) X 154(D) mm
Weight	Approx 640 g.
Housing	Aluminum case

6. Standard Ranges

Input	Standard scale ranges	Hysteresis width ON-OFF action	Proportional zone action
Pt-100 Ω	-99 to +99 °C	0.6 °C	6 °C
	0 to 399 °C	1.2 °C	12 °C
CA (K)	0 to 399 °C	1.2 °C	12 °C
	0 to 599 °C		
	0 to 799 °C	2.4 °C	12 °C
	0 to 1199 °C		
IC (J)	0 to 399 °C	2.4 °C	24 °C
	0 to 599 °C		
	0 to 799 °C		
PR (R)	500 to 1599 °C	2.4 °C	24 °C

ภาคผนวก ข คุณสมบัติของเซรามิกไฟเบอร์

**KAOWOOL®****CERAMIC FIBER****CERAMIC FIBER**  
**เซรามิกไฟเบอร์**

KA-1



Ceramic Fiber เป็นฉนวนชนิดใหม่ใช้สำหรับ งานที่มีปัญหาหรือต้อง

เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูงมาก ๆ เช่น งานหลอมโลหะ งานเชื่อมโลหะ Ceramic Fiber จะช่วยป้องกันชิ้นส่วนต่าง ๆ จากความร้อนสูง หรือป้องกันความร้อนภายในเตาเผาไม่ให้รั่วไหลได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วย

Ceramic Fiber เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษมีความยืดหยุ่นสูงสามารถโค้งงอได้ถึง 180° มีค่านำความร้อนที่ต่ำมาก สามารถตัดให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยเพียงแต่ใช้มีด หรือกรรไกรเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

**■ ชนิดของการใช้งาน**

■ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนรั่วไหล ในตู้อบหรือเตาเผา

■ ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนให้กับท่อ

■ ใช้ควบคุมแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์

ใช้ป้องกันแก๊สในเตาหลอมโลหะโดยการหุ้มไว้ภายใน

■ ใช้เป็นปะเก็น และซีล

■ ใช้หุ้มบริเวณข้อต่อที่มีการขยายตัว

ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนของหม้อน้ำหรือเครื่องจักรไอน้ำ ( Turbine )

■ ช่วยลดแรงเค้นในการเชื่อมและเป็นฉนวนกัน ความร้อนเวลาเชื่อม

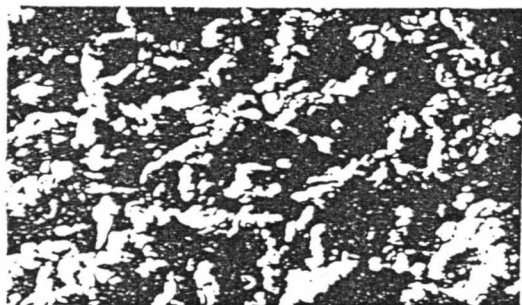
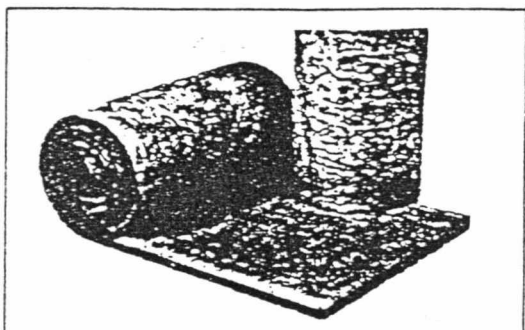
■ ใช้บุผนังห้องเพื่อป้องกันไฟไหม้

**■ CERAMIC BULK FIBER**

ทำขึ้นจาก Fiber ที่มีขนาดยาวมาก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถคืนตัวได้ดี ถึงแม้จะโดนแรงอัดอย่างมากก็ยังสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ มีน้ำหนักเบา และมีค่านำความร้อนที่ต่ำ มีค่าความหนาแน่นคงที่ ( 0.06 - 0.20 g / cm<sup>3</sup> ) นำไปใช้งานได้ง่าย โดยเพียงแต่ตั้ง หรือตัดออกก็ได้ ขนาดบรรจุ 5 กก. และ 20 กก. / กล่อง

**■ CERAMIC BLANKET**

Ceramic Blanket ทำขึ้นจาก Ceramic Fiber มีความยืดหยุ่นสูงมีน้ำหนักเบาเพียง 1/6 ของอิฐป้องกันความร้อน ( Insulating Firebrick ) เท่านั้น มีลักษณะเป็นผืนผ้ามีน้ำหนักเบาอยู่บนแกนกระดาษ สามารถนำไปบุเป็นผนังกันความร้อนรั่วไหลภายในตู้อบเตาเผาหรือเตาหลอมโลหะได้เป็นอย่างดี

**■ BULK แบบเป็นก้อนเหมือนสำลี****■ BLANKET แบบเป็นผืน**

Ceramic Fiber เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่ติดไฟมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำและมีค่าความต้านทานความร้อนที่ดีมาก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาสำหรับอุณหภูมิตั้งแต่ 1260 °C, 1400 °C, 1500 °C, และ 1600 °C ( 1600 °C จะมีส่วนผสมของ Sialon อยู่ด้วย )

ผู้แทนจำหน่ายแต่ผู้เดียวในประเทศไทย

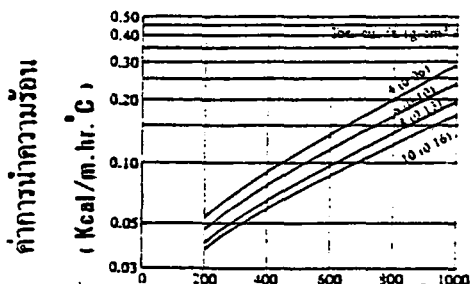
**SCM****บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด**

694/25-26 ละหานคาบย ต.ระแงง อ.ชัยภูมิ จ.ชัยภูมิ 36000  
TEL: 271-0239, 271-4969-77, 279-7550, 278-5525, 279-0894-5, 270-1980-2  
FAX: (02) 271-1030 TELEX: 87253 SCM TH

ลักษณะ	BULK แบบเป็นก้อนเหมือนสำลี	BULK แบบผืนผ้า	1400 BLANKET แบบผืนผ้า
ลักษณะ	ค่าความนำความร้อนต่ำน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นได้ดีสามารถจับให้เข้ารูปได้โดยง่ายและให้ความหนาแน่นคงที่ด้วย	เป็นลักษณะผืนผ้า มีน้ำหนักเบา	เป็นลักษณะผืนผ้ามีน้ำหนักเบา สามารถใช้ในที่ที่มีอากาศน้อยหรือสูญญากาศได้
ขนาด	มีขนาดบรรจุ 5 kg และ 20 kg	ขนาด 7,200 X 600 X 25 mm. (ยาว X กว้าง X หนา)	ขนาด 7,200 X 600 X 25 mm. (ยาว X กว้าง X หนา)
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นในการบรรจุระหว่าง 0.06 - 0.20	0.10 ( 6lb. )	0.13 ( 8lb. )
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด	1260 °C	1260 °C	1400 °C
จุดหลอมเหลว	1760 °C	1760 °C	1815 °C
ค่าการนำความร้อน (Kcal/m.hr. °C)	ที่มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm <sup>3</sup> 400 °C 0.07 kcal 600 °C 0.11 kcal 800 °C 0.16 kcal 1000 °C 0.22 kcal	ที่มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm <sup>3</sup> 400 °C 0.07 kcal 600 °C 0.10 kcal 800 °C 0.15 kcal 1000 °C 0.21 kcal	มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm <sup>3</sup> 400 °C 0.06 kcal 600 °C 0.10 kcal 800 °C 0.14 kcal 1000 °C 0.20 kcal
ตัวอย่างการนำไปใช้งาน	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้ห่อหุ้มข้อต่อของท่อที่มีการขยายตัว</li> <li>ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผา</li> <li>ใช้ใส่เพิ่มเติมให้เต็ม ในกรณีที่งานที่ใช้มันอาจจะใช้แบบ BLANKET แล้วยังเหลือที่อยู่เพียงเล็กน้อยหรือใช้ใส่ในจุดที่ใส่ BLANKET เข้าไปไม่ได้</li> <li>ใช้แทนแอสเบสทอส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผา</li> <li>ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนในขณะที่กำลังเปิดเตาเผา</li> <li>ใช้เป็นฉนวนรองรับหรือป้องกันความร้อนในขณะเชื่อมชิ้นงาน</li> <li>ใช้แทนแอสเบสทอส</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ</li> <li>ใช้เป็นฉนวนห่อหุ้มและป้องกันวัสดุชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ</li> </ul>
ราคา	250 บาท/kg	2,900 บาท/ผืน	5,400 บาท/ผืน

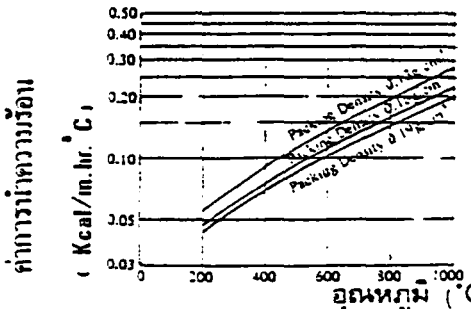
■ CERAMIC BLANKET

■ ค่าการนำความร้อนที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ



■ CERAMIC BULK

■ ค่าการนำความร้อนที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ



■ คุณสมบัติของ CERAMIC FIBER

ชื่อผลิตภัณฑ์	CERAMIC FIBER	CERAMIC FIBER 1400
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	1260	1400
สี	ขาว	ขาว
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (µm)	2.5	2.3
ความยาวของเส้นใย (mm)	- 250	- 150
ค่าความตึงจำเพาะ	2.6	2.6
ข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมี (%)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47.3	56.3
SiO <sub>2</sub>	52.3	43.3
CaO	—	—
LOI	0.0	0.0

ภาคผนวก ค ตารางการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด S และชนิด K

## TYPE S THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1968)

REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
-50	-0.236										
-40	-0.194	-0.199	-0.203	-0.207	-0.211	-0.215	-0.220	-0.224	-0.228	-0.232	-0.236
-30	-0.150	-0.155	-0.159	-0.164	-0.168	-0.173	-0.177	-0.181	-0.186	-0.190	-0.194
-20	-0.103	-0.108	-0.112	-0.117	-0.122	-0.127	-0.132	-0.136	-0.141	-0.145	-0.150
-10	-0.053	-0.058	-0.063	-0.068	-0.073	-0.078	-0.083	-0.088	-0.093	-0.098	-0.103
0	0.000	-0.005	-0.011	-0.016	-0.021	-0.027	-0.032	-0.037	-0.042	-0.048	-0.053
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.142	0.148	0.154	0.161	0.167	0.173
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.203	0.210	0.216	0.222	0.228	0.233
40	0.233	0.241	0.247	0.254	0.260	0.266	0.273	0.279	0.286	0.292	0.299
50	0.299	0.305	0.312	0.318	0.325	0.331	0.338	0.345	0.351	0.358	0.365
60	0.365	0.371	0.378	0.385	0.391	0.399	0.405	0.412	0.419	0.425	0.432
70	0.432	0.439	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502
80	0.502	0.509	0.515	0.523	0.530	0.537	0.544	0.551	0.558	0.566	0.573
90	0.573	0.580	0.587	0.594	0.602	0.609	0.616	0.623	0.631	0.638	0.645
100	0.645	0.653	0.660	0.667	0.675	0.682	0.690	0.697	0.704	0.712	0.719
110	0.719	0.727	0.734	0.742	0.749	0.757	0.764	0.772	0.780	0.787	0.795
120	0.795	0.802	0.810	0.818	0.825	0.833	0.841	0.848	0.856	0.864	0.872
130	0.872	0.879	0.887	0.895	0.903	0.910	0.918	0.926	0.934	0.942	0.950
140	0.950	0.957	0.965	0.973	0.981	0.989	0.997	1.005	1.013	1.021	1.029
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.093	1.101	1.109
160	1.109	1.117	1.125	1.133	1.141	1.149	1.158	1.166	1.174	1.182	1.190
170	1.190	1.198	1.207	1.215	1.223	1.231	1.240	1.248	1.256	1.264	1.273
180	1.273	1.281	1.289	1.297	1.306	1.314	1.322	1.331	1.339	1.347	1.356
190	1.356	1.364	1.373	1.381	1.389	1.398	1.406	1.415	1.423	1.432	1.440
200	1.440	1.448	1.457	1.465	1.474	1.482	1.491	1.499	1.508	1.516	1.525
210	1.525	1.534	1.542	1.551	1.559	1.568	1.576	1.585	1.594	1.602	1.611
220	1.611	1.620	1.628	1.637	1.645	1.654	1.663	1.671	1.680	1.689	1.698
230	1.698	1.706	1.715	1.724	1.732	1.741	1.750	1.759	1.767	1.776	1.785
240	1.785	1.794	1.802	1.811	1.820	1.829	1.838	1.846	1.855	1.864	1.873
250	1.873	1.882	1.891	1.899	1.908	1.917	1.926	1.935	1.944	1.953	1.962
260	1.962	1.971	1.979	1.988	1.997	2.006	2.015	2.024	2.033	2.042	2.051
270	2.051	2.060	2.069	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141
280	2.141	2.150	2.159	2.168	2.177	2.186	2.195	2.204	2.213	2.222	2.232
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.286	2.295	2.304	2.314	2.323
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.359	2.368	2.378	2.387	2.396	2.405	2.414
310	2.414	2.424	2.433	2.442	2.451	2.460	2.470	2.479	2.488	2.497	2.506
320	2.506	2.516	2.525	2.534	2.543	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599
330	2.599	2.608	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.852	2.861	2.870	2.880
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974
370	2.974	2.984	2.993	3.003	3.012	3.022	3.031	3.041	3.050	3.059	3.069
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.117	3.126	3.136	3.145	3.155	3.164
390	3.164	3.174	3.183	3.193	3.202	3.212	3.221	3.231	3.241	3.250	3.260
400	3.260	3.269	3.279	3.288	3.298	3.308	3.317	3.327	3.336	3.346	3.356
410	3.356	3.365	3.375	3.384	3.394	3.404	3.413	3.423	3.433	3.442	3.452
420	3.452	3.462	3.471	3.481	3.491	3.500	3.510	3.520	3.529	3.539	3.549
430	3.549	3.558	3.568	3.578	3.587	3.597	3.607	3.616	3.626	3.636	3.645
440	3.645	3.655	3.665	3.675	3.684	3.694	3.704	3.714	3.723	3.733	3.743
450	3.743	3.752	3.762	3.772	3.782	3.791	3.801	3.811	3.821	3.831	3.840
460	3.840	3.850	3.860	3.870	3.879	3.889	3.899	3.909	3.919	3.928	3.938
470	3.938	3.948	3.958	3.968	3.977	3.987	3.997	4.007	4.017	4.027	4.036
480	4.036	4.046	4.056	4.066	4.076	4.086	4.095	4.105	4.115	4.125	4.135
490	4.135	4.145	4.155	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.214	4.224	4.234
500	4.234	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.333
510	4.333	4.343	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732

## TYPE S THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1968).

REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.792	4.802	4.812	4.822	4.832
560	4.832	4.842	4.852	4.862	4.873	4.883	4.893	4.903	4.913	4.923	4.933
570	4.933	4.943	4.953	4.963	4.973	4.984	4.994	5.004	5.014	5.024	5.034
580	5.034	5.044	5.054	5.065	5.075	5.085	5.095	5.105	5.115	5.125	5.136
590	5.136	5.146	5.156	5.166	5.176	5.186	5.197	5.207	5.217	5.227	5.237
600	5.237	5.247	5.258	5.268	5.278	5.288	5.298	5.309	5.319	5.329	5.339
610	5.339	5.350	5.360	5.370	5.380	5.391	5.401	5.411	5.421	5.431	5.442
620	5.442	5.452	5.462	5.473	5.483	5.493	5.503	5.514	5.524	5.534	5.544
630	5.544	5.555	5.565	5.575	5.586	5.596	5.606	5.617	5.627	5.637	5.648
640	5.648	5.658	5.668	5.679	5.689	5.700	5.710	5.720	5.731	5.741	5.751
650	5.751	5.762	5.772	5.782	5.793	5.803	5.814	5.824	5.834	5.845	5.855
660	5.855	5.866	5.876	5.887	5.897	5.907	5.918	5.928	5.939	5.949	5.960
670	5.960	5.970	5.980	5.991	6.001	6.012	6.022	6.033	6.043	6.054	6.064
680	6.064	6.075	6.085	6.096	6.106	6.117	6.127	6.138	6.148	6.159	6.169
690	6.169	6.180	6.190	6.201	6.211	6.222	6.232	6.243	6.253	6.264	6.274
700	6.274	6.285	6.295	6.306	6.316	6.327	6.338	6.348	6.359	6.369	6.380
710	6.380	6.390	6.401	6.412	6.422	6.433	6.443	6.454	6.465	6.475	6.486
720	6.486	6.496	6.507	6.518	6.528	6.539	6.549	6.560	6.571	6.581	6.592
730	6.592	6.603	6.613	6.624	6.635	6.645	6.656	6.667	6.677	6.688	6.699
740	6.699	6.709	6.720	6.731	6.741	6.752	6.763	6.773	6.784	6.795	6.805
750	6.805	6.816	6.827	6.838	6.848	6.859	6.870	6.880	6.891	6.902	6.913
760	6.913	6.923	6.934	6.945	6.956	6.966	6.977	6.988	6.999	7.009	7.020
770	7.020	7.031	7.042	7.053	7.063	7.074	7.085	7.096	7.107	7.117	7.128
780	7.128	7.139	7.150	7.161	7.171	7.182	7.193	7.204	7.215	7.225	7.236
790	7.236	7.247	7.258	7.269	7.280	7.291	7.301	7.312	7.323	7.334	7.345
800	7.345	7.356	7.367	7.377	7.388	7.399	7.410	7.421	7.432	7.443	7.454
810	7.454	7.465	7.476	7.486	7.497	7.508	7.519	7.530	7.541	7.552	7.563
820	7.563	7.574	7.585	7.596	7.607	7.618	7.629	7.640	7.651	7.661	7.672
830	7.672	7.683	7.694	7.705	7.716	7.727	7.738	7.749	7.760	7.771	7.782
840	7.782	7.793	7.804	7.815	7.826	7.837	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892
850	7.892	7.904	7.915	7.926	7.937	7.948	7.959	7.970	7.981	7.992	8.003
860	8.003	8.014	8.025	8.036	8.047	8.058	8.069	8.081	8.092	8.103	8.114
870	8.114	8.125	8.136	8.147	8.158	8.169	8.180	8.192	8.203	8.214	8.225
880	8.225	8.236	8.247	8.258	8.270	8.281	8.292	8.303	8.314	8.325	8.336
890	8.336	8.348	8.359	8.370	8.381	8.392	8.404	8.415	8.426	8.437	8.448
900	8.448	8.460	8.471	8.482	8.493	8.504	8.516	8.527	8.538	8.549	8.560
910	8.560	8.572	8.583	8.594	8.605	8.617	8.628	8.639	8.650	8.662	8.673
920	8.673	8.684	8.695	8.707	8.718	8.729	8.741	8.752	8.763	8.774	8.786
930	8.786	8.797	8.808	8.820	8.831	8.842	8.854	8.865	8.876	8.888	8.899
940	8.899	8.910	8.922	8.933	8.944	8.956	8.967	8.978	8.990	9.001	9.012
950	9.012	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069	9.081	9.092	9.103	9.115	9.126
960	9.126	9.138	9.149	9.160	9.172	9.183	9.195	9.206	9.217	9.229	9.240
970	9.240	9.252	9.263	9.275	9.286	9.298	9.309	9.320	9.332	9.343	9.355
980	9.355	9.366	9.378	9.389	9.401	9.412	9.424	9.435	9.447	9.458	9.470
990	9.470	9.481	9.493	9.504	9.516	9.527	9.539	9.550	9.562	9.573	9.585
1,000	9.585	9.596	9.608	9.619	9.631	9.642	9.654	9.665	9.677	9.689	9.700
1,010	9.700	9.712	9.723	9.735	9.746	9.758	9.770	9.781	9.793	9.804	9.816
1,020	9.816	9.828	9.839	9.851	9.862	9.874	9.886	9.897	9.909	9.920	9.932
1,030	9.932	9.944	9.955	9.967	9.979	9.990	10.002	10.013	10.025	10.037	10.048
1,040	10.048	10.060	10.072	10.083	10.095	10.107	10.118	10.130	10.142	10.154	10.165
1,050	10.165	10.177	10.189	10.200	10.212	10.224	10.235	10.247	10.259	10.271	10.282
1,060	10.282	10.294	10.306	10.318	10.329	10.341	10.353	10.364	10.376	10.388	10.400
1,070	10.400	10.411	10.423	10.435	10.447	10.459	10.470	10.482	10.494	10.506	10.517
1,080	10.517	10.529	10.541	10.553	10.565	10.576	10.588	10.600	10.612	10.624	10.635
1,090	10.635	10.647	10.659	10.671	10.683	10.694	10.706	10.718	10.730	10.742	10.754
1,100	10.754	10.765	10.777	10.789	10.801	10.813	10.825	10.836	10.848	10.860	10.872
1,110	10.872	10.884	10.896	10.908	10.919	10.931	10.943	10.955	10.967	10.979	10.991
1,120	10.991	11.003	11.014	11.026	11.038	11.050	11.062	11.074	11.086	11.098	11.110
1,130	11.110	11.121	11.133	11.145	11.157	11.169	11.181	11.193	11.205	11.217	11.229
1,140	11.229	11.241	11.252	11.264	11.276	11.288	11.300	11.312	11.324	11.336	11.348

### TYPE S THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPITS 1968).

REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
1.150	11.348	11.360	11.372	11.384	11.396	11.408	11.420	11.432	11.443	11.455	11.467
1.160	11.467	11.479	11.491	11.503	11.515	11.527	11.539	11.551	11.563	11.575	11.587
1.170	11.587	11.599	11.611	11.623	11.635	11.647	11.659	11.671	11.683	11.695	11.707
1.180	11.707	11.719	11.731	11.743	11.755	11.767	11.779	11.791	11.803	11.815	11.827
1.190	11.827	11.839	11.851	11.863	11.875	11.887	11.899	11.911	11.923	11.935	11.947
1.200	11.947	11.959	11.971	11.983	11.995	12.007	12.019	12.031	12.043	12.055	12.067
1.210	12.067	12.079	12.091	12.103	12.116	12.128	12.140	12.152	12.164	12.176	12.188
1.220	12.188	12.200	12.212	12.224	12.236	12.248	12.260	12.272	12.284	12.296	12.308
1.230	12.308	12.320	12.332	12.344	12.357	12.369	12.381	12.393	12.405	12.417	12.429
1.240	12.429	12.441	12.453	12.465	12.477	12.489	12.501	12.514	12.526	12.538	12.550
1.250	12.550	12.562	12.574	12.586	12.598	12.610	12.622	12.634	12.647	12.659	12.671
1.260	12.671	12.683	12.695	12.707	12.719	12.731	12.743	12.755	12.767	12.780	12.792
1.270	12.792	12.804	12.816	12.828	12.840	12.852	12.864	12.876	12.888	12.901	12.913
1.280	12.913	12.925	12.937	12.949	12.961	12.973	12.985	12.997	13.010	13.022	13.034
1.290	13.034	13.046	13.058	13.070	13.082	13.094	13.107	13.119	13.131	13.143	13.155
1.300	13.155	13.167	13.179	13.191	13.203	13.216	13.228	13.240	13.252	13.264	13.276
1.310	13.276	13.288	13.300	13.313	13.325	13.337	13.349	13.361	13.373	13.385	13.397
1.320	13.397	13.410	13.422	13.434	13.446	13.458	13.470	13.482	13.495	13.507	13.519
1.330	13.519	13.531	13.543	13.555	13.567	13.579	13.592	13.604	13.616	13.628	13.640
1.340	13.640	13.652	13.664	13.677	13.689	13.701	13.713	13.725	13.737	13.749	13.761
1.350	13.761	13.774	13.786	13.798	13.810	13.822	13.834	13.846	13.859	13.871	13.883
1.360	13.883	13.895	13.907	13.919	13.931	13.943	13.955	13.968	13.980	13.992	14.004
1.370	14.004	14.016	14.028	14.040	14.053	14.065	14.077	14.089	14.101	14.113	14.125
1.380	14.125	14.138	14.150	14.162	14.174	14.186	14.198	14.210	14.222	14.235	14.247
1.390	14.247	14.259	14.271	14.283	14.295	14.307	14.319	14.332	14.344	14.356	14.368
1.400	14.368	14.380	14.392	14.404	14.416	14.429	14.441	14.453	14.465	14.477	14.489
1.410	14.489	14.501	14.513	14.525	14.538	14.550	14.562	14.574	14.586	14.598	14.610
1.420	14.610	14.622	14.635	14.647	14.659	14.671	14.683	14.695	14.707	14.719	14.731
1.430	14.731	14.744	14.756	14.768	14.780	14.792	14.804	14.816	14.828	14.840	14.852
1.440	14.852	14.865	14.877	14.889	14.901	14.913	14.925	14.937	14.949	14.961	14.973
1.450	14.973	14.985	14.998	15.010	15.022	15.034	15.046	15.058	15.070	15.082	15.094
1.460	15.094	15.106	15.118	15.130	15.143	15.155	15.167	15.179	15.191	15.203	15.215
1.470	15.215	15.227	15.239	15.251	15.263	15.275	15.287	15.299	15.311	15.324	15.336
1.480	15.336	15.348	15.360	15.372	15.384	15.396	15.408	15.420	15.432	15.444	15.456
1.490	15.456	15.468	15.480	15.492	15.504	15.516	15.528	15.540	15.552	15.564	15.576
1.500	15.576	15.588	15.601	15.613	15.625	15.637	15.649	15.661	15.673	15.685	15.697
1.510	15.697	15.709	15.721	15.733	15.745	15.757	15.769	15.781	15.793	15.805	15.817
1.520	15.817	15.829	15.841	15.853	15.865	15.877	15.889	15.901	15.913	15.925	15.937
1.530	15.937	15.949	15.961	15.973	15.985	15.997	16.009	16.021	16.033	16.045	16.057
1.540	16.057	16.069	16.080	16.092	16.104	16.116	16.128	16.140	16.152	16.164	16.176
1.550	16.176	16.188	16.200	16.212	16.224	16.236	16.248	16.260	16.272	16.284	16.296
1.560	16.296	16.308	16.319	16.331	16.343	16.355	16.367	16.379	16.391	16.403	16.415
1.570	16.415	16.427	16.439	16.451	16.462	16.474	16.486	16.498	16.510	16.522	16.534
1.580	16.534	16.546	16.558	16.569	16.581	16.593	16.605	16.617	16.629	16.641	16.653
1.590	16.653	16.664	16.676	16.688	16.700	16.712	16.724	16.736	16.747	16.759	16.771
1.600	16.771	16.783	16.795	16.807	16.819	16.830	16.842	16.854	16.866	16.878	16.890
1.610	16.890	16.901	16.913	16.925	16.937	16.949	16.960	16.972	16.984	16.996	17.008
1.620	17.008	17.019	17.031	17.043	17.055	17.067	17.078	17.090	17.102	17.114	17.125
1.630	17.125	17.137	17.149	17.161	17.173	17.184	17.196	17.208	17.220	17.231	17.243
1.640	17.243	17.255	17.267	17.278	17.290	17.302	17.313	17.325	17.337	17.349	17.360
1.650	17.360	17.372	17.384	17.396	17.407	17.419	17.431	17.442	17.454	17.466	17.477
1.660	17.477	17.489	17.501	17.512	17.524	17.536	17.548	17.559	17.571	17.583	17.594
1.670	17.594	17.606	17.617	17.629	17.641	17.652	17.664	17.676	17.687	17.699	17.711
1.680	17.711	17.722	17.734	17.745	17.757	17.769	17.780	17.792	17.803	17.815	17.826
1.690	17.826	17.838	17.850	17.861	17.873	17.884	17.896	17.907	17.919	17.930	17.942
1.700	17.942	17.953	17.965	17.976	17.988	17.999	18.010	18.022	18.033	18.045	18.056
1.710	18.056	18.068	18.079	18.090	18.102	18.113	18.124	18.136	18.147	18.158	18.170
1.720	18.170	18.181	18.192	18.204	18.215	18.226	18.237	18.249	18.260	18.271	18.282
1.730	18.282	18.293	18.305	18.316	18.327	18.338	18.349	18.360	18.372	18.383	18.394
1.740	18.394	18.405	18.416	18.427	18.438	18.449	18.460	18.471	18.482	18.493	18.504
1.750	18.504	18.515	18.526	18.536	18.547	18.558	18.569	18.580	18.591	18.602	18.612
1.760	18.612	18.623	18.634	18.645	18.655	18.666	18.677	18.687	18.698		

## TYPE K THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1948) REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.774	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.166	5.207	5.248	5.289	5.327
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499	6.539
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899	6.939
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299	7.338
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697	7.737
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097	8.137
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497	8.537
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898	8.938
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.099	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300	9.341
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705	9.745
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111	10.151
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519	10.560
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928	10.969
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339	11.381
280	11.381	11.422	11.463	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752	11.793
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166	12.207
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581	12.623
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997	13.039
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414	13.456
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832	13.874
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250	14.292
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670	14.712
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090	15.132
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510	15.552
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931	15.974
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353	16.395
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776	16.818
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199	17.241
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622	17.664
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046	18.088
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470	18.513
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895	18.938
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320	19.363
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746	19.788
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172	20.214
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598	20.640
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024	21.066
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450	21.493
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.877	21.919
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303	22.346
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729	22.772
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156	23.198
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582	23.624
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008	24.050
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434	24.476
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859	24.902
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284	25.327

## TYPE K THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1968).

REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284	25.327
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709	25.751
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133	26.176
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557	26.599
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980	27.022
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403	27.445
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825	27.867
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246	28.288
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667	28.709
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086	29.128
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505	29.547
710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.383
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757	30.799
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173	31.214
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587	31.629
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001	32.042
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414	32.455
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825	32.866
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.195	33.236	33.277
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645	33.686
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054	34.095
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461	34.502
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868	34.909
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273	35.314
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678	35.718
860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285	37.325
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684	37.724
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082	38.122
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479	38.519
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875	38.915
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270	39.310
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664	39.703
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057	40.096
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449	40.488
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.644	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840	40.879
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230	41.269
1,000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619	41.657
1,010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006	42.045
1,020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393	42.432
1,030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779	42.817
1,040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164	43.202
1,050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547	43.585
1,060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930	43.968
1,070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311	44.349
1,080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691	44.729
1,090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070	45.108
1,100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448	45.486
1,110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825	45.863
1,120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.051	46.088	46.126	46.163	46.201	46.238
1,130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575	46.612
1,140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948	46.985
1,150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319	47.356
1,160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.653	47.690	47.726
1,170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.022	48.058	48.095
1,180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426	48.462
1,190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792	48.828
1,200	48.828	48.865	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156	49.192

## TYPE K THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1948)      REFERENCE JUNCTION AT 0 C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
1.200	48.828	48.865	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156	49.192
1.210	49.192	49.229	49.265	49.301	49.338	49.374	49.410	49.446	49.483	49.519	49.555
1.220	49.595	49.591	49.627	49.663	49.700	49.736	49.772	49.808	49.844	49.880	49.916
1.230	49.916	49.952	49.988	50.024	50.060	50.096	50.132	50.168	50.204	50.240	50.276
1.240	50.276	50.311	50.347	50.383	50.419	50.455	50.491	50.526	50.562	50.598	50.633
1.250	50.633	50.669	50.705	50.741	50.776	50.812	50.847	50.883	50.919	50.954	50.990
1.260	50.990	51.025	51.061	51.096	51.132	51.167	51.203	51.238	51.274	51.309	51.344
1.270	51.344	51.380	51.415	51.450	51.486	51.521	51.556	51.592	51.627	51.662	51.697
1.280	51.697	51.733	51.768	51.803	51.838	51.873	51.908	51.943	51.979	52.014	52.049
1.290	52.049	52.084	52.119	52.154	52.189	52.224	52.259	52.294	52.329	52.364	52.398
1.300	52.398	52.433	52.468	52.503	52.538	52.573	52.608	52.642	52.677	52.712	52.747
1.310	52.747	52.781	52.816	52.851	52.886	52.920	52.955	52.989	53.024	53.059	53.093
1.320	53.093	53.128	53.162	53.197	53.232	53.266	53.301	53.335	53.370	53.404	53.439
1.330	53.439	53.473	53.507	53.542	53.576	53.611	53.645	53.679	53.714	53.748	53.782
1.340	53.782	53.817	53.851	53.885	53.920	53.954	53.988	54.022	54.057	54.091	54.125
1.350	54.125	54.159	54.193	54.228	54.262	54.296	54.330	54.364	54.398	54.432	54.466
1.360	54.466	54.501	54.535	54.569	54.603	54.637	54.671	54.705	54.739	54.773	54.807
1.370	54.807	54.841	54.875								

## **ประวัติผู้เขียน**

เกิดที่จังหวัดปราจีนบุรี จากนั้นย้ายมาอยู่ที่จังหวัดชลบุรี จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียน  
ดาราสุมุทร ชลบุรี ปี 2528 เข้าศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนอัสสัมชัญ  
ศรีราชา จ.ชลบุรี จบการศึกษาในปี 2534 และสอบเข้าศึกษาต่อในโครงการพิเศษ (โควตาสำหรับ  
นักเรียนในภาคตะวันออก) ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2534