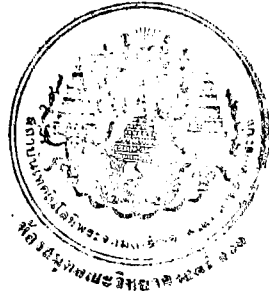




การสร้างตาข่ายใยแมงมุมในแนวตั้งสำหรับปลูกผักอินทรีย์บนดินนอกไซต์



นางสาว พนิดา ถนอมว่า

๒/๓๗.

พ.ค. ๒๕๖๗

๐๕๖๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....

วัน.เดือน.ปี.....

6.12554182

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๖๗

Tubular Vertical Furnace for Crystal Growth of Indium Tin Oxide

($\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$: ITO)

PANIDA TANOMWAM

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 การสร้างเตาโซลาร์ในแนวตั้งสำหรับปลูกผักอินทรีย์บนพื้นที่นอกไซต์
โดย นางสาวพนิดา ถนอมว่า
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ
อ.งามนิത്യ วงษ์เจริญ
ดร.ทิพรตน์ วงษ์เจริญ

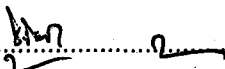
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

(ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์)

หัวหน้าภาค

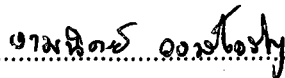
คณะกรรมการโครงการพิเศษ


(ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)

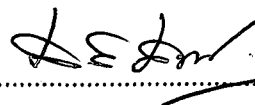
ประธานกรรมการ


(ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ)

กรรมการ


(อ.งามนิത്യ วงษ์เจริญ)

กรรมการ


(ผศ.ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้งสำหรับปลูกผลึกเดี่ยวอินเดียมทินออกไซด์	
โดย	นางสาว พนิดา	ถนอมว่า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง
	ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ
	อ.งามนิตย	วงษ์เจริญ
	ดร.ทิพย์รัตน์	วงษ์เจริญ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2537	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการสร้างเตาไฟฟ้าราคาถูกที่มีแกนกลางเป็นท่อกลวงด้วยวัสดุหลักคือ ลวดแคนทาล , ซีเมนต์ทนไฟ และ ฉนวนกันความร้อน ซึ่งวัสดุเหล่านี้สามารถจัดหาซื้อได้ภายในประเทศ เตาไฟฟ้าชนิดนี้เป็นระบบโซนเดี่ยวที่สามารถให้อุณหภูมิได้สูงกว่า $1,300^{\circ}\text{C}$ และได้ใช้เตานี้ปลูกผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีหลอมฟลักซ์ โดยใช้ $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ เป็นตัว ทำละลาย หลอมอินเดียม-ทิน-ออกไซด์กับตัวทำละลายในอัตราส่วน 7 : 93 โดยน้ำหนัก ใน เบ้าหลอมอลูมินา ที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงลดอุณหภูมิเตาลงช้า ๆ ด้วยอัตราเร็วประมาณ 4.4°C/h ด้วยอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่กกลศาสตร์ที่ต่อพ่วงเข้ากับเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเตา ผลึกอินเดียม-ทิน-ออกไซด์ที่ได้เป็นรูปลูกบาศก์สีดำ มีความยาวในแต่ละด้าน น้อยกว่า 0.1 mm. ซึ่งฝังอยู่ในผิวของเบ้าหลอม

Special Project Title	Tubular vertical furnace for crystal growth of indium tin oxide	
Name	Miss Panida	Tanomwam
Special Project Advisor	Dr. Thitinai	Gaewdang
	Dr. Chaisingh	Poo-Rakkiat
	Aj. Ngamnit	Wongjareon
	Dr. Tiparatana	Wongcharoen
Department	Applied Physics	
Academic Year	1994	

Abstract

This special project is to construct a home-made furnace with kanthal wire , fire-proof cement and ceramic fiber that can be provided in our country. It is a one-zone typed furnace that is operated at temperature higher than $1,300^{\circ}\text{C}$ and is used for crystal growth of indium tin oxide (ITO) by flux method with $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ as solvent. The 7% ITO is melt with 93% solvent in alumina crucible at $1,200^{\circ}\text{C}$ about 8 hours. then the furnace temperature is decreased at the rates of 4.4°C/h with the use semi-mechanic cooling instrument connected to a temperature controller , thermocouple. ITO single crystals are obtained. The largest one is formed in a black cubic of the size about $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$.

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด ทำให้โครงการพิเศษในหัวข้อนี้สำเร็จ
ลงได้ ไม่ว่าจะเป็น

พ่อและแม่ ที่คอยให้กำลังใจ คอยดูแล และ หาสิ่งที่ต้องการมาให้ได้เสมอ ๆ
ดร.จิตินัย แก้วแดง, ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ, อ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ
ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่ให้คำแนะนำ และ เป็นที่ปรึกษาทางด้านวิชาการ รวมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่
ใช้ในโครงการนี้ ทุกอย่าง

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์ที่จำเป็น ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง
ในโครงการพิเศษนี้

ผศ.อนุพงศ์ สรงประภา ที่กรุณาให้ยืมอุปกรณ์ที่สำคัญ หลาย ๆ อย่าง
คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ
อ.ประเสริฐ เขียวพิมพ์ภา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องเอกซเรย์
ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ในการหาโครงสร้างของผลึก

น้อง ๆ และ เพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา และเป็นกำลังใจ คอยถามความ
คืบหน้าอยู่เสมอ

รวมถึงบุคคลผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ทำให้มีวันนี้ได้

พนิดา ถนอมว่า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประโยชน์และที่มาของการปลูกผลึกด้วยเตาโซนเดี่ยว	1
1.1.1 ข้อสังเกตทั่วไปของเครื่องมือวัด	1
1.1.2 อุณหภูมิ	2
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ประโยชน์ของเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้ง	6
1.4 ขอบเขตของการทำงาน	6
บทที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิ	7
2.1 ระบบควบคุม	7
2.2 การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับและการควบคุมแบบมีการป้อนกลับ	8
2.2.1 ผลของการป้อนกลับ	9
2.2.2 กระบวนการการควบคุมแบบปิด	10
2.2.3 โหมดการทำงานของการควบคุมแบบปิด	11
2.2.4 วิธีเลือกใช้การควบคุม	19
2.2.5 วิธีเลือกตัวควบคุม	20
2.3 ตัวควบคุมแบบง่าย ๆ ในการควบคุมอุณหภูมิ	21
2.3.1 ไทริสเตอร์	21
2.3.1.1 แลทซ์ในทางอุดมคติ	21

	หน้า
2.3.1.2 การทำงานของแลทซ์	22
2.3.1.3 เบรคโอเวอร์	22
2.3.1.4 การหยุดทำงานโดยลดกระแสลง	22
2.3.1.5 สัญญาณทริกไบอัสกลับ	23
2.3.1.6 การทริก	24
2.3.2 SCR	24
2.3.2.1 แรงดันบล็อกกิ้ง	25
2.3.2.2 กระแสค่าสูง	25
2.3.2.3 ค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่ม	26
2.4 เทอร์โมคัปเปิล	27
บทที่ 3 การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์	30
3.1 การปลูกผลึกแบบต่าง ๆ	30
3.1.1 วิธีของโซคราลสกี	30
3.1.2 วิธีโซนรีไฟนิงค์	32
3.1.3 วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์	33
3.1.4 วิธีการพาไอระเหยสารเคมี	35
3.1.4.1 รีแอกชั่นแชมเบอร์	35
3.1.4.2 ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซ	37
3.1.4.3 ส่วนควบคุมลำดับและเวลา	38
3.1.4.4 แหล่งจ่ายความร้อนสำหรับขั้นฐาน	38
3.1.4.5 เซฟฟลูเอนท์แชนดิง	38
3.2 การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์	39
3.2.1 การเลือกฟลักซ์	39
3.2.2 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปฏิบัติ	40
3.2.3 การลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ	41
3.2.4 การเตรียมผลึกแบบหลอมฟลักซ์โดยใช้ผลึกเป็นตัวล่อ	42

	หน้า
บทที่ 4 โครงสร้างผลึกของ In_2O_3	44
4.1 โครงสร้างผลึก	44
4.2 โครงสร้างผลึกแบบบอดีเซนเตอร์แบบคิวบิก	46
4.3 โครงสร้างผลึกแบบนิกซีไบท์	48
4.4 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์	50
บทที่ 5 การทดลอง	51
5.1 เตาในแนวตั้ง	51
5.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา	51
5.1.2 วิธีและขั้นตอนในการสร้างเตา	52
5.1.2.1 ท่อเตา	52
5.1.2.2 ส่วนประกอบอื่น ๆ ของเตา	53
5.2 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ป้อนแก่ชุดลดความร้อน	53
5.3 แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ	58
5.3.1 หลักการทำงาน	60
5.4 การเตรียมสาร	61
5.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้	61
5.4.2 วิธีการปลูกผลึก	62
บทที่ 6 ผลการทดลอง	64
บทที่ 7 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	70
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก ก คู่มือการเลือกขนาดของชุดลดแคนท์ลล์	74
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้งาน และ รายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้	77
ภาคผนวก ค ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันของเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอส (S)	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติบางประการของลวดความต้านทานชนิดธรรมดา	5
ตารางที่ 2.1 เทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ	28
ตารางที่ 3.1 รายชื่อฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการปลูกผลึกสารแต่ละชนิด	40
ตารางที่ 4.1 โครงสร้างทางผลึกชนิดต่าง ๆ	45
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงลักษณะรูปแบบทั้ง 14 ของแลทธิสของบราเวียสใน 3 มิติ	46

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงระบบกายภาพใด ๆ	7
รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด	8
รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด	9
รูปที่ 2.4 แสดงวงจรป้อนกลับอย่างง่าย	9
รูปที่ 2.5 แผนภาพของกระบวนการควบคุมแบบปิด	10
รูปที่ 2.6 กราฟระบบควบคุมแบบเปิด - ปิด	11
รูปที่ 2.7 กราฟของระบบควบคุมแบบพรีออปโทชั่นนอล	13
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตกับค่าอัตราขยายและค่าคลาดเคลื่อน	14
รูปที่ 2.9 แสดงกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเป็นศูนย์ของโหมดเดอริเวทีฟ	15
รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของพรีออปโทชั่นนอล - อินทิกรัล	17
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนกับเอาต์พุตของการควบคุมแบบพรีออปโทชั่นนอล - เดอริเวทีฟ	18
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนกับเอาต์พุตของการควบคุมแบบพรีออปโทชั่นนอล - อินทิกรัล - เดอริเวทีฟ	19
รูปที่ 2.13 การต่อกันของแลทซ์	21
รูปที่ 2.14 การทำงานของแลทซ์	23
รูปที่ 2.15 SCR	24
รูปที่ 2.16 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	25
รูปที่ 2.17 (ก) วงจร RC สนับเบอส์	26
(ข) ตัวเหนี่ยวนำที่ช่วยลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส	26
รูปที่ 2.18 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล	27
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ	29
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีโซคราลสกี	30
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของแท่งผลึกเดี่ยวที่สร้างขึ้นได้จากวิธีโซคราลสกี	31

รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีโซลาร์ไฟนิ่งค์	32
รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีฟลอยด์ตั้งโซล	33
รูปที่ 3.5 (ก) แสดงเตา 2 โซลในแนวตั้ง เพื่อใช้ในการปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์	34
(ข) แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ	34
รูปที่ 3.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซลเดียว	34
รูปที่ 3.7 แสดงรีแอกชันแชมเบอร์ระบบแนวนอน	36
รูปที่ 3.8 แสดงรีแอกชันแชมเบอร์ระบบแนวตั้ง	36
รูปที่ 3.9 แสดงรีแอกชันแชมเบอร์ระบบทรงกระบอกหรือทรงถัง	37
รูปที่ 3.10 แสดงรีแอกชันแชมเบอร์ระบบปล่อยให้ก๊าซเจือปนกลุ่ม	37
รูปที่ 3.11 วิธีการที่จะได้ผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว	41
รูปที่ 3.12 เทคนิคการพลิกเข้าหลอม	43
รูปที่ 3.13 เทคนิคการเอียงเข้าหลอม	43
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างบอดีเซ็นเตอร์คิวบิกแบบบิกซ์ไบท์	47
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของ CaF_2 ที่มีการขาดหายไปของอะตอม	47
รูปที่ 4.3 แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของสารประกอบ ITO ที่ไม่เติมสารเจือ	48
รูปที่ 4.4 แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของสารประกอบ ITO ที่มีการเติมสารเจือ และเป็นสารนอน - สตอยชิโอเมตริก	49
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์	50
รูปที่ 5.1 ลักษณะของท่อเตา	54
รูปที่ 5.2 ลักษณะของฝาเตา	55
รูปที่ 5.3 ลักษณะของกล่อง	56
รูปที่ 5.4 แผนภาพการต่อแหล่งจ่ายพลังงาน และส่วนควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเตา	58
รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการปรับลดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติและแบบปรับลดเอง	59
รูปที่ 5.6 แสดงการต่ออุปกรณ์ลดอุณหภูมิถึงกลศาสตร์เข้ากับเทอร์โมคัปเปิล และตัวควบคุมอุณหภูมิ	61
รูปที่ 6.1 แสดงท่อเตา	64
รูปที่ 6.2 แสดงภายในกล่องเตา	65

รูปที่ 6.3	แสดงกล่องที่บรรจุจนวนกันความร้อนจนเต็ม	65
รูปที่ 6.4	แสดงการต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับเตา	66
รูปที่ 6.5	แสดงการใส่เทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในเตาเพื่อวัดอุณหภูมิ	66
รูปที่ 6.6	แสดงลักษณะของอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ภายในเตา	67
รูปที่ 6.7	แสดงลักษณะของอุปกรณ์ลดอุณหภูมิถึงกลศาสตร์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น	68
รูปที่ 6.8	แสดงเบ้าหลอมหลังจากการปลุกผลึก	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ประโยชน์และที่มาของการปลูกผลึกด้วยเตาโซนเดียว [1]

การปลูกผลึกใด ๆ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบตามโครงสร้างที่เหมาะสมในสภาวะสมดุล ซึ่งการทำให้เกิดกระบวนการเหล่านี้ ต้องมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ ให้ระบบอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้ คือ

1. อุณหภูมิในการเผา หรือ อุณหภูมิในการหลอมสาร
2. ความดันไอ
3. ระบบการลำเลียงสาร , ระบบการลำเลียงไออะตอมของก๊าซที่ใช้เป็นพาหนะในการลำเลียงสาร

4. ภาชนะบรรจุสาร

5. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วในระบบการปลูกผลึกแบบมหภาคและเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในระบบการปลูกผลึกแบบจุลภาค

จึงต้องพิจารณาเงื่อนไขต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ ในการออกแบบการวัด และ ควบคุม พารามิเตอร์ ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมา เตาโซนเดี่ยวอุณหภูมิสูงประมาณ 1300°C จึงเป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญอันหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการปลูกผลึก โดยวิธีต่าง ๆ เช่น วิธีไดเรกชันนัลฟรีซซิง (directional freezing) , วิธีบริดจ์แมน (Bridgman) , วิธีไซโคราลสกี (Czochralski) , วิธีหลอมฟลักซ์ (flux growth) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์กับการแอนนิลสาร (anneal) , การซินเทอริง (sintering) อย่างแพร่หลายมานานแล้ว ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการสร้างเตาโซนเดี่ยวเพื่อใช้ในการปลูกผลึกด้วยวิธีหลอมฟลักซ์ เพื่อเป็นพื้นฐานในการนำไปพัฒนากระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่สามารถปลูกผลึกที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.1.1 ข้อสังเกตทั่วไปของเครื่องมือวัด

ในส่วนของเครื่องมืออาจจะใช้รวบรวมสิ่งต่าง ๆ จากกฎการวัดง่าย ๆ จนถึงอุปกรณ์ที่มีการควบคุมสัญญาณที่ซับซ้อนมาก เครื่องมือทั้งหมดอาจจะถูกจัดอยู่ในประเภทใดประเภทหนึ่งตามรูปที่แบบการทำงาน คือ

1. ตัวตรวจจับ (Detectors)
2. ตัวบ่งชี้ (Indicators)
3. การวัดหรืออุปกรณ์การวัด (Measuring or metering devices)
4. ระบบควบคุม (Control system)

ตัวตรวจจับจะใช้ในกรณีที่ต้องการจับคุณสมบัติหรือสัญญาณ แต่ไม่ต้องการขนาดของสัญญาณแม่นยำนัก โดยปกติการออกแบบและโหมดการใช้งานของตัวตรวจจับโดยตรวจจับค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุดของสัญญาณที่เกิดขึ้นในขณะทำงานหรือเป็นการเตือน

นอกจากการทำการตรวจจับสัญญาณแล้ว ถ้าตรวจจับอุปกรณ์ที่เกิดปรากฏการณ์ที่เห็นได้หรือได้ยินได้จะเรียกตัวตรวจจับนั้นว่าตัวบ่งชี้ อย่างเช่น การวิเคราะห์ลมหายใจของคน

โดยทั่วไปตัวตรวจจับและตัวบ่งชี้ไม่ใช่อุปกรณ์ในการวัด (ถึงแม้จะมีหลักการเดียวกับอุปกรณ์ในการวัด) ในชุดของอุปกรณ์ที่จะระบุว่าเป็นอุปกรณ์ในการวัดจะต้องทำการปรับนั้นก็เป็นการบ่งชี้ขนาดของสัญญาณที่ตรวจจับได้ ในธรรมชาติการออกแบบอุปกรณ์ในการวัดต้องพิจารณา พารามิเตอร์หลายอย่างเช่น ความถูกต้องของสัญญาณที่วัดได้

ถ้าเครื่องมือซึ่งรวมทั้งการตรวจจับและการวัดที่ถูกออกแบบมาเพื่อต้องการผลอย่างอื่น ดังนั้นมันจึงเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมทั้งหมด ระบบควบคุมอาจจะออกแบบมาเพื่อจัดผลนั้นไว้ก่อน (เช่นนาฬิกาปลุก) หรืออาจจะออกแบบมาเพื่อตอบสนอง และเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวในสัดส่วน กับสัญญาณที่เปลี่ยนไป องค์ประกอบของการควบคุมในระบบอาจจะเป็นไปโดยธรรมชาติขึ้นอยู่กับโหมด และความถูกต้องในการวัดสัญญาณกระตุ้น

1.1.2 อุณหภูมิ

ในกระบวนการการปลูกผลึกส่วนใหญ่มีความจำเป็นที่จะก่อให้เกิด และควบคุมอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งความจริงแล้วอุณหภูมิไม่ได้เป็นพารามิเตอร์ที่เป็นปัญหาสากลซึ่งผู้ดำเนินการปลูกผลึกจะเป็นคนทำเพื่อให้บรรลุจุดมุ่งหมายของการทดลอง ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ในการพิจารณาวิธีการเพิ่มอุณหภูมิ การวัด และการควบคุมอุณหภูมิ การทำให้อุณหภูมิต่ำเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการปลูกผลึกสารบางตัวซึ่งจะไม่ขอก้าว ณ ที่นี้

วิธีการให้ความร้อน

อุณหภูมิที่ใช้งานได้ถูกต้องอย่างอุณหภูมิของการหลอมเหลวหรือของสารละลายขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อน ภาชนะที่ส่งผ่านอุณหภูมิ และการใช้ประโยชน์การส่งผ่านความร้อนเชิงเรขาคณิตในระบบการปลูกผลึก

การเลือกวิธีการให้ความร้อนเพื่อการปลูกผลึกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเหล่านี้ คือ

1. ขนาดของอุณหภูมิที่ใช้งาน
2. หลักการวิธีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังเป้าหมาย เช่น การแผ่รังสี การนำ หรือการพา

3. อัตราการส่งผ่านความร้อน หรืออัตราการให้ความร้อน

4. ใช้หน่วยของอุณหภูมิหน่วยเดียวกัน ปริมาตร (หรือพื้นที่) ของอุณหภูมิเท่ากัน และรูปร่างของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (temperature gradients) เหมือนกัน

5. ความต้องการของการโปรแกรมอุณหภูมิ และ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

6. สภาพแวดล้อมของการทำงาน (เช่น บรรยากาศของเตา)

7. ราคา และ ความสะดวกในการใช้งานอุปกรณ์ที่ให้ความร้อน

วิธีการให้ความร้อนชนิดต่าง ๆ สำหรับการปลูกผลึกอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ เช่น

1. การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟ
2. การให้ความร้อนด้วยลวดความต้านทานทางตรงและทางอ้อม
3. การให้ความร้อนด้วยความถี่สูง
4. การให้ความร้อนด้วยลำอิเล็กตรอน
5. การให้ความร้อนด้วยก๊าซที่ร้อนจัด เช่น หลอดบรรจุก๊าซ การให้ความร้อนด้วยการอาร์ค

6. การแผ่รังสีจากจุดรวม เช่น การให้ความร้อนด้วยโฟตอน

การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟ

- เปลวไฟจากอากาศ-เชื้อเพลิง (คือ อากาศ + ก๊าซพวกไฮโดรคาร์บอนและถ่านก๊าซ) ใช้ในอุณหภูมิต่ำกว่า 1727°C

- เปลวไฟจาก ก๊าซออกซิเจน - ถ่านหิน (oxy-coal gas) , ก๊าซออกซิเจน - ไฮโดรเจน (oxy-hydrogen) และ ก๊าซออกซิเจน - อะเซทิลีน (oxy-acetylene) ใช้ในช่วงอุณหภูมิสูง 1727°C ถึง 4727°C

วิธีนี้ค่อนข้างยากที่จะควบคุมอุณหภูมิ และ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่อยู่ใกล้กัน

การให้ความร้อนด้วยลวดความต้านทาน

เตาที่ให้ความร้อนด้วยลวดความต้านทานทางอ้อมใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อการหลอม และ ให้ความร้อนในช่วง 27°C - 2727°C โครงสร้างของเตาความต้านทานทางอ้อมจะตรงไปตรงมา

อันที่จริงการออกแบบ (สำหรับอุณหภูมิเกิน 1727°C) ขดลวดโลหะที่เหมาะสมรวมถึงผิวภายนอกที่หลอมยากอย่างแบบรวงผึ้ง หรือเป็นท่อ หรือผิวสัมผัสที่ผิวภายในของวัตถุที่หลอมยาก เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรของรอบของขดลวด ณ จุดทำงาน ขดลวดแต่ละรอบจะอยู่ในร่องบนส่วนที่หลอมยาก หรืออีกทางหนึ่งขดลวดแต่ละรอบจะแยกกันโดยจุดเล็ก ๆ ที่ยื่นออกมาที่ผิวนอก และหรือฝังขดลวดในซีเมนต์ที่หลอมยาก สิ่งสำคัญต้องแน่ใจว่าขดลวดไม่มีความเครียดเกินควร เพราะตัวให้ความร้อนจะเปราะขณะใช้งานเนื่องจากการออกซิเดชัน และ/หรือ การรวมตัวเป็นผลึก พารามิเตอร์หลักในการออกแบบขดลวด คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าสภาพต้านทาน (temperature coefficient of resistivity) ค่าความจุในการส่งผ่านกระแส (current carrying capacity) มากที่สุดและขณะใช้งานของอุณหภูมิและการแผ่รังสีที่ผิว และเงื่อนไขการทำงานในสภาพบรรยากาศเพื่อให้มีอายุการใช้งานยาว นอกจากนี้ยังมีสัมประสิทธิ์ของการขยายเชิงเส้น (coefficient of linear expansion) และ ค่ากราวิตี้จำเพาะ (specific gravity) เป็นสำคัญ โดยเฉพาะการออกแบบที่ใช้ตัวให้ความร้อนแบบมีการรองรับในตัว (self-supporting) ก็คือไม่มีตัวรองรับที่หลอมยากภายนอก ในตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติส่วนใหญ่ของวัตถุที่เป็นตัวให้ความร้อนแบบธรรมดา จากตารางจะสังเกตได้ว่าตัวให้ความร้อนที่เป็นโลหะทำมาจาก ซิลิกอนคาร์ไบด์ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ และกราไฟต์ ใช้งานได้ง่ายในช่วง $1227-1727^{\circ}\text{C}$ ที่บรรยากาศตัวให้ความร้อนที่เป็นกราไฟต์ต้องป้องกันบรรยากาศที่เป็นก๊าซเฉื่อยแต่ก็ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า ภาชนะซิลิกาหรือแก้วที่อบภายในหรือภายนอกด้วยฟิล์มบางของกราไฟต์ที่มีลักษณะระหว่างของเหลวกับของแข็งแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300°C ทำให้เกิดการเคลือบที่บาง และแข็งแรง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเคลือบนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น

ตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติบางประการของลวดความต้านทานชนิดธรรมดา [1]

Material and Trade Name	Approx. Maximum Operating Temperature K	Permissible Environment	Resistivity $\mu\Omega \text{ m}^{-1}$	Temperature Coefficient of Resistivity	Suitable Refractory Support	Coefficient Linear Expansion ($\text{K}^{-1} \times 10^6$)	Form of the Elements
Globar, "Hot Rod" (Sintered SiC)	1900 1660 1650	oxidizing reducing neutral	1.0×10^3	—	Alumina based	0-1000	Rods
Graphite (C)	2850 2700	reducing and neutral vacuum	8.7-10	—	Water cooled copper and other refractory materials at lower temperatures	2-200	Rods Grooved Tubular
Graphite-Pyrolytic	3650	CO	8.7-10	—	Water cooled copper	2-200	Grooved Tubular
Iridium	2450	neutral and reducing	6.1×10^{-2}	0.004	Zirconia based	6	Wire Ribbon
Kanthal A-1 (22% Cr, 5.5% Al, 0.5% Co + Fe)	1600	oxidizing and reducing	1.45	3.24×10^{-3}	Magnesia and Alumina based	11-15	Wire Ribbon
Kanthal super (MoSi ₂)	1950 1650-1850 1650 1350	oxidizing reducing neutral vacuum (1.33 $\times 10^{-2}$ Pa)	$(2-40) \times 10^4$	2.4×10^3	Alumina 60-70% Silica 30-40% Fe ₂ O ₃ (maximum) < 1%	—	
Molybdenum	2650	—	0.21	0.004	—	5	Wire Ribbon
Nichrome Nichrothal 80% Ni 20% Cr	1400	oxidizing and neutral reducing	1.35	0.0002	Alumina Silica based	13.2	Wire Ribbon
Platinum	1850	oxidizing and neutral	0.47	0.004	Zirconia Alumina based	9.56	Wire Ribbon
Tungsten	3250	neutral and reducing	5×10^{-2}	0.006	Silica—at low temperature	5	—
Vitreous Carbon	3250	neutral and reducing	10	—	—	2	Tubular Grooved

เตาที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และ เตาที่มีอุณหภูมิหลายโซนที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยความต้านทาน นำมาใช้ในกระบวนการการปลูกผลึกเพิ่มขึ้น มีหลักการพื้นฐาน 3 ข้อ ซึ่งนำมาใช้ในโครงสร้างของเตาแบบพิเศษ

1. การเตรียมแหล่งจ่ายความร้อน และ ระบายความร้อน หรือ ระบบหล่อเย็นที่ปลายเตาหรือโซนอุณหภูมิ

2. ระบบควบคุมกำลังอินพุทของตัวให้ความร้อนจะแยกอยู่คนละบริเวณกับเตา

3. การต่อวงจรของตัวให้ความร้อนในวงจรไฟฟ้ารวมเข้ากับแหล่งจ่ายกำลัง 1 แหล่ง

เตาไฟฟ้าโดยทั่วไป เปลี่ยนวิธีการควบคุมอุณหภูมิได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าจะมีการสะสมความร้อนไว้มาก เนื่องจากการใช้วัสดุที่หลอมยากเป็นฉนวนความร้อน และ/หรือ ส่วนรองรับ อาจทำให้เกิดปัญหายุ่งยาก ซึ่งต่อมาก็ได้มีการคิดค้นเตาที่ใช้ฉนวนฟิล์มบางโปร่งใสที่ทำจากทอง (ฟิล์มทองสะท้อนพลังงานอินฟราเรด 95%) ทำให้มีความจุต่ำมาก และทำการเพิ่มอุณหภูมิได้รวดเร็ว ราคาถูก และง่ายต่อการบำรุงรักษา

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้ง สำหรับเตรียมผลึกเดี่ยวอินเดียมทินออกไซด์ ($\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$: ITO) แล้วนำผลึกเดี่ยวที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ

1.3 ประโยชน์ของเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้ง

เตาโซนเดี่ยวที่อยู่ในลักษณะนี้ ระบบภายในเตาจะมีความสมมาตรมากกว่าเตาที่อยู่ในแนวนอน ตัวอย่างการใช้งานเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้งได้แก่ระบบ DTA (Differential Thermal Analysis) , การปลูกผลึกแบบไซโครลสกี (Czochralski) , การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน (Bridgman) เป็นต้น

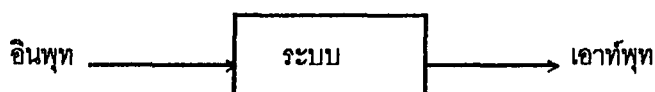
1.4 ขอบเขตการทำงาน

1. สร้างเตาโซนเดี่ยวในแนวตั้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1200°C ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ ทำงานร่วมกับไทรสเตอร์ (Thyristor)
- 2.เตรียมผลึกเดี่ยว ITO ด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์

บทที่ 2 การควบคุมอุณหภูมิ

2.1 ระบบควบคุม [2]

การควบคุมระบบกายภาพใด ๆ คือการกระทำให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่ได้ผลออกมาตามต้องการตามการกระตุ้นที่ป้อนให้กับระบบควบคุม เช่น การควบคุมขดลวดความร้อน จะป้อนสิ่งกระตุ้นคือ กระแส เข้าไปเพื่อให้ได้ความร้อนเป็นผลออกมา ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงระบบกายภาพใด ๆ

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) หมายถึง ระบบควบคุมที่พยายามรักษาให้เอาต์พุทมีค่าตามที่ต้องการ โดยนำเอาสัญญาณเอาต์พุทป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุท การป้อนกลับนี้จะเป็นการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) เพื่อให้สัญญาณผลต่างระหว่างอินพุทกับเอาต์พุท ไปใช้ในการควบคุม

ขบวนการ (process) หมายถึง ขบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันในลักษณะที่ควบคุมเป็นขั้นตอนเพื่อให้ได้มาซึ่งผลที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้มีตัวแปรเกิดขึ้น เช่น อุณหภูมิ , ความดัน

เครื่องควบคุม (controller) หมายถึง ส่วนของระบบที่กำเนิดสัญญาณเพื่อที่ป้อนสัญญาณเข้าสู่ระบบที่ถูกควบคุม

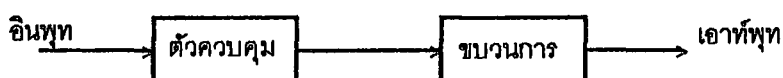
ส่วนป้อนกลับ (feedback element) หมายถึง ส่วนของระบบที่ให้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณป้อนกลับและตัวควบคุมเอาต์พุต

วิธีควบคุมระบบ อาจแบ่งแบบพื้นฐานได้ 3 วิธี

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

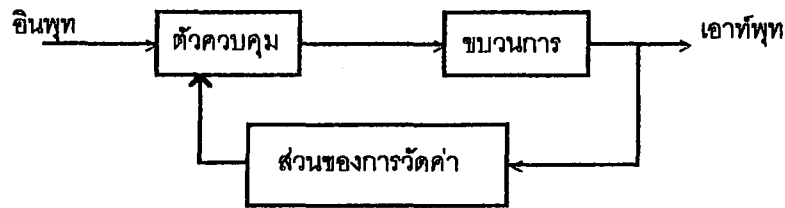
2.2 การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ (open loop control) และ การควบคุมแบบมีการป้อนกลับ (close loop control)

การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับหรือระบบควบคุมแบบวงจรมืด ระบบนี้จะไม่มีการเปรียบเทียบสภาพเอาต์พุตกับอินพุต หรือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบจะไม่มีผลต่อการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด

การควบคุมแบบมีการป้อนกลับหรือระบบควบคุมแบบวงจรมืด เป็นระบบควบคุมที่สัญญาณเอาต์พุตมีผลโดยตรงต่อการควบคุม สัญญาณค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตของระบบ หรือ สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน (actualing error signal) จะถูกป้อนให้กับตัวควบคุมเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง ทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการที่สุด สัญญาณป้อนกลับนี้อาจจะเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันหรืออนุพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตของระบบก็ได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด

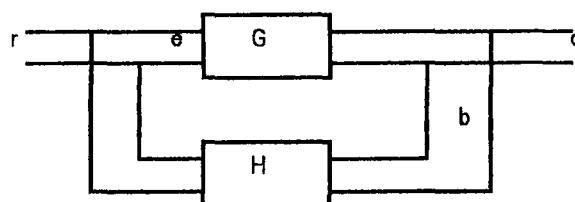
ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมแบบเปิดและระบบควบคุมแบบปิด : อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเปิดต้องมีความถูกต้องสูง จึงมีราคาแพง ไม่มีปัญหาด้านเสถียรภาพมากนักเพราะเอาต์พุตที่ได้เป็นผลเนื่องมาจากอินพุตโดยตรง แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบปิดไม่จำเป็นต้องมีความถูกต้องดีมากนัก จะใช้การปรับค่าให้เข้าใกล้ค่าที่ต้องการมากที่สุด จึงมีปัญหาด้านเสถียรภาพ เพราะมีสัญญาณมาเปรียบเทียบกับอินพุต เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งก็เป็นเหมือนอินพุตอีกตัวหนึ่งที่มีค่าไม่แน่นอน อาจทำให้เกิดการออสซิลเลตได้

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุมที่ทราบอินพุตของระบบ จะเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาที่ไม่มีสัญญาณรบกวน การควบคุมระบบนี้จะใช้การควบคุมแบบเปิด สำหรับการควบคุมแบบปิด จะใช้เมื่อไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงของอินพุตตามเวลา หรือมีสัญญาณรบกวน และในบางกรณี ก็จะต้องใช้ทั้งสองวิธีรวมกันไป เพื่อที่จะได้ความแม่นยำสูงสุด

2.2.1 ผลของการป้อนกลับ

การป้อนกลับจะมีบทบาทในการควบคุมประเภทระบบปิด จากที่กล่าวมาโดยอาศัยทำให้เอาต์พุตและเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

พิจารณาระบบป้อนกลับอย่างง่าย ๆ ดังรูปที่ 2.4 โดย r เป็นสัญญาณอินพุต , c เป็นสัญญาณเอาต์พุต , e เป็นสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน , b เป็นสัญญาณที่ป้อนกลับ ส่วน G และ H เป็นเกน ซึ่งมีค่าคงที่ในวงจรมัน ๆ



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรป้อนกลับอย่างง่าย

จะได้สมการความสัมพันธ์เอาต์พุตต่ออินพุตดังนี้

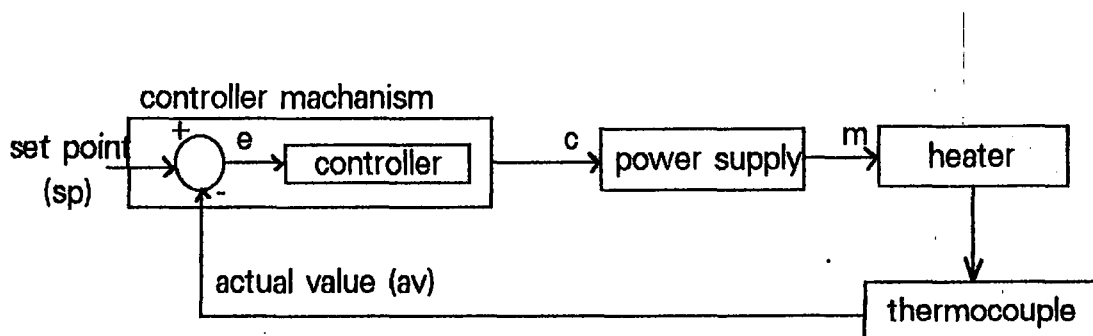
$$c/r = G / (1+GH) \quad (2.1)$$

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

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

2.2.2 กระบวนการการควบคุมแบบปิด (Process control loop)

ในการอธิบายกระบวนการการควบคุมแบบปิด จะมีส่วนของการป้อนกลับซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรที่กำลังควบคุม V_G จากรูปที่ 2.5 จะแสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบปิด สำหรับกรณีที่มีการควบคุมตัวแปรเดียว



รูปที่ 2.5 แผนภาพของกระบวนการการควบคุมแบบปิด

กลไกของตัวควบคุม (controller mechanism) จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ "ตัวตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อน" ทำหน้าที่ตรวจจับความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุต คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ตั้งไว้ และอีกส่วนหนึ่งก็คือ "ตัวควบคุม" เป็นส่วนที่ตัดสินใจที่จะเปลี่ยนแปลง ในการควบคุมค่าความคลาดเคลื่อน ส่วนนี้จะเปรียบเสมือนสมองของระบบ ค่าที่ออกมา

จากส่วนนี้จะเรียกว่า สัญญาณป้อนกลับ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าได้ตามตัวแปรที่กำลังควบคุมในกระบวนการ ไปยังตัวป้อนสัญญาณต่าง ๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟ

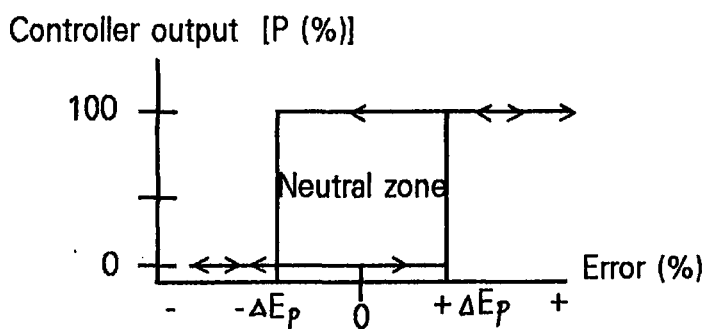
การวัดค่า (measurement) ในกรณีนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิที่ใช้ภายในเตา แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังตัวตรวจวัดค่าความคลาดเคลื่อน

2.2.3 โหมดการทำงานของการควบคุมแบบปิด

การทำงานของการควบคุมแบบปิดมีหลายลักษณะ ดังนี้ คือ

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

1.การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off mode) การควบคุมในลักษณะนี้บางทีเรียกว่า โหมดสองตำแหน่ง เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของกระบวนการการควบคุมทั้งหมด เอาท์พุทหรือโหลดของอุปกรณ์จะเปิดหรือปิดโดยอัตโนมัติโดยไม่มีระดับกลาง ดังรูปที่ 2.6 การควบคุมในระบบนี้เป็นที่นิยม และมีราคาถูก



รูปที่ 2.6 กราฟระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด

การทำงานของตัวควบคุมแบบเปิด-ปิดถูกกำหนดโดยการปรับตำแหน่งของค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตามต้องการ (set point) ดังนั้น เอาท์พุทจึงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องหรือสั้นขึ้น-ลงระหว่างค่าที่ตั้งไว้

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงกว่าค่าวิกฤติ ค่าเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0% ไปสู่ 100% และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง เอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 100% ไป 0% ดังนั้น แถบตาย(deadband)รอบ ๆ ศูนย์จะเป็นส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุต ตัวอย่างทั่วไปที่พบได้แก่ เครื่องปรับอากาศ

ตัวแปรที่ควบคุมจะมีการสั่นในแต่ละระบบ ด้วยค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เท่ากับความกว้างของแถบตาย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

เมื่อ E เท่ากับครึ่งหนึ่งของแถบตาย

ในการใช้งานการควบคุมแบบเปิด-ปิด จะมีโอเวอร์ชูท และ อันเดอร์ชูทที่จุดสวิง

2. การควบคุมแบบปรับโพชั่นนอล (Proportional mode, P) เอาต์พุตของระบบควบคุม ต้องการค่าที่แน่นอนในการควบคุมพลังงานที่จ่ายเข้าไป เพื่อให้เป็นสัดส่วนปรับโพชั่นนอลกับ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าสูง ระบบป้อนกลับก็จะให้ค่ามาก ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อย ระบบป้อนกลับก็จะให้ค่าน้อย โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสอง จะได้ดังสมการที่ 2.3

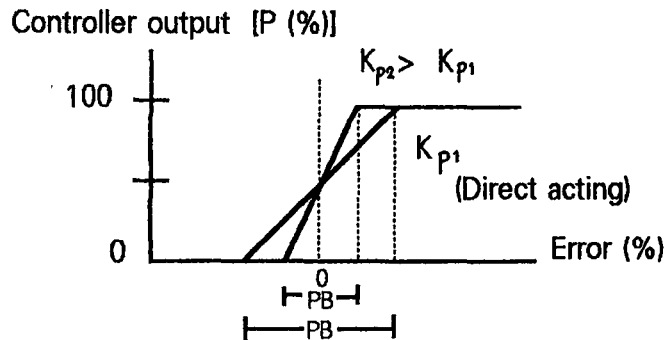
$$C_p = K_p e_p + c_o \quad (2.3)$$

โดย C_p = เอาต์พุตของระบบควบคุม

K_p = อัตราขยายปรับโพชั่นนอล

e_p = ค่าความผิดพลาด

c_o = เอาต์พุตที่ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์



รูปที่ 2.7 กราฟของระบบควบคุมแบบปรับโพรพอร์ชันนอล

จากสมการจะได้กราฟดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอัตราขยาย 2 เท่า คือ K_{p1} กับอัตราขยายปกติ K_{p2} โดยที่ 100% หมายถึงค่าอิมิตัวของค่าความคลาดเคลื่อน คือ จุดที่ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลให้มีการเพิ่มค่าเอาต์พุต และช่วงระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนที่ให้เอาต์พุตระหว่าง 0% และ 100% เรียกว่า "ช่วงปรับโพรพอร์ชันนอล (proportional band)" ที่ค่าอัตราขยายของระบบมีค่าสูง ช่วงแบบนี้ก็จะแคบลง

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

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

$$C_i(t) = K_i \int_0^t A_e(t) + C_i(0) \quad (2.4)$$

โดย $C_i(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมในโหมดอินทิกรัล

K_i = อัตราขยายอินทิกรัล

$A_e(t)$ = พื้นที่รวมของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา

$C_i(0)$ = เอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา 0

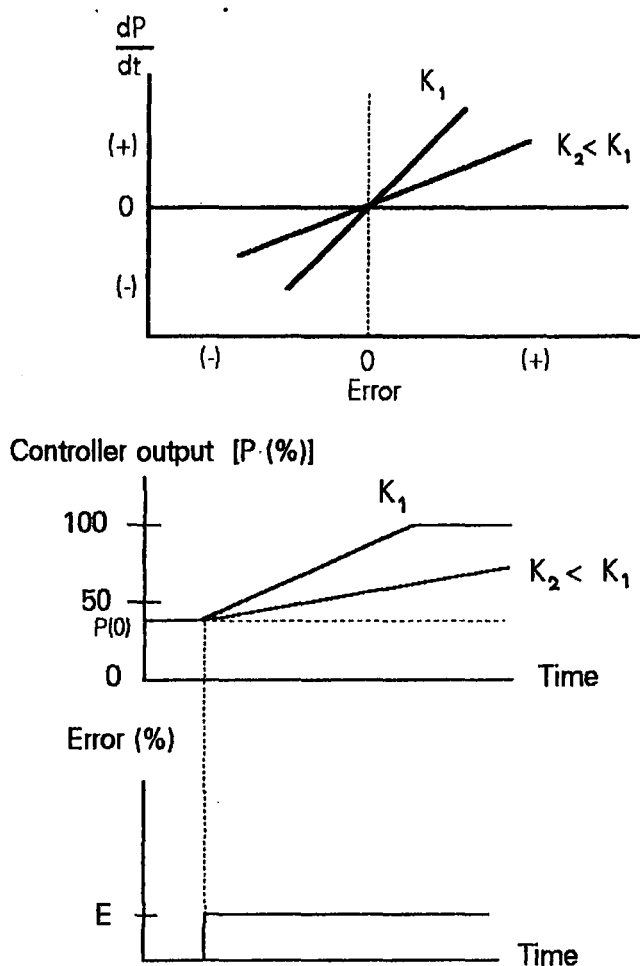
สมการโดยทั่วไปของโหมคอินทิกรัลที่อยู่ในรูปที่ทางสมการคณิตศาสตร์ เป็น

$$C_i(t) = K_i T_i \int_0^t e_i(t) dt + C_i(0) \tag{2.5}$$

ซึ่งจะเป็นทรานสเฟอฟังก์ชันของระบบเป็น

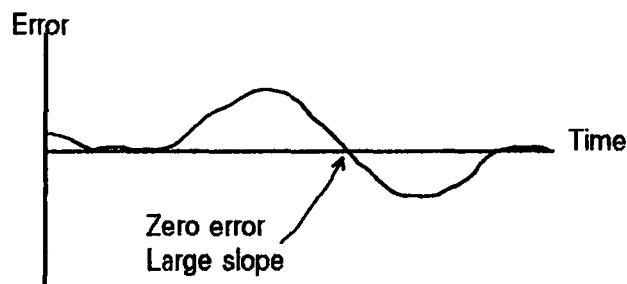
$$C_i(t) / e_i(t) = K_i / t \tag{2.6}$$

เมื่อนำสมการที่ 2.6 มาแก้สมการและนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์เอาร์ททุกกับค่าอัตราขยายและค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาร์ททุกกับค่าอัตราขยายและค่าคลาดเคลื่อน

4. ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative mode, D) เป็นแบบที่การควบคุมขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อน โดยวิธีนี้จะหาค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ได้ทันที และวิธีนี้ยังเพิ่มให้การตอบสนองของตัวควบคุมให้กว้างขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนไปซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนของค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละเวลา ซึ่งอาจเรียกใหม่นี้ว่า อัตราการกระทำ (rate action) การตอบสนองของวิธีนี้ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นจริงที่เป็นขณะเฉพาะ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนกำลังจะเปลี่ยนแปลงไปที่จุดขณะนั้น



รูปที่ 2.9 แสดงกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเป็นศูนย์ของโหมดอนุพันธ์

รูปที่ 2.9 แสดงกรณีการเกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นศูนย์ที่บางเวลา แต่การเปลี่ยนค่าของเอชท์พุทของตัวควบคุมเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว

อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยใช้ความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อน 2 ค่าหารด้วยค่าความแตกต่างที่จุดเวลาทั้งสอง ดังสมการ 2.7

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

โดย $C_d(t)$ = ค่าเอชท์พุทของตัวควบคุมในโหมดอนุพันธ์

K_d = อัตราขยายอนุพันธ์

$e(t_1)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t_1

$e(t_0)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t_0

หรือถ้าจะแปลงให้อยู่ในรูปที่ดิฟเฟอเรนเชียล จะได้

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

จะสังเกตได้ว่าเทอมของเอาท์พุทของตัวควบคุมที่เวลาเริ่มต้น t_0 เพราะว่าโหมดเดอริเวทีฟ ไม่ได้ใช้เฉพาะช่วง มันไม่ตอบสนองที่เฉพาะค่าความคลาดเคลื่อน จากสมการที่ 2.2 ค่าที่ได้จะเป็นค่าประมาณของเดอริเวทีฟ เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงที่สุด เราจะเลือกใช้ช่วงเวลา t_0 ถึงค่าน้อย ๆ ค่าที่ได้จะเป็นค่าใกล้เคียงมาก

5. ระบบควบคุมแบบพรีออปโพซันนอล-อินทิกรัล (proportional integral mode PI) เป็นการควบคุมที่นำเอาแบบพรีออปโพซันนอลและอินทิกรัลมารวมกัน โดยในแบบอินทิกรัล จะทำการรีเซ็ต (reset) โดยการเปลี่ยนแปลงเอาท์พุทของตัวควบคุมอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งค่าคลาดเคลื่อนลดลงเท่ากับศูนย์ และแบบพรีออปโพซันนอลจะเปลี่ยนเอาท์พุทเป็นสัดส่วนกับค่าคลาดเคลื่อน ดังนั้น จะได้สมการใหม่ว่า

$$C(t) = K_p e(t) + K_i / T_i \int_0^t e(t) / dt \quad (2.9)$$

หรืออยู่ในรูปที่ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จะได้

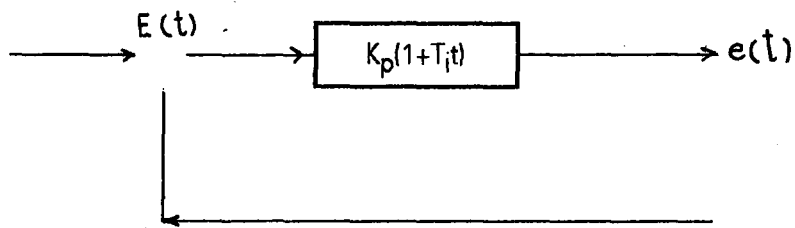
$$C(t) / e(t) = K_p (1 + 1/T_i / t) \quad (2.10)$$

โดย K เป็นค่าของอัตราขยาย

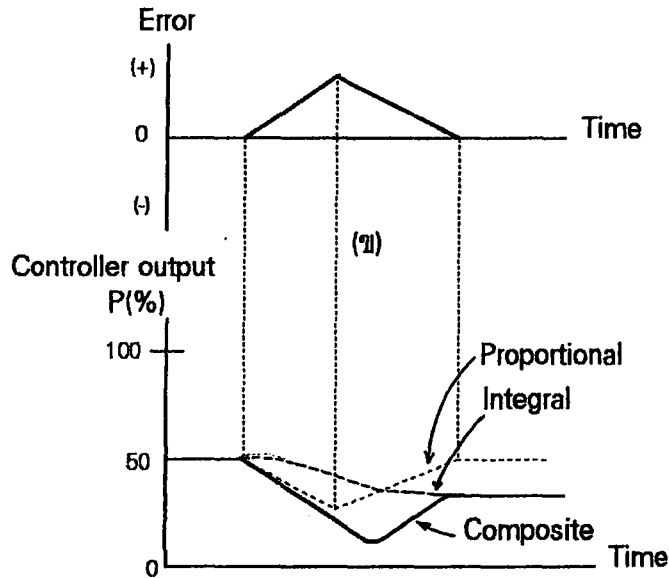
T_i เป็นค่าเวลาของอินทิกรัล

ทั้งค่า K_p และ K_i เป็นค่าที่ปรับได้ ค่าส่วนกลับของ T_i จะเรียกว่า อัตราการเริ่มใหม่

การทำงานของพรีออปโพซันนอล-อินทิกรัล อาจจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดยรูป(ก)แสดงถึงแผนภาพของบล็อกของตัวควบคุมแบบพรีออปโพซันนอล-อินทิกรัล รูป (ข) ถ้าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e เป็นสัญญาณแบบขั้น (unit step) และ รูป (ค) เป็นสัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบพรีออปโพซันนอล-อินทิกรัล



(ก)



(ค)

รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของพรีออปโพซันนอล-อินทิกรัล (ก) แสดงแผนภาพของตัวควบคุม (ข) สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน e แบบขั้น (ค) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม

6. ระบบควบคุมแบบพรีออปโพซันนอล-เดอริเวทีฟ (proportional-derivative mode, PD) เป็นระบบที่ลดแนวโน้มของการสั่นและยอมให้มีการกำหนดอัตราขยายที่สูงขึ้น โดยที่แบบพรีออปโพซันนอลจะมีการเปลี่ยนเอาต์พุตเป็นสัดส่วนกับสัญญาณคลาดเคลื่อน ในขณะที่แบบเดอริเวทีฟ จะเพิ่มการเปลี่ยนแปลงทางเอาต์พุตซึ่งเกี่ยวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลาดเคลื่อน การควบคุมแบบเดอริเวทีฟจะคาดค่าคลาดเคลื่อนล่วงหน้าและเปลี่ยนเอาต์พุตให้สัมพันธ์กัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

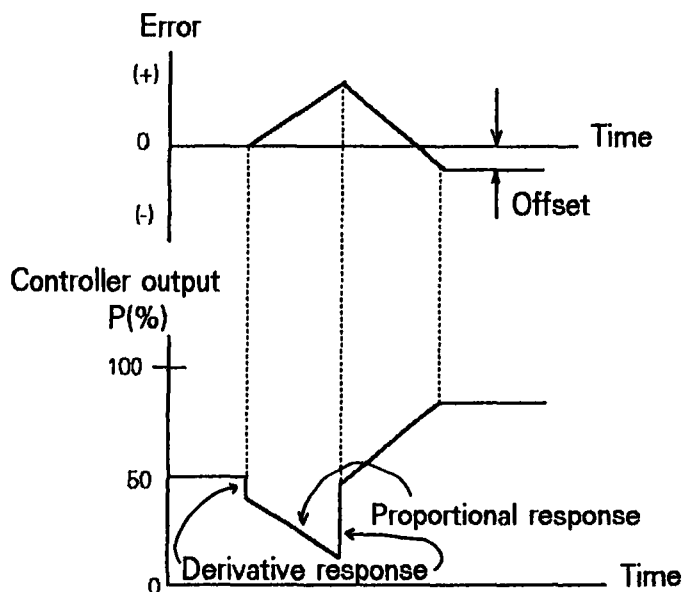
หรืออยู่ในรูปที่ทรานสเฟอฟังก์ชัน จะได้

$$C(t) / e(t) = K_p(1 + T_d / t) \tag{2.12}$$

โดย K_p เป็นค่าของอัตราขยาย

T_d เป็นค่าเวลาของเดอริเวทีฟ

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



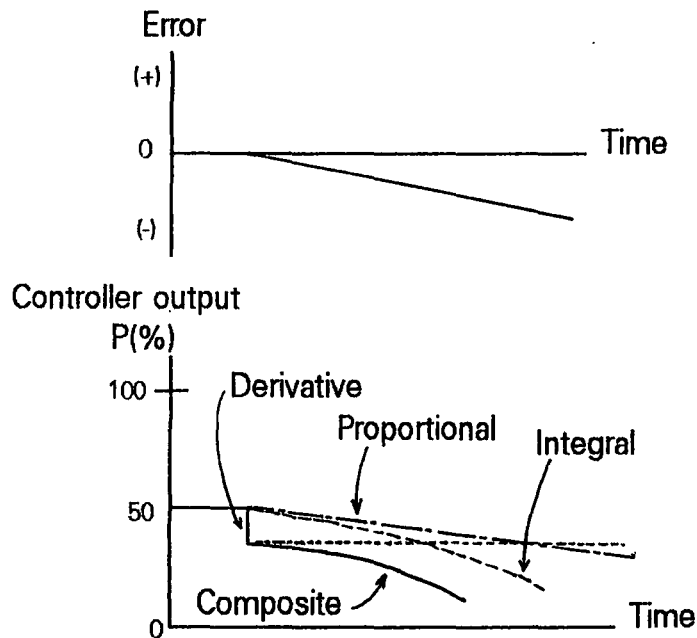
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อน กับ เอาต์พุตของการควบคุมแบบพรีออปโทซันนอล-เดอริเวทีฟ

7. ระบบควบคุมแบบพรีออปโทซันนอล-อินทิกรัล-เดอริเวทีฟ (proportional-integral-derivative mode, PID) ระบบนี้จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคลาดเคลื่อนด้วยการ รีเซ็ตอัตโนมัติเพื่อลดเอาต์พุตออฟเซต (output offset) และมีการลดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดล่วงหน้า การควบคุมแบบนี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ และรูปที่ 2.12

$$C(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} + K_f T_i \int_0^t e(t) / dt \tag{2.13}$$

หรืออยู่ในรูปที่ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน จะได้

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



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของค่าคลาดเคลื่อนกับเอาต์พุตของการควบคุมแบบปรับโพลีชั่นอล - อินทิกรัล - เดอริเวทีฟ

2.2.4 วิธีการเลือกใช้การควบคุม

การเลือกใช้การควบคุมให้เหมาะสมกับงาน โดยมีการเลือกดังนี้

1. การควบคุมแบบปรับโพลีชั่นอล จะใช้เมื่อ

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

2. การควบคุมแบบรีเซต (อินทิกรัล) จะใช้เมื่อ

- 1) ต้องการที่จะตัดค่าออฟเซตของขบวนการนั้น
- 2) ขบวนการนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจุดกำหนด (set point) หรือการเปลี่ยนแปลง

โหลดบ่อยครั้ง

และจะไม่ใช้การควบคุมแบบรีเซ็ต เมื่อ

- 1) ต้องการที่จะตัดโอเวอร์ชูท (overshoot) ในช่วงเริ่มต้น
- 2) ขบวนการที่สามารถที่จะถูกควบคุมโดยการตั้งแกนของพรีออปโพซิชันนอลสูงๆได้
- 3) มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างมาก และบ่อยครั้งในระบบที่ต่อเนื่อง

3. การควบคุมแบบเดอริเวทีฟ จะใช้เมื่อ

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

และจะไม่ใช้การควบคุมแบบเดอริเวทีฟ เมื่อ

- 1) ขบวนการนั้นมีส่วประกอบที่มีอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญในระบบ และมีช่วงห่างของการเปลี่ยนแปลงแบบช้า ๆ นั้น
- 2) มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในระบบ เว้นแต่ว่าสัญญาณรบกวนมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ใช้งานในขบวนการนั้น ๆ

2.2.5 วิธีการเลือกตัวควบคุม

วิธีการในการพิจารณาว่าจะเลือกตัวควบคุมแบบใดในการนำมาควบคุมอุณหภูมิมีดังนี้คือ

1) กระบวนการที่มีความจุน้อย หมายถึงว่า ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของตัวให้ความร้อนเพียงเล็กน้อย จะเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิที่ควบคุมเปลี่ยนแปลงไปได้มาก เราควรที่จะเลือกใช้การควบคุมแบบพรีออปโพซิชันนอล มากกว่าการควบคุมแบบเปิด-ปิด

2) ถ้าขบวนการใดมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยไม่คาดหมาย ก็จะทำให้เกิดออฟเซตขึ้นมาได้ จึงควรจะใช้ตัวควบคุมแบบรีเซ็ตด้วย

3) สำหรับการที่จะนำเอาตัวควบคุมแบบเดอริเวทีฟพร้อมด้วยหรือไม่นั้น ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นและจะตัดสินใจได้จากคุณลักษณะของกระบวนการว่า ถ้าขบวนการนั้นมีเวลาสิ้นสุด (dead time) ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิ ก็หมายถึงเมื่อเราจ่ายพลังงานให้กับขบวนการทันทีทันใด แต่อุณหภูมิภายในขบวนการนั้นจะยังคงไม่เพิ่มขึ้นทันทีทันใดตามการจ่ายพลังงานนาน แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น

2.3 ตัวควบคุมแบบง่าย ๆ ในการควบคุมอุณหภูมิ [1]

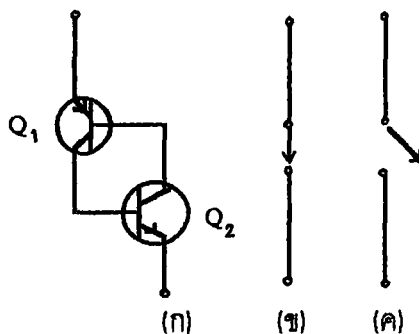
รีเลย์แบบสัมผัสและอุปกรณ์ที่มีการควบคุมความร้อนแบบต่าง ๆ อาจใช้ในระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด และ แบบไม่ต่อเนื่อง สำหรับระบบที่มีการควบคุมแบบต่อเนื่องจะใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ควบคุมด้วยเครื่อง , ตัวเรียงกระแสแบบกริดคอนโทรล (grid controlled rectifier) , SCR และ แมกเนติกแอมพลิฟายเออร์ (magnetic amplifiers)

2.3.1 ไทริสเตอร์ (thyristor) [3]

ไทริสเตอร์เป็นสวิตช์แบบสารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษ ที่ใช้การป้อนกลับภายในเพื่อการสร้างแลทซ์ขึ้น ไทริสเตอร์สามารถทำงานเป็นสวิตช์ได้เพียงอย่างเดียว แตกต่างกับพวกไบโพลาร์ และ เฟทที่ใช้งานเป็นวงจรรขยายเชิงเส้น และสวิตช์ได้ การใช้งานของไทริสเตอร์ส่วนใหญ่ คือ ควบคุมกำลังที่โหลดของมอเตอร์ , เครื่องทำความร้อน , ระบบไฟต่าง ๆ ฯลฯ

2.3.1.1 แลทซ์ในทางอุดมคติ

อุปกรณ์ไทริสเตอร์สามารถอธิบายได้ในรูปที่แบบของแลทซ์ในทางอุดมคติ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 และพบว่าทรานซิสเตอร์ตัวบน Q_1 เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และตัวล่างเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN



รูปที่ 2.13 การต่อกันของแลทซ์

2.3.1.2 การทำงานของแลทช์

ลักษณะการต่อกันของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 2.13 (ก) จะเกิดการป้อนกลับแบบบวก การเปลี่ยนแปลงของกระแส ณ จุดใด ๆ ก็ตามภายในรูปจะถูกขยาย และถูกป้อนกลับไปที่จุด เริ่มต้น โดยมีเฟสเหมือนเดิม ตัวอย่างเช่น ถ้ากระแสเบสของ Q_2 เพิ่มขึ้น กระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_2 จะเพิ่มขึ้นด้วย และเนื่องจากค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_2 เป็นกระแสเบสของ Q_1 ดังนั้น กระแสเบสของ Q_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกซึ่งจะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_1 เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ กระแสเบสของ Q_2 เพิ่มขึ้นอีกเป็นวัฏจักรต่อไป ถ้าไม่มีการจำกัดกระแสจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่ อิ่มตัว ในกรณีนี้แลทช์เปรียบเสมือนเป็นสวิตช์ปิด (รูปที่ 2.13 (ข))

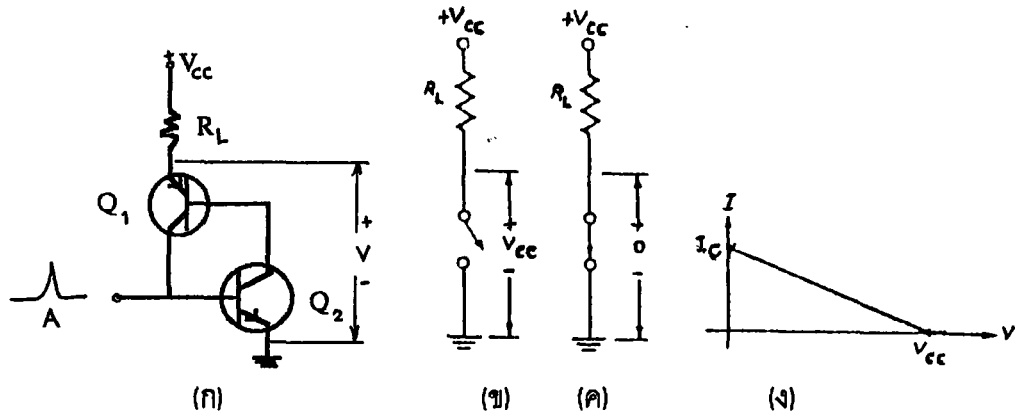
2.3.1.3 เบรคโอเวอร์

วิธีหนึ่งที่จะทำให้วงจรแลทช์นำกระแส คือ วิธีเบรคโอเวอร์ หมายถึง การให้แหล่งกำเนิด แรงดันที่มีค่าแรงดันสูงพอป้อนให้มันเกิดการเบรคดาวนที่ตัวคอลเลคเตอร์ไดโอด เมื่อเกิดการ เบรคดาวนขึ้น กระแสจะผ่านอิมิตเตอร์ออกที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_1 แล้วไปขับเบสของ ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะเกิดผลลัพธ์เช่นเดียวกับการที่เบสของ Q_2 ได้รับสัญญาณพัลส์แหลม

การเบรคโอเวอร์จะเริ่มด้วยการเบรคดาวนที่ตัวคอลเลคเตอร์ไดโอดตัวหนึ่ง และจบลง ด้วยทรานซิสเตอร์ทั้งคู่อยู่ในสภาวะอิ่มตัว หรือ แลทช์ลัดวงจร จึงเป็นสาเหตุที่ใช้เบรคโอเวอร์ แทน เบรคดาวน

2.3.1.4 การหยุดทำงานโดยลดกระแสลง

เราจะให้วงจรแลทช์หยุดนำกระแสได้อย่างไร วิธีหนึ่ง คือ การลดกระแสไหลให้เป็นศูนย์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่อิ่มตัวอีกต่อไป และกลับไปยังสภาวะเปิดวงจร ตัวอย่างในรูปที่ 2.14(ก) เราสามารถเปิดวงจรตัวต้านทานโหลด อีกทางหนึ่ง คือ เราลดค่าแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} ให้เป็น ศูนย์ ไม่ว่าจะป็นวิธีใด แลทช์จะเปลี่ยนจากสภาวะลัดวงจรมาเป็นสภาวะเปิดวงจร ที่เราเรียกว่า วิธี "หยุดทำงานโดยลดกระแสลง" เพราะเป็นการลดกระแสแลทช์ให้ต่ำ ๆ



รูปที่ 2.14 การทำงานของแลทซ์

2.3.1.5 สัญญาณทริกไบอัสกลับ

อีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้วงจรแลทซ์หยุดนำกระแส คือ การใช้สัญญาณทริกไบอัสกลับ จากรูปที่ 2.14 (ก) ถ้าใช้สัญญาณทริกซีกลบแทนสัญญาณทริกซีกบวก สัญญาณทริกนี้จะทำให้ Q₂ หยุดนำกระแส การป้อนกลับแบบบวกจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่คัทออฟ และวงจรแลทซ์หยุดนำกระแส ในทางกลับกัน การกระตุ้นเบสของ Q₁ ด้วยสัญญาณทริกซีกบวก จะเป็นการลดกระแสเบสของ Q₁ อันเป็นผลให้แลทซ์เปิดวงจรเช่นกัน

สรุปได้ว่า 1) เราสามารถทำให้วงจรแลทซ์ในทางอุดมคตินำกระแสทริกโดยใช้สัญญาณทริกไบอัสตรง หรือวิธีเบรคโอเวอร์

2) เราสามารถเปิดวงจรแลทซ์(หยุดนำกระแส) ในทางอุดมคติโดยใช้สัญญาณทริกไบอัสกลับ หรือวิธีหยุดทำงานโดยลดกระแสลง

สำหรับไทรสเตอร์แบบง่าย ๆ จะใช้วิธีเบรคโอเวอร์ เพื่อลัดวงจรแลทซ์ และลดกระแสลง เพื่อให้วงจรแลทซ์เปิดวงจร สำหรับไทรสเตอร์ที่ซับซ้อนขึ้นจะใช้การทริกแบบไบอัสตรง เพื่อให้วงจรแลทซ์ลัดวงจร และการทริกแบบไบอัสกลับ เพื่อเปิดวงจรแลทซ์

ในทางตรงกันข้าม ถ้ากระแสเบสของ Q₂ ลดลง กระแสคอลเลคเตอร์ของ Q₂ ก็จะลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสเบสของ Q₁ และกระแสคอลเลคเตอร์ของ Q₁ ลดลง และแน่นอน กระแสเบสของ Q₂ ก็ย่อมลดลงเป็นวัฏจักรต่อไป ถ้าเป็นในลักษณะนี้เรื่อยไป จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่คัทออฟ ในกรณีนี้ แลทซ์เปรียบเสมือนเป็นสวิตช์เปิด (รูปที่ 2.14 (ค))

แลทซ์สามารถทำเป็นสวิตช์เปิดหรือปิดได้อย่างใดอย่างหนึ่ง ถ้าสวิตช์ปิดอยู่ มันก็คงลักษณะปิด ไปจนกระทั่งมีเหตุการณ์บางอย่างมาลดกระแสลงเช่นเดียวกัน ถ้าสวิตช์เปิด มันก็ยังคงลักษณะนี้เรื่อยไปจนกว่าจะมีเหตุการณ์บางอย่างมาทำให้กระแสเพิ่มขึ้น

2.3.1.6 การทริก (triggering)

วิธีหนึ่งที่จะทำให้มันนำกระแสค้างอยู่ได้ คือ การทริก โดยป้อนแรงดันไบอัสตรงให้กับเบสของทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง

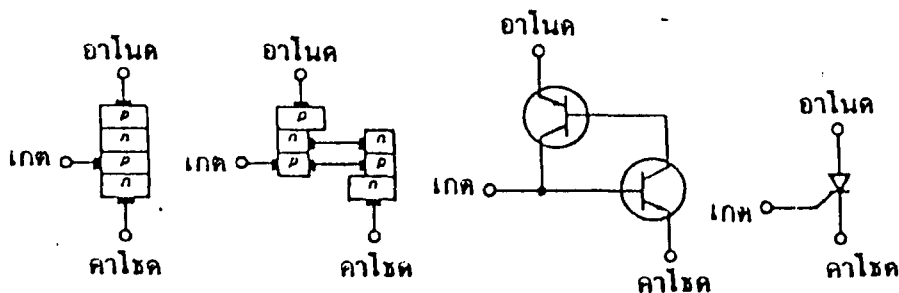
จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงสัญญาณทริก (พัลส์แหลม) เข้าที่ขาเบสของ Q_2 ถ้าแลตซ์ยังคงเปิดวงจรอยู่ (ก่อนพัลส์แหลมมาทริก) แล้วแรงดันไฟเลี้ยงทั้งหมดจะตกคร่อมแลตซ์ที่ถูกเปิดวงจร(รูปที่ 2.14(ข)) และจุดทำงานจะอยู่ที่จุดด้านล่างของเส้นโหลด (รูปที่ 2.14 (ง))

เมื่อสัญญาณทริก (จุด A) เข้ามา ก็จะเป็นการไบอัสตรงให้แก่เบสของ Q_2 จะเกิดกระแสคอลเลคเตอร์ ของ Q_2 ซึ่งก็คือ กระแสเบสของ Q_1 ทำให้เกิดกระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_1 ไปขับเบสของ Q_2 มากขึ้น เนื่องจากขั้วคอลเลคเตอร์ของ Q_1 จะจ่ายกระแสเบสของ Q_2 ให้เอง ดังนั้นไม่จำเป็นต้องป้อนสัญญาณทริกอีกต่อไป กระแสอินพุทที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการป้อนกลับแบบบวกขึ้น เรียกว่า " กระแสทริก" (trigger current)

เมื่อทรานซิสเตอร์ทั้งคู่อิ่มตัว จะเปรียบเสมือนแลตซ์ลัดวงจร (รูปที่ 2.14(ค)) ในทางอุดมคติ จะไม่มีแรงดันตกคร่อมมัน และจุดทำงานจะอยู่ที่ด้านบนสุดของเส้นโหลด (รูปที่ 2.14 (ง))

2.3.2 SCR (Silicon Controlled Rectifier)

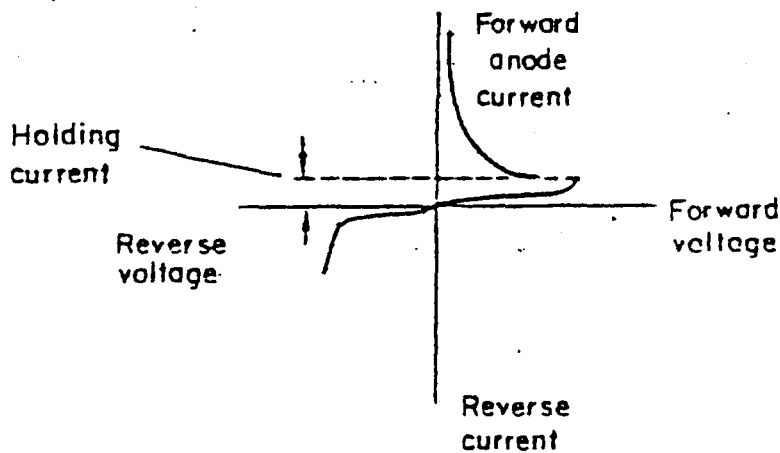
SCR จะมีขาซึ่งต่อกับเบสของส่วน NPN ดังรูปที่ 2.15 เราสามารถแบ่งบริเวณที่มีการได้ป 4 แห่งให้เป็นทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 2.15(ข) ดังนั้น SCR จึงเสมือนเป็นแลตซ์ที่มีขาทริกด้วย (รูปที่ 2.15(ค)) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าอยู่ในรูปที่ 2.15 (ง)



รูปที่ 2.15 SCR (ก) โครงสร้าง (ข) โครงสร้างสมมูลย์ (ค) วงจรสมมูลย์ (ง) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า

2.3.2.1 แรงดันบล็อกกิ้ง

การใช้งาน SCR โดยทั่วไปแล้ว เราจะไม่ให้มันนำกระแสโดยวิธีเบรคโอเวอร์ SCR ส่วนมากจะถูกออกแบบมาให้นำกระแสโดยใช้วิธีการทริก และเปิดวงจรโดยวิธีลดกระแสลง แรงดันเบรคโอเวอร์ของ SCR มีค่าตั้งแต่ 50 V จนถึงมากกว่า 25,000 V ขึ้นอยู่กับเบอร์ของ SCR อีกความหมายหนึ่งคือ ปกติ SCR จะไม่นำกระแสอยู่จนกระทั่งมีกระแสมาทริกที่เกต หลังจากนั้น SCR จะนำกระแส และนำกระแสต่อไป แม้ว่าเราจะเอาสัญญาณที่มาทริกออกไปแล้ว มีวิธีเดียวที่จะทำให้ SCR หยุดนำกระแส คือ วิธีลดกระแสลงจนมันหยุดทำงาน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

คนทั่วไปมักคิดว่า SCR เป็นอุปกรณ์ที่ขวางกั้นแรงดันจนกระทั่งมีสัญญาณมาทริกมันด้วยเหตุผลนี้เอง แรงดันเบรคโอเวอร์จึงถูกเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า "แรงดันบล็อกกิ้งขณะไบอัสตรง"

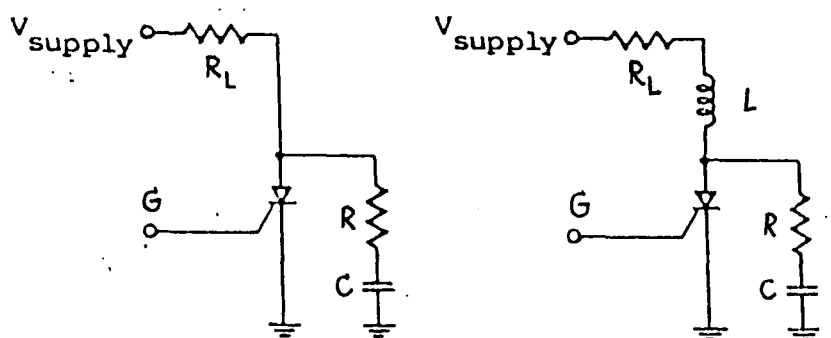
2.3.2.2 กระแสค่าสูง

SCR เกือบทั้งหมดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมซึ่งสามารถใช้ควบคุมกระแสที่มีค่าสูงได้ตั้งแต่ค่าน้อยกว่า 1 A จนถึงมากกว่า 2,500 A ขึ้นอยู่กับเบอร์ของมัน เนื่องจาก SCR เป็นอุปกรณ์ที่นำกระแสได้สูง จึงต้องมีกระแสทริก และกระแสโวลติจสูงตามไปด้วย ตัวอย่างเช่น SCR เบอร์ 2N 4444 สามารถนำกระแสได้สูงสุด 8 A อย่างต่อเนื่อง ; กระแสที่ใช้ทริกมีค่า 10 mA และมีค่ากระแสโวลติจ 10 mA ด้วย ซึ่งหมายความว่า เราต้องจ่ายกระแสให้เกตอย่างน้อยที่สุด 10 mA เพื่อที่จะควบคุมกระแสได้ถึง 8 A

2.3.2.3 ค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่ม(Critical rate of rise)

ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ของ SCR ต้องป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับให้กับ SCR โดยใช้การทริกที่ขาเกต ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละลูกคลื่น ทำให้เราสามารถควบคุมกำลังไฟสลับที่ให้แกโหลดอย่างเช่น มอเตอร์ , เครื่องทำความร้อน ฯลฯ ได้ เนื่องจากมีความจุระหว่างรอยต่อ (junction capacitance) ภายใน SCR ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟเลี้ยงอย่างฉับพลัน จะทำให้มีการทริก SCR ได้โดยผ่านทางตัวเก็บประจุนี้ หรืออาจกล่าวได้ว่า ถ้าอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันขณะไบอัสตรงนั้นสูงเพียงพอแล้ว จะมีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุใน SCR มาทริกที่เกตทำให้มันเริ่มนำกระแสได้ และจะลดค่าแรงดันเบรคโอเวอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการผิดพลาดแก่ SCR อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาโนดจะต้องไม่เกินค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่มแรงดัน ซึ่งมีบอกไว้ในใบกำกับข้อมูล เช่น SCR เบอร์ 2N 4444 มีค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่มแรงดัน = $50 \text{ V}/\mu\text{s}$ เพื่อหลีกเลี่ยงการเบรคโอเวอร์ที่ผิดพลาด อัตราการเพิ่มของแรงดันคร่อมเอาโนดจะต้องไม่สูงกว่า $50 \text{ V}/\mu\text{s}$ มิฉะนั้นแล้ว SCR ตัวนี้มันจะนำกระแสเองโดยที่เรายังไม่ทันทริก

สวิตชิ่งทรานเซียนท์(Switching transients) คือ การที่แรงดันที่เอาโนดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อันเกิดจากการที่ SCR นำกระแสในทันที แรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้มักจะมีค่าเกินค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่มแรงดัน วิธีหนึ่งที่จะลดผลกระทบของทรานเซียนท์คือ ใช้วงจร RC สนับเบอร์ (RC snubber) ดังรูปที่ 2.17 (ก)



รูปที่ 2.17 (ก) วงจร RC สนับเบอร์ (ข) ตัวเหนี่ยวนำที่ช่วยลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส

ถ้าเกิดทรานเซียนท์เร็วมากที่แหล่งจ่ายกำลัง อัตราเร็วของการเพิ่มขึ้นที่เอาโนดจะถูกลดลงเนื่องจากวงจร RC ที่ต่ออยู่ อัตราเร็วของการเพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความต้านทานที่เป็นโหลด และค่า R และ C

SCR ขนาดใหญ่จะมีค่าวิกฤตของอัตราการเพิ่มกระแสด้วย ถ้ากระแสเอาในดมีความเร็วในการเพิ่มเร็วกว่าค่าวิกฤตนี้จะมีความร้อนเกิดเป็นจุดเล็ก ๆ ใน SCR ทำให้ SCR พังได้ ถ้าเรานำเอาตัวเหนี่ยวนำมาอนุกรมดังรูปที่ 2.17 (ข) จะช่วยลดอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสได้ เช่นเดียวกับการใช้วงจร RC สนับเบรค ช่วยลดอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดัน

2.4 เทอร์โมคัปเปิล [4.5]

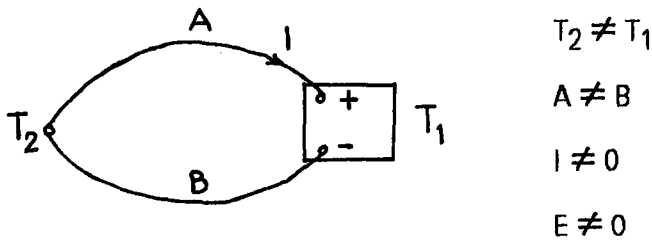
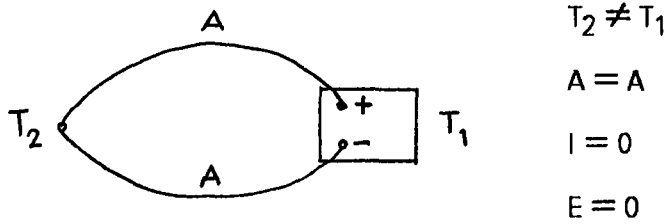
เตาไซนเดี่ยวในแนวตั้งที่สร้างขึ้นนั้น มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1200°C โดยเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิ เพราะ

1. มีความแม่นยำสูง
2. จะมีความแม่นยำยิ่งขึ้นไปอีกถ้าเลือกอุปกรณ์ที่มาเชื่อมต่ออย่างเหมาะสม
3. สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ - 270 ถึง 1820°C ขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมคัปเปิล

หลักการของเทอร์โมคัปเปิลก็คือ เมื่อเรานำโลหะ 2 ชนิดมาเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้าง และปลายข้างหนึ่งให้ความร้อนสูงกว่าอีกข้างหนึ่ง จะเกิดกระแสไหล

กระแสจะไหลอย่างต่อเนื่องผ่านวงจร ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไข 2 ข้อ (ดังรูปที่ 2.18) คือ

1. โลหะที่นำมาต่อกัน จะต้องเป็นโลหะต่างชนิดกัน
2. ที่ปลายทั้งสองมีความแตกต่างของอุณหภูมิ



$E_{AB} f(A, B, (T_2 - T_1))$

รูปที่ 2.18 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล

ถ้าตัดวงจรออกครึ่งหนึ่ง แล้วเปิดวงจรนั้นไว้จะมีแรงดันเกิดขึ้นค่าหนึ่งซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อกับปลายขั้ว ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบในปี 1891 โดย โทมัส ซีเบค (Thomas Seebeck) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ปรากฏการณ์ซีเบค" และแรงดันที่เกิดขึ้นเรียกว่า "แรงดันซีเบค" ซึ่งขนาดของแรงดันนี้ขึ้นกับชนิดของโลหะทั้งสองที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล และ หาได้จาก

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

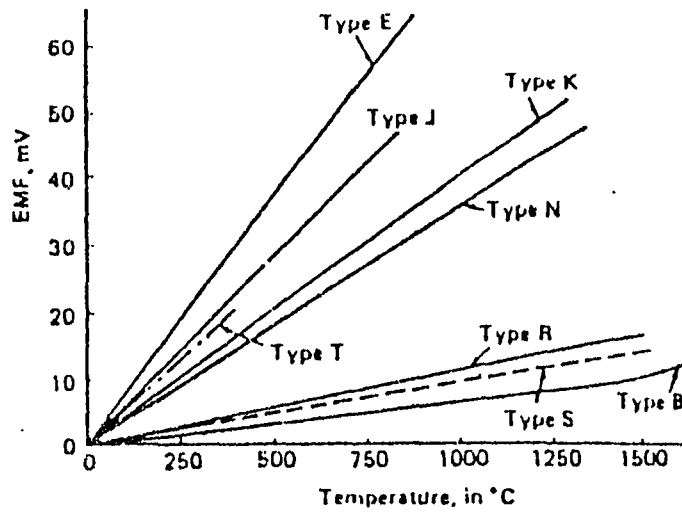
α_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแปรผัน เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck Coefficient) เทอร์โมคัปเปิลมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด มีช่วงของการวัดอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังตารางที่ 2.1 และมีความสัมพันธ์ของแรงดันกับอุณหภูมิดังรูปที่ 2.19

ตารางที่ 2.1 เทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

Type	Thermo elements	Typical alloy*	Base composition	Applications	
				Atmosphere	Maximum Temperature
J	JP	Iron	Fe	Oxidizing, reducing, inert	1400°F (760°C)
	JN	Constantan (J)	45% Ni-55% Cu		
K	KP	Chromel	90% Ni-10%Cr	Oxidizing, inert	2300°F (1260°C)
	KN	Alumel	94% Ni-Al, Mn, Fe		
N	NP	Nicrosil	Ni-14%Cr-1.4%Si	Oxidizing, inert	2300°F (1260°C)
	NN	Nisil	Ni-4.4%Si-0.1%Mg		
T	TP	Copper	OFHC Cu	Mild oxidizing, reducing, inert	634°F (370°C)
	TN	Constantan (T)	45% Ni-55% Cu		
E	EP	Chromel	90% Ni-10%Cr	Oxidizing, reducing, inert	1596°F (870°C)
		Constantan (T)	45% Ni-55% Cu		
R	RP	Pt-Rh	87% Pt-13% Rh	Oxidizing, inert	2696°F (1480°C)
	RN	Pt	Pt		
S	SP	Pt-Rh	90% Pt-10% Rh	Oxidizing, inert	2696°F (1480°C)
	SN	Pt	Pt		
B	BP	Pt-Rh	70% Pt-30% Rh	Oxidizing, inert	3092°F (1700°C)
	BN	Pt-Rh	94% Pt-6% Rh		

* Chromel, Alumel, and Constantan are trade names of Hoskins for KP, KN, and JN-TN. Tophel, Nial, and Cupron are trade names of Catech for JP, KN, and JN-TN. T1, T2, and Advance are trade names of Driver-Harris for KP, KN, and JN-TN.

ในการสร้างเตานี้ ได้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล type S เป็นตัววัดอุณหภูมิ เพราะเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้ที่อุณหภูมิสูงมาก เกิน 1450°C มีขั้วบวกเป็น แพลทินัม (Pt) 90% และ โรเดียม (Rh) 10% ขั้วลบเป็นแพลทินัมบริสุทธิ์ การใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ ควรหลีกเลี่ยงที่มีไอของตะกั่ว (Pb), สังกะสี (Zn), กำมะถัน (S), ฟอสฟอรัส (P) หรือ สารหนู (As) เพราะขั้วลบที่เป็นแพลทินัมบริสุทธิ์ต้องป้องกันพิเศษด้วยฉนวน



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

บทที่ 3

การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์

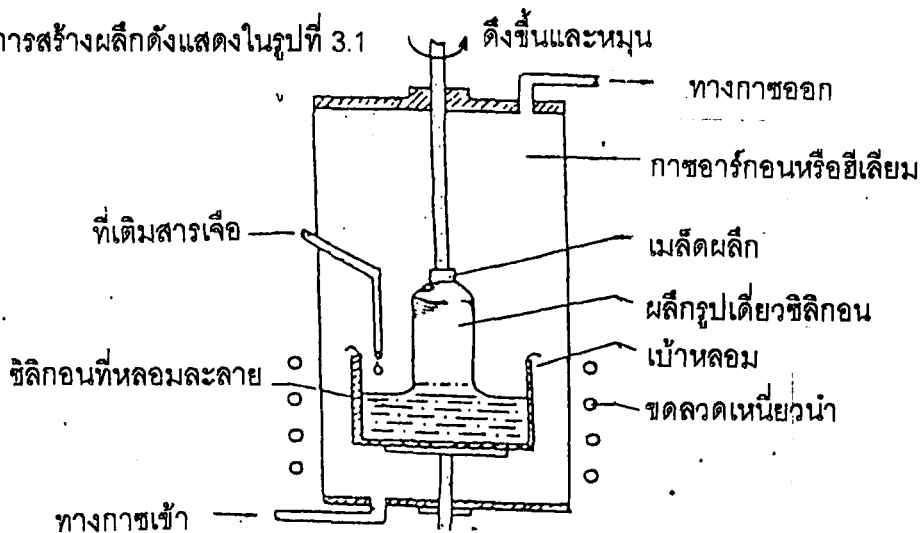
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ จะสร้างขึ้นมาจากผลึกของสารกึ่งตัวนำ โดยมีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) โดยผลึกเดี่ยวนี้อาจจัดเป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่สุด กล่าวคือมีสภาพเป็นผลึกตลอดทั้งเนื้อสารนั้น ดังนั้นการสร้างให้ได้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดผลึกเดี่ยวจึงถูกนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง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

3.1 การปลูกผลึกแบบต่าง ๆ [6.7]

ในการสร้างผลึกเดี่ยว ปกติมักใช้คำว่า การปลูกผลึก ในการสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดใด จำเป็นต้องใช้สารกึ่งตัวนำชนิดนั้นมาเป็นแบบ ในปัจจุบันนี้มีวิธีการปลูกผลึกแบบต่าง ๆ ดังนี้

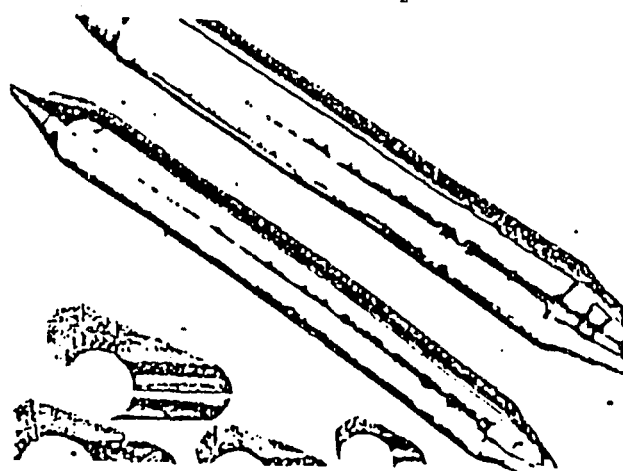
3.1.1 วิธีของไซโคราลสกี (Czochralski method)

วิธีของไซโคราลสกี (Czochralski method) หรือบางที่เรียกกันง่าย ๆ ว่า วิธีการดึง (Pulling method) โดยวิธีนี้เป็นการสร้างผลึกเดี่ยวจากสารกึ่งตัวนำขณะที่มีสภาพเป็นของเหลวโดยมีอุปกรณ์ในการสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีไซโคราลสกี

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่สกัดมาได้แต่ยังไม่ได้อยู่ในรูปของผลึกจะถูกนำมาใส่ลงในเบ้าหลอมซึ่งบรรจุอยู่ภายในใจกลางเตาหลอมชนิดพิเศษ ภายในเตาจะเป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน หรือฮีเลียม ที่เป็นปัญหาใหญ่และต้องระมัดระวังเป็นพิเศษก็คือ เรื่องความสะอาดภายในเตาหลอม เพราะถ้ามีสารอื่นหรือสิ่งแปลกปลอมชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการปะปนอยู่ภายในแล้วจะทำให้ผลึกที่สร้างขึ้นมานั้นไม่บริสุทธิ์และไม่เป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์ เบ้าหลอมที่ใช้บรรจุสารกึ่งตัวนำจะถูกทำให้ร้อนด้วย เคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เบ้าหลอมที่ใช้อาจเป็นพวกกราไฟท์หรือแก้วควอทซ์ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดหลอมเหลวของสารกึ่งตัวนำ เมื่อทำให้สารกึ่งตัวนำหลอมละลายกลายเป็นของเหลวแล้ว การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีนี้จะเริ่มต้นขึ้นโดยการจุ่มเมล็ดผลึกลงไปให้ติดกับผิวบนของสารกึ่งตัวนำที่เป็นของเหลว ปลายของเมล็ดผลึกจะเริ่มหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันภายในเบ้าหลอม จากนั้นเมล็ดผลึกก็จะถูกยกขึ้นอย่างช้า ๆ และ พร้อมกับหมุนรอบแกนด้วยเหนือระดับของสารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย ทำให้สารกึ่งตัวนำที่หลอมเหลวและติดกับเมล็ดผลึกขึ้นมานั้นเริ่มแข็งตัวและแปรสภาพเป็นผลึกเดี่ยว เช่นเดียวกับเมล็ดผลึกนั้น และด้วยอัตราการยกขึ้นและหมุนไปรอบ ๆ แกนอย่างช้า ๆ ของเมล็ดผลึก ทำให้ได้แท่งผลึกที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ดผลึกที่ใช้ ปัจจุบันสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ส่วนความยาวของแท่งผลึกก็ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการสร้าง ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์



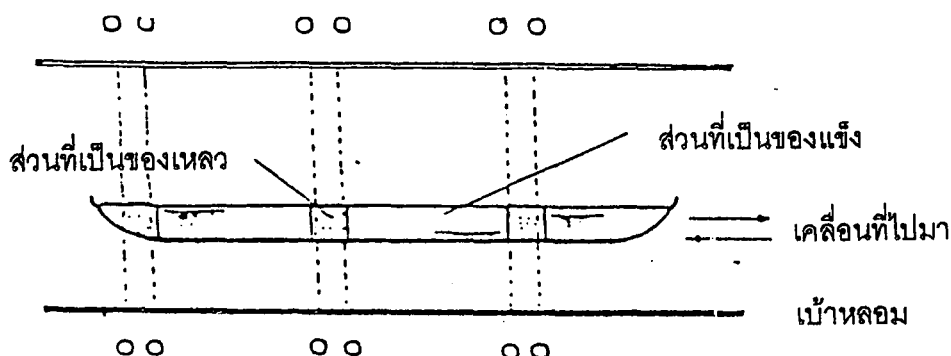
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของแท่งผลึกเดี่ยวที่สร้างขึ้นได้จากวิธีไซครอลสกี

ในทางปฏิบัติ มักจะเติมสารบางชนิดลงไปนในสารกึ่งตัวนำขณะที่หลอมเหลวอยู่ สารที่เราใช้เติมลงไปในนี้ เราเรียกกันว่า สารเจือ (impurity) ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกสารกึ่งตัวนำ ให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามต้องการ เช่น คุณสมบัติความนำไฟฟ้า เป็นต้น วิธีการที่เราเติมสารเจือลงไปขณะที่สร้างผลึกเช่นนี้เราเรียกว่า การโด๊ป (doping) สารเจือที่เราใช้โดยทั่วไปหมายถึงธาตุโลหะบางชนิด ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 5 ของตารางธาตุเช่น

อินเดียม (In) , อลูมิเนียม (Al) , โบรอน(B) , ฟอสฟอรัส (P) , สารหนู (As) , พลวง (Sb) เป็นต้น สารเจือเหล่านี้เมื่อเติมลงไปในการดึงตัวนำเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ผลึกที่ได้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เช่น มีความนำไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าผลึกสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ นอกจากนี้แล้ว สารเจือแต่ละชนิดจะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งสารเจือเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด (acceptor impurity) หรือที่เรียกว่าสารเจือชนิดพี (p-type impurity) เช่น ธาตุโบรอน , อินเดียม , อลูมิเนียม เป็นต้น และอีกชนิดหนึ่งก็คือสารเจือชนิดผู้ให้ (donor impurity) หรือที่นิยมเรียกว่าสารเจือชนิดเอ็น (n-type impurity) เช่น ธาตุฟอสฟอรัส , สารหนู เป็นต้น เมื่อเติมสารเจือชนิดพีหรือสารเจือชนิดเอ็นลงไปในการดึงตัวนำแล้วก็จะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นตามลำดับ

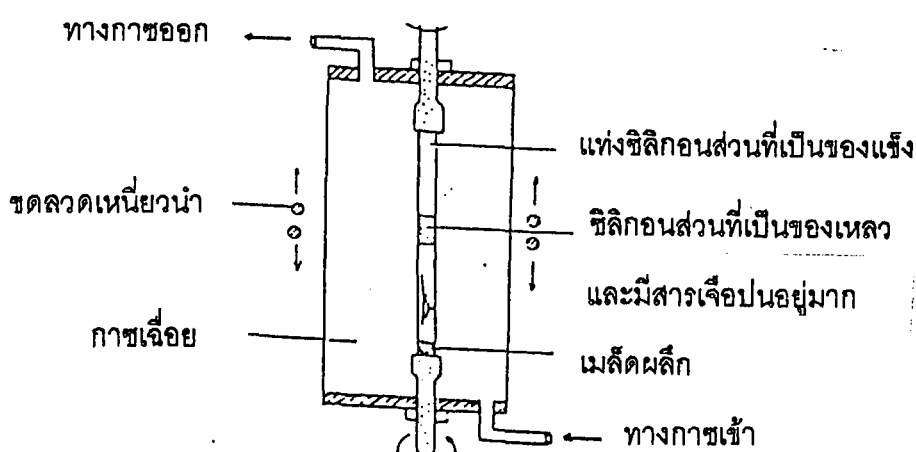
3.1.2 วิธีโซนรีไฟนิ่งค์ (Zone-refining)

เป็นวิธีการปลูกผลึกเดี่ยว โดยมีอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.3 หลักการของวิธีโซนรีไฟนิ่งค์ก็คือ การทำให้แท่งผลึกหลายรูปของสารกึ่งตัวนำถูกหลอมละลายเป็นของเหลวเฉพาะในบางส่วน ส่วนที่ถูกความร้อนหลอมเป็นของเหลวจะยังสามารถอยู่ได้ระหว่างส่วนสองส่วนซึ่งเป็นของแข็ง เมื่อเลื่อนตำแหน่งของขดลวดเหนียวนำ หรือ เลื่อนแท่งผลึกหลายรูปก็ตาม บริเวณหลอมละลายในแท่งผลึกก็จะเปลี่ยนไปส่วนที่เคยหลอมเหลวก็จะแข็งตัวและกลายเป็นผลึกเดี่ยวขึ้นมา ทั้งนี้โดยที่ส่วนปลายด้านหนึ่งของแท่งผลึกจะต้องมีเมล็ดผลึกติดอยู่ด้วย และสิ่งซึ่งไม่บริสุทธิ์ทั้งหลายก็จะถูกปิดออกมาไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งผลึก เมื่อตัดปลายทั้งสองด้านนี้ทิ้ง ก็จะทำให้ได้แท่งผลึกเดี่ยวที่บริสุทธิ์มากและสมบูรณ์ยิ่ง



รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองของอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการปลูกผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีโซนรีไฟนิ่งค์

วิธีโซนรีฟไนซิ่งนี้จะใช้สำหรับในกรณีที่ต้องการผลึกรูปเดี่ยวที่มีความบริสุทธิ์มากหรือเมื่อต้องการที่จะได้ปด้วยสารเจือก็ยังสามารถทำได้เช่นกัน ทั้งนี้โดยการจัดให้แท่งผลึกหลายรูปอยู่ ในลักษณะแนวตั้งและเติมสารเจือลงไป ในที่สุดจะได้แท่งผลึกรูปเดี่ยว ที่ถูกเจือด้วยสารเจืออย่างสม่ำเสมอซึ่งวิธีการนี้เราเรียกว่า ฟลอยติ่งโซน (Floating zone) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดคือ ขนาดของแท่งผลึกที่สร้างได้จะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากแรงตึงผิวมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้แท่งผลึกทรงตัวอยู่ได้

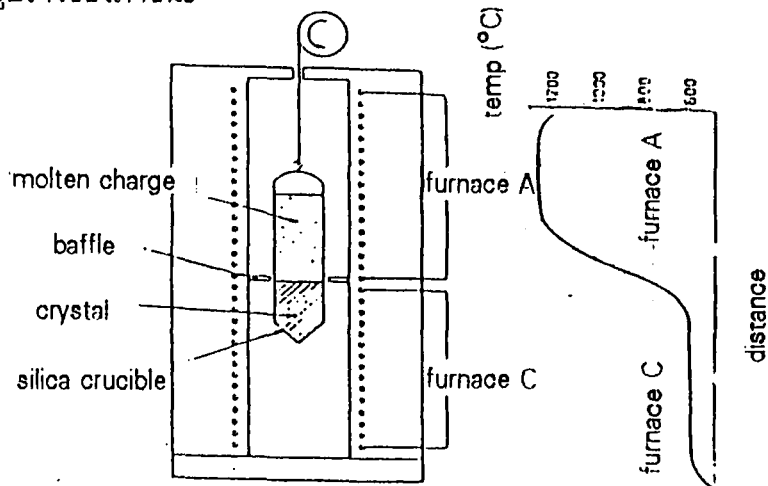


รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์การปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีฟลอยติ่งโซน

3.1.3 วิธีของบริดจ์แมน-สต็อคบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger Method)

หลักการโดยทั่ว ๆ ไปของการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อคบาร์เกอร์ คือ การให้ภาชนะที่บรรจุสารตั้งต้นเคลื่อนที่ผ่านเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (temperature gradient) ภายในเตาจากส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้นไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ การเลือกใช้ขนาดของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิก็น่าสนใจอย่างยิ่งมาก ในการเตรียมผลึกของสารประกอบซิลิคอนไดฟอสไฟท์ นิยมใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในช่วง $15-20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ เพื่อให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น การเตรียมผลึกโดยวิธีบริดจ์แมน-สต็อคบาร์เกอร์ ที่ใช้เตา 2 โซนในแนวตั้งจะแสดงดังรูปที่ 3.5 อุณหภูมิของเตา A จะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่บรรจุอยู่ในภาชนะ แต่เตา C จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ในส่วนของบัพเฟิล B (Baffle B) เป็นเกรเดียนท์ของอุณหภูมิมาระหว่างเตาทั้งสอง ภาชนะที่บรรจุสารสามารถปรับให้เลื่อนขึ้นลงไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาได้ เมื่อเริ่ม

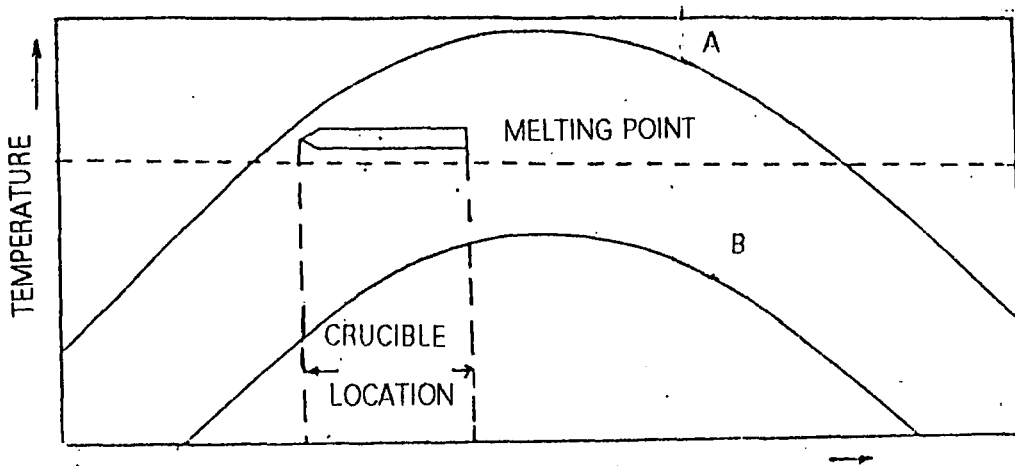
ทำการทดลองภาชนะที่บรรจุสารที่จะใช้เตรียมผลึกจะถูกแขวนไว้ที่ตำแหน่งกลางของเตา A จนกระทั่งสารภายในภาชนะหลอมเหลวในช่วงเวลาหนึ่งจึงเลื่อนภาชนะลงช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอ ผ่านบัฟเฟิล B จนเข้าไปอยู่ในเตา C สารกึ่งตัวนำจะเริ่มแข็งตัวจากปลายด้านแหลมจนกระทั่งแข็งตัวหมดทั้งแท่งตามรูปร่างของภาชนะ



รูปที่ 3.5 (ก) แสดงเตา 2 โชนในแนวตั้ง เพื่อใช้ปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ (ข) แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

จากวิธีดังกล่าวนี้ถ้าใช้การเลื่อนเตาขึ้นแทนที่จะเลื่อนภาชนะลง ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องอยู่นิ่งในตำแหน่งที่เหมาะสมขณะที่เตาเคลื่อนไป วิธีนี้จะเรียกว่าวิธีของสโตคบาร์เกอร์ (Stockbarger Method) โดยทั่วไปจะเห็นว่าทั้งสองวิธีให้ผลเกือบเหมือนกัน ดังนั้นจึงนิยมเรียกวธีการเตรียมผลึกทั้งสองวิธีนี้ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอนไม่ว่าจะเป็น การเลื่อนเตาหรือเลื่อนภาชนะว่าวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์(Bridgman-Stockbarger Method)

การเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาร์คเกอร์ นอกจากจะใช้กับเตาชนิด 2 โชนแล้วยังนิยมใช้กับเตาชนิดโชนเดี่ยว ซึ่งเตาโชนเดี่ยวจะมีลักษณะของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิดังแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโชนเดี่ยว

บริเวณตรงกลางเตาจะเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุดและจะค่อย ๆ ต่ำลงไปตามยาวสู่ปลายเตาทั้งสองข้าง เส้นโค้ง A และ B แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (temperature profile) ซึ่งอุณหภูมิตรงกลางเตาตามโปรไฟล์ B จะต่ำกว่า A ถ้ากำหนดเส้นประในรูปที่ 3.6 แสดงอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารที่จะใช้เตรียมเป็นผลึก สำหรับในกรณีที่มีการออกแบบให้ภาชนะเลื่อนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาได้อย่างสะดวก โดยให้โปรไฟล์ของอุณหภูมิในขณะทำการทดลองเป็นไปตามเส้นโค้ง A และภาชนะบรรจุสารที่กำลังหลอมเหลวจะอยู่บริเวณกลางเตาหลังจากที่ใช้เวลาในการหลอมสารระยะหนึ่งจึงเลื่อนภาชนะไปทางด้านซ้ายมือของรูปอย่างช้า ๆ และ สม้ำเสมอ สารที่อยู่ในส่วนปลายแหลมของภาชนะจะเริ่มแข็งตัวเป็นผลึกก่อนในขณะที่ผ่านจุดตัดระหว่างโปรไฟล์ A กับเส้นประจนกระทั่งภาชนะผ่านพ้นจุดนี้ไปแล้วสารจึงจะแข็งตัวทั้งหมดเป็นอันยุติการเตรียมผลึก

ในทำนองเดียวกันแทนที่เราจะใช้วิธีการเลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือ แต่เปลี่ยนเป็นการเลื่อนเตาไปทางด้านขวามือด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับการเลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือโดยออกแบบให้เตาเลื่อนไปอย่างอิสระและภาชนะต้องนิ่งอยู่กับที่ในขณะที่เตาเลื่อนไปสารจะเริ่มแข็งตัว อย่างช้า ๆ ด้วยอัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วของเตาที่เลื่อนไป

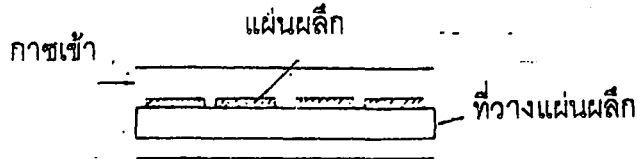
3.1.4 วิธีการพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapour deposition)

วิธีการพาไอระเหยสารเคมี หรือที่นิยมเรียกกันย่อ ๆ ว่า CVD คือขบวนการสร้างชั้นของสารประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งขึ้นบนฐานรองที่ถูกทำให้ร้อนโดยปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากความร้อน หรือ ปฏิกิริยาเนื่องจากการแยกตัวของธาตุในกาซที่เป็นสารประกอบ ขบวนการ CVD อาจจะทำได้หลายรูปแบบ แต่อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จำเป็นที่จะต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

3.1.4.1 รีแอคชั่นแชมเบอร์ (Reaction chamber)

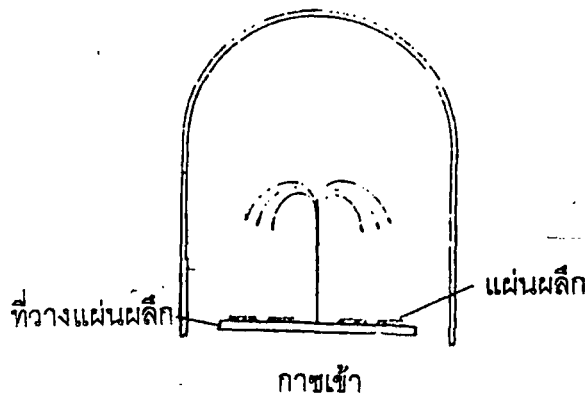
มีลักษณะเป็นครอบแก้วหรือท่อควอทซ์ซึ่งปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นภายในนี้จากลักษณะของรีแอคชั่นแชมเบอร์ ทำให้สามารถแยกระบบ CVD ออกได้เป็น 4 ระบบใหญ่ดังนี้

ก. ระบบแนวนอน (Horizontal systems) รีแอกชันแชมเบอร์จะมีลักษณะเป็นท่อควอทซ์ทรงกระบอกวางไว้ในแนวนอน แผ่นผลึกจะถูกวางอยู่บนโบริต และ ใส่เข้าไปภายในท่อควอทซ์นี้ การปล่อยก๊าซเข้าไปทำได้โดยให้เข้าที่ปลายท่อด้านหนึ่งผ่านแผ่นผลึกและออกไปทางปลายท่ออีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 3.7



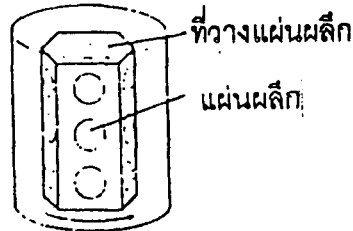
รูปที่ 3.7 แสดงรีแอกชันแชมเบอร์ระบบแนวนอน

ข. ระบบแนวตั้ง (Vertical systems) รีแอกชันแชมเบอร์จะมีลักษณะเป็นครอบแก้วโดยมีการปล่อยก๊าซเข้าไปกระทบกับด้านบนของผนังครอบแก้วแล้วสะท้อนกลับลงมากระทบกับผิวของแผ่นผลึกดังรูปที่ 3.8 ปกติโบริตซึ่งเป็นที่วางแผ่นผลึกจะถูกหมุนไปรอบ ๆ แกนกลาง เพื่อให้อุณหภูมิภายในครอบแก้วนี้สม่ำเสมอ



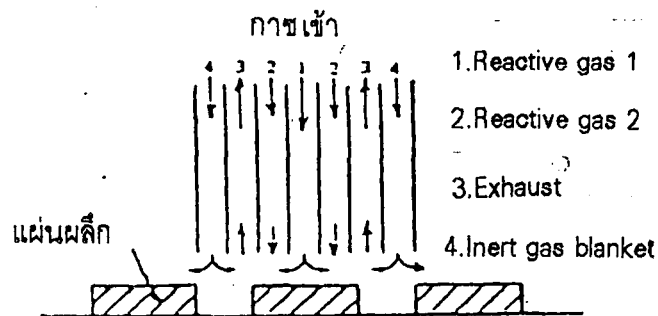
รูปที่ 3.8 แสดง รีแอกชันแชมเบอร์ระบบแนวตั้ง

ค. ระบบทรงกระบอกหรือระบบถัง (Cylindrical or Barrel systems) รีแอกชันแชมเบอร์จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แต่ที่วางแผ่นผลึกจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปถังทรงกระบอก อาจจะมีหลายเหลี่ยมอยู่ตรงกลางรีแอกชันแชมเบอร์ แผ่นผลึกจะถูกวางติดกับผิวทุกด้านของที่วางรูปถัง ก๊าซจะถูกปล่อยเข้ามาภายในรีแอกชันแชมเบอร์ทางด้านข้าง และที่วางแผ่นผลึกรูปถังนี้จะถูกหมุนไปรอบ ๆ แกน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงรีแอคชันแชมเบอร์ระบบทงกระบอกหรือทรงตั้ง

ง.ระบบปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม (Gas-blanketed downflow systems) ในระบบนี้มีลักษณะคล้ายกับระบบในแนวตั้ง กล่าวคือ ก๊าซจะถูกปล่อยให้ไหลลงมากกระทบกับผิวของแผ่นผลึกที่หมุนอยู่กับแท่นวาง ก๊าซเฉื่อยที่ใช้ได้แก่ไนโตรเจนจะถูก ปล่อยให้ลงมาให้คลุมแผ่นผลึกบริเวณรอบนอกเพื่อทำให้ปฏิกิริยาบริเวณภายในบนผิวแผ่นผลึกดำเนินไปได้ด้วยดี ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงรีแอคชันแชมเบอร์ระบบปล่อยให้ก๊าซเฉื่อยปกคลุม

3.1.4.2 ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซ (Gas flow control section)

เป็นส่วนซึ่งใช้สำหรับช่วยควบคุมการปล่อยก๊าซให้เข้าไปในรีแอคชันแชมเบอร์ ในปริมาณที่เหมาะสมและแน่นอน ประสิทธิภาพของส่วนนี้ขึ้นอยู่กับความแน่นอนในการควบคุมปริมาณของก๊าซ

3.1.4.3 ส่วนควบคุมลำดับและเวลา (Time and sequence control section)

เป็นส่วนหนึ่งของระบบ CVD ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของส่วนอื่น ๆ ของระบบ เพื่อควบคุมเวลา ลำดับขั้นตอนของการทำงานส่วนต่าง ๆ อาจควบคุมโดยระบบอัตโนมัติหรือระบบธรรมดาด้วยมือก็ได้ หรืออาจเป็นการควบคุมอัตโนมัติโดยใช้การสั่งงานจากคอมพิวเตอร์

3.1.4.4 แหล่งจ่ายความร้อนสำหรับชั้นฐาน (Heat source for substrates)

เป็นส่วนที่จ่ายความร้อนให้แก่แผ่นผลึกแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบโคลด์-วอลล์ (Cold-wall) การให้ความร้อนแก่ผลึกทำได้โดยใช้พลังงานความร้อนจากคลื่นวิทยุความถี่สูงหรือจากแสงอุลตราไวโอเลต โดยคลื่นความถี่สูงหรือแสงอุลตราไวโอเลตจะเหนี่ยวนำให้แก๊สในช่องว่างผลึกซึ่งฉาบด้วยคาร์บอนร้อน ดังนั้นแผ่นผลึกที่วางอยู่บนแท่นนี้จึงร้อนด้วย ในระบบนี้ผนังของรีแอกชันแชมเบอร์ จะได้รับความร้อนน้อยกว่าที่แผ่นผลึก ดังนั้นจึงมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวของรีแอกชันแชมเบอร์น้อย ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของระบบนี้

ระบบฮอท-วอลล์ (Hot-wall) การให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกทำได้โดยการให้กระแสจำนวนมากไหลผ่านแท่งความต้านทานที่อยู่รอบ ๆ รีแอกชันแชมเบอร์ คล้ายกับในเตาแพร่สาร ดังนั้นความร้อนจะกระจายผ่านรีแอกชันแชมเบอร์เข้าไปถึงแผ่นผลึกที่วางอยู่ภายใน กรณีนี้ผิวของรีแอกชันแชมเบอร์จะได้รับความร้อนสูง ทำให้เกิดมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิวด้านในของรีแอกชันแชมเบอร์ได้ง่าย

3.1.4.5 เอฟฟลูเอนท์ แฮนดลิง (Effluent handling)

เป็นส่วนสำคัญส่วนสุดท้ายของระบบ CVD ทำหน้าที่ควบคุมให้ก๊าซที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วรวมทั้งก๊าซเฉื่อย ไหลออกไปจากรีแอกชันแชมเบอร์ ก๊าซเหล่านี้จะถูกทำให้สะอาดปราศจากพิษ และถูกทำให้เย็นลง แล้วจึงปล่อยออกสู่อากาศภายนอก

3.2 การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ [1]

การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เป็นวิธีการปลูกผลึกจากสารละลาย โดยตัวทำละลาย อุณหภูมิสูงซึ่งหมายถึงฟลักซ์ เพราะทำให้การปลูกผลึกดำเนินไปได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของตัวถูกละลาย สิ่งนี้เป็นข้อดีของการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคในการปลูกผลึกแบบอื่น นอกจากนี้ยังมีเหตุผลอื่นอีกที่ใช้วิธีการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ ก็คือ

1. จุดหลอมเหลวของสารนั้น(ตัวถูกละลาย)สูงเกินกว่าที่เครื่องมือที่จัดหาสามารถทำได้
2. ลักษณะของสารที่มีจุดหลอมเหลวเป็นช่วง จะทำให้ได้สารที่เป็นของเหลวยาก เพราะมีสารบางส่วนระเหิดไปก่อนที่จะเป็นของเหลว

การปลูกผลึกวิธีนี้ยังสามารถใช้ได้กับการปลูกโลหะ , สารประกอบของสารกึ่งตัวนำ ฯลฯ

การปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์มีประวัติว่ามีการใช้มาเป็นร้อยปีแล้ว โดยใช้ในการปลูกผลึกของเครื่องประดับ อย่างทับทิมและมรกต ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของยุคเล่นแร่แปรธาตุ และเสียความสนใจลงไปจนกระทั่งในปี ค.ศ.1948 ก็ได้มีการกลับมาสนใจใหม่จากความก้าวหน้าทางด้านโพลีเมทาฟิสิกส์ เริ่มด้วยการปลูกผลึกแบบเสี้ยนไททาเนต โดย รีมัยกา (Remeika (1954)) และ ยิทเทรียม-ไอรอน-การเนต (yttrium iron garnet : YIG) โดย นีลเซนและเดียร์บอร์น (Nielsen & Dearborn (1958))

3.2.1 การเลือกฟลักซ์

สิ่งสำคัญในการเลือกฟลักซ์ คือ ฟลักซ์จะต้องมีความสามารถในการละลายสูง โดยไม่ไปรวมตัวเป็นสารประกอบอย่างถาวร และมีความสามารถในการละลายต่ำสำหรับแพลทินัมหรือสารที่ใช้ทำเบ้าหลอม (crucible) อื่น เช่น ตัวทำละลายที่มีตะกั่ว ไม่เหมาะกับการปลูกสารประกอบพวกโครเมต เนื่องจากจะรวมตัวแล้วเกิดเป็นสารประกอบตะกั่วโครเมต (lead chromates)

ฟลักซ์ที่จะใช้ในการปลูกผลึกนั้นมีจำนวนมากมาย และหลักการในการเลือกใช้ฟลักซ์เป็นตัวทำละลายที่ได้ผลดีที่สุดสำหรับการปลูกผลึกที่ต้องการนั้นยังไม่ได้มีกำหนดไว้ทุกชนิด

ทางเลือกหนึ่งในการเลือกใช้ตัวทำละลายก็คือ การทดลองตามเอกสารอ้างอิงสำหรับฟลักซ์ชนิดที่เคยมีผู้ใช้กับการปลูกสารประกอบที่ใกล้เคียงกับที่เราต้องการและประสบผลสำเร็จมาแล้ว ในทางปฏิบัติ มีฟลักซ์จำนวนน้อยที่สามารถใช้กับการปลูกผลึกมากกว่า 1 หรือ 2 ชนิด

ฟลักซ์ที่นิยมใช้จะปรากฏอยู่ในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของผลึกที่ได้จากวิธีใช้ฟลักซ์ ข้อมูลในตารางจะรวมถึงฟลักซ์บางตัวที่ไม่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางนัก

ฟลักซ์ที่นิยมใช้ส่วนมากจะเป็นออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) และ เลดฟลูออไรด์ (PbF₂) แต่ก็ เป็นสารที่มีพิษเพราะเป็นสารประกอบของตะกั่ว ความสามารถในการละลายของออกไซด์ที่หลอมยากในฟลักซ์เหล่านี้มีมาก แต่เหตุผลหลักในการเลือกใช้ฟลักซ์เหล่านี้ก็คือ ผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าและจำนวนมากกว่าที่ได้จากตัวทำละลายอื่น ๆ นิยมใช้ร่วมกับ โบรอนออกไซด์ (B₂O₃) เพราะพบว่า B₂O₃ ช่วยลดจำนวนจุดที่ก่อให้เกิดผลึก (nucleated crystal) ทำให้ได้ผลึกจำนวนน้อยลงแต่มีขนาดใหญ่มากขึ้น

ตารางที่ 3.1 รายชื่อฟลักซ์ชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะกับการปลูกผลึกสารแต่ละชนิด [1]

Flux	Melting point/ eutectic	Room temperature solvent	Examples of solute	Reference
BaO/B ₂ O ₃	870	HNO ₃	Ba ₂ Zn ₂ Fe ₁₂ O ₂₂ , YIG	Linares (1962)
BaO/Bi ₂ O ₃ /B ₂ O ₃	600	HNO ₃	NiFe ₂ O ₄ , ZnFe ₂ O ₄	Elwell <i>et al.</i> (1972)
Bi ₂ V ₂ O ₁₁	~900	HNO ₃	Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	Wanklyn (1970)
Li ₂ O/MoO ₃	532	H ₂ O	BeO, ZrSiO ₄	Newkirk & Smith (1965)
Na ₂ B ₄ O ₇	741	HNO ₃	NiFe ₂ O ₄ , Fe ₂ O ₃	Galt <i>et al.</i> (1950)
Na ₂ W ₂ O ₇	620	H ₂ O	CaWO ₄ , CoV ₂ O ₆	Kunimann <i>et al.</i> (1965)
PbF ₂	840	HNO ₃	Al ₂ O ₃ , MgAl ₂ O ₄	White & Brightwell (1965)
PbO/B ₂ O ₃	500	HNO ₃	In ₂ O ₃ , YFeO ₃	Remeika (1963)
PbO/PbF ₂	494	HNO ₃	GdAlO ₃ , Y ₃ Fe ₂ O ₁₁	Nielsen (1960)
PbO/PbF ₂ /B ₂ O ₃	~494	HNO ₃	Al ₂ O ₃ , Y ₃ Al ₂ O ₁₁	Van Uitert <i>et al.</i> (1965)
Pb ₂ P ₂ O ₇	824	HNO ₃	Fe ₂ O ₃ , GdPO ₄	Wickham (1962)
Pb ₂ V ₂ O ₇	720	HNO ₃	Fe ₂ TiO ₅ , YVO ₄	Feigelson (1968)

3.2.2 สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปฏิบัติ

ไม่ว่าจะใช้เทคนิคใด ปัญหาที่พบส่วนใหญ่ก็คือ ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ และ คุณสมบัติของขั้นตอนการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์

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

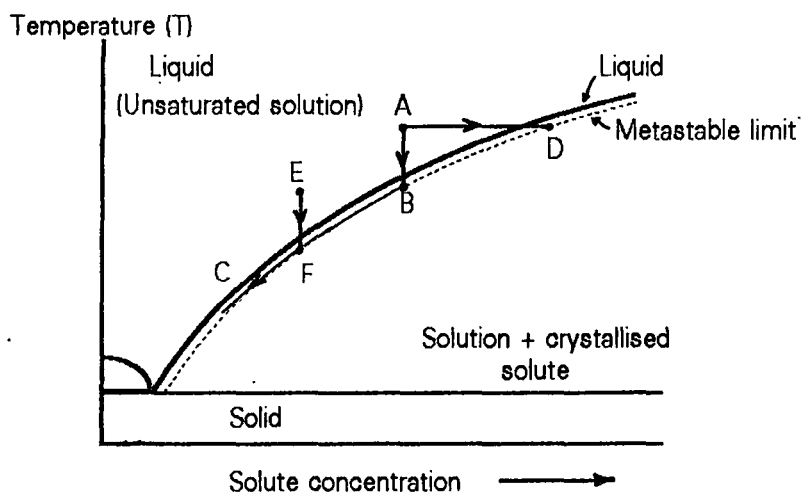
เตาสำหรับการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ เป็นเตาที่ออกแบบง่าย ๆ มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปิดอย่างมิดชิด หรือ เป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง

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

หลังจากทำการปลูกผลึกแล้ว จำเป็นจะต้องแยกผลึกจากสารละลายที่เหลืออยู่ ผลึกจะออกมาได้ง่าย ถ้าการปลูกผลึกเกิดขึ้นบน "โคลด์ฟิงเกอร์ (cold finger)" ซึ่งจะนำออกมาจากเบ้าหลอม โดยการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิจุดอิ่มตัว ถ้าการปลูกผลึกเกิดขึ้นบนผนังของเบ้าหลอม จะประหยัดเวลาได้โดย ปล่อยให้สารละลายกลายเป็นของแข็ง หรืออีกทางหนึ่ง โดยการทำให้เบ้าหลอมเย็นและวางที่อุณหภูมิจุดอิ่มตัว แล้วแยกตัวทำละลายออกจากผลึก กระบวนการนี้จะใช้เวลานานหลายสัปดาห์ ถ้าใช้เบ้าหลอมที่มีขนาดใหญ่

3.2.3 การลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ (Slow Cooling)

การปลูกผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว ต้องการให้เกิดการอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดซึ่งทำได้โดยการลดอุณหภูมิของสารละลายอย่างช้า ๆ , ทำให้ตัวทำละลายหรือฟลักซ์หายไป หรือโดยการใช้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วิธีการที่จะได้ผลึกจากฟลักซ์ที่หลอมเหลว : ABC เป็นวิธีการลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ .

AD เป็นวิธีที่ทำให้ฟลักซ์หายไป และ EF เป็นวิธีใช้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ [1]

วิธีทำให้ฟลักซ์หายไป วิธีนี้จะมีอุณหภูมิคงที่แต่เปลี่ยนอัตราส่วนของฟลักซ์กับสารที่ต้องการให้เกิดผลึก ฟลักซ์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวจะค่อย ๆ ระบายไปที่ละน้อย ทำให้ความเข้มข้นของสารที่ต้องการให้เกิดผลึก (solute) เพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สารละลายค่อย ๆ เปลี่ยนจากสถานะของเหลวมาอยู่ในสถานะเมตาสเตเบิล (metastable) และเกิดผลึกได้

วิธีใช้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ จะลดอุณหภูมิสัมพันธ์กับระยะทางภายในเตา อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่าง อุณหภูมิต่อระยะทาง (dT/dx) หรือ สัมพันธ์กับระยะเวลา อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่าง อุณหภูมิต่อระยะเวลา (dT/dt) สารละลายก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นสถานะเมตาสเตเบิล และเกิดผลึก เช่นกัน

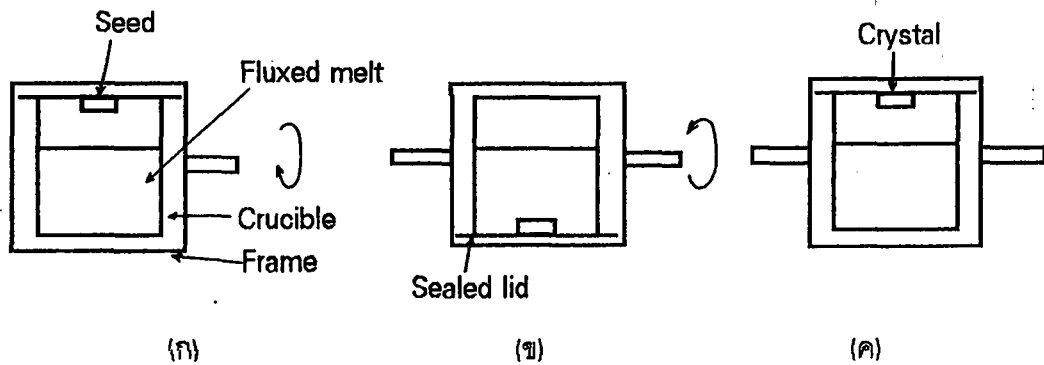
วิธีการลดอุณหภูมิต่าง ๆ จะลดอุณหภูมิจากจุด A มายังจุด B สารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสถานะของเหลวมาเป็นสถานะเมตาสเตเบิล และเกิดเป็นผลึกบางส่วนแล้วลดอุณหภูมิลงเรื่อย ๆ ก็จะทำให้เกิดผลึกมากขึ้น วิธีนี้นิยมใช้กันมาก เพราะใช้เครื่องมือง่าย ๆ ราคาถูก เหมาะสำหรับการปลูกผลึกสารชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็ก

ก่อนจะทำการลดอุณหภูมิจากฟลักซ์ที่หลอม จำเป็นจะต้องรักษาอุณหภูมิที่สถานะของเหลวให้คงที่ ประมาณ 12 - 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลาย ละลายได้สมบูรณ์แล้ว สิ่งนี้เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะว่าถ้าสารละลาย ละลายไม่ดีแล้ว อนุภาคที่อยู่ในสารละลายจะประพฤติตัวเป็นจุดที่ก่อให้เกิดผลึก

ในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิจะต้องอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น การเกิดผลึกจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับฐานของเบ้าหลอม เมื่อลดอุณหภูมิจากบริเวณสถานะเมตาสเตเบิล ผลึกจะเริ่มเกิดจากจุดเล็ก ๆ

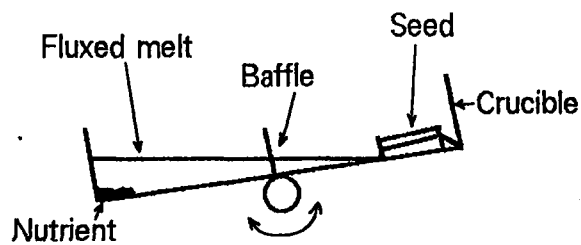
3.3.4 การปลูกผลึกโดยใช้ผลึกเป็นตัวอย่าง (Seeded Growth)

ปัญหาที่เกี่ยวกับจุดที่ก่อให้เกิดผลึกเล็ก ๆ จะกำจัดได้โดยการใช้ผลึกส่อ ผลึกที่นำมาส่อจะนำมาลอยไว้บนผิวน้ำของสารละลาย , โดยการติดที่ฐานของเบ้าหลอม หรือ ใช้ที่จับ ความยากของวิธีนี้ก็คือ การนำให้เกิดผลึกของตัวอย่างเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด และต้องเกิดก่อนผลึกที่จะเกิดบนจุดที่ก่อให้เกิดผลึกเล็ก ๆ เบนเนตต์ (Bennett (1968)) และ โทลส์คดอร์ฟ (Tolsdorf (1968)) ได้ทำการทดลองโดยติดผลึกส่อไว้ที่ฝาปิดของเบ้าหลอมที่ปิดสนิท ดังรูปที่ 3.12 (ก) ลดอุณหภูมิจากส่วนล่างที่เป็นของเหลวช้า ๆ และพลิกเบ้าหลอม (รูปที่ 3.12 (ข)) ดังนั้นตัวอย่างก็จะจมอยู่ในสารละลายที่อิ่มตัวยิ่งยวด ลดอุณหภูมิลงช้า ๆ อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานพอสมควร หลังจากนั้นจึงพลิกเบ้าหลอมกลับ (รูปที่ 3.12 (ค))



รูปที่ 3.12 เทคนิคการปลูกเบ้าหลอม

ลินเนรส์ (Linares (1968)) ใช้วิธีการคล้าย ๆ กัน แต่ใช้การเอียงเบ้าหลอมไปมา ดังรูปที่ 3.13 เมื่อเสร็จกระบวนการปลูกผลึก เบ้าหลอมก็จะกลับมาอยู่ในตำแหน่งปกติ แล้วทำการกำจัดฟลักซ์.



รูปที่ 3.13 เทคนิคการเอียงเบ้าหลอม

บทที่ 4

โครงสร้างผลึกของ In_2O_3

4.1 โครงสร้างของผลึก

ผลึกเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ การเรียงตัวของอะตอมทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันทำให้เกิดเป็นผลึกที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน การเรียงตัวกันของอะตอมอย่างเป็นระเบียบนั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ในทางอุดมคติ แต่ตามสภาพความเป็นจริงผลึกที่มีอยู่จริงในโลกนี้ไม่ได้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ทั้งหมด มักจะมีข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกอยู่บ้าง เช่น เกิดเป็นช่องว่างของอะตอม เกิดมีอะตอมชนิดอื่นแทรกเข้าไปเป็นส่วนเกิน จากการมีข้อบกพร่องต่าง ๆ ของผลึกทำให้คุณสมบัติของของแข็งเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไปได้ และทำให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์คลาดเคลื่อนได้ เช่น การยืดหยุ่นของโลหะเลวลง , ผลึกที่เคยโปร่งแสงอาจเปลี่ยนสีได้ , สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง , การแพร่กระจายของอะตอมภายในวัสดุอาจดีขึ้น

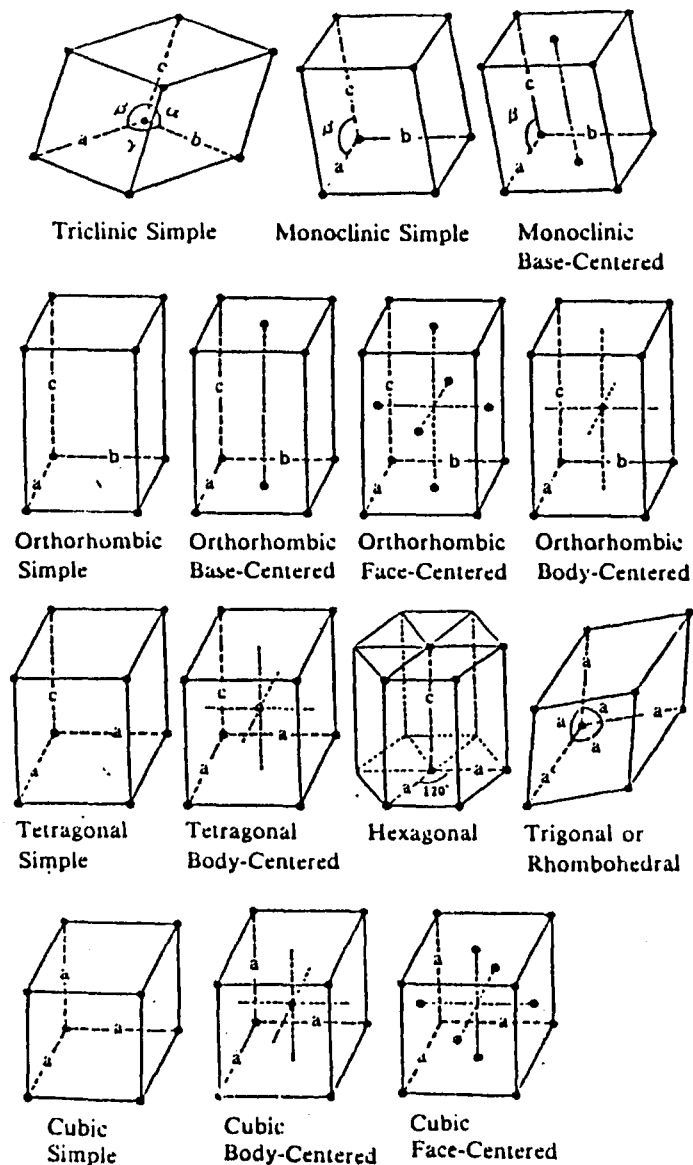
สเปซแลตทิส (space lattice) หรือ แลตทิสของบราวเวียส (Bravais lattice) เป็นเพียงรูปแบบที่จินตนาการขึ้นมาอธิบายลักษณะการเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกไม่ใช่ตำแหน่งการจัดเรียงตัวของอะตอมต่าง ๆ จริง เป็นเพียงรูปทรงทางเรขาคณิตของจุดต่าง ๆ ในสเปซที่สร้างขึ้นเพื่อใช้อธิบายโครงสร้างทางผลึกเท่านั้น ดังนั้นจากการแบ่งกลุ่มของโครงสร้างทางผลึกโดยบราวเวียส (Bravais) นั้นได้แบ่งทั้งหมดออกเป็น 14 สเปซแลตทิส ดังตารางที่ 4.2 และจัดรวมเป็นระบบใหญ่ ๆ ได้ 7 ระบบ ดังตารางที่ 4.1 [8]

ในโครงการนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกแบบบิกซ์ไมท์ (bixbyte) [9] ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก (body center cubic) [10,11] เนื่องจากเป็นโครงสร้างผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ก็จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ที่เรียกว่า โครงสร้างผลึกแบบรูทิล (Rutile) [10,11] ด้วยเนื่องจากเป็นโครงสร้างผลึกของ ทินออกไซด์ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4 และสำหรับโครงสร้างผลึกในลักษณะอื่น ๆ จะขอไม่กล่าวถึง

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างทางผลึกชนิดต่าง ๆ

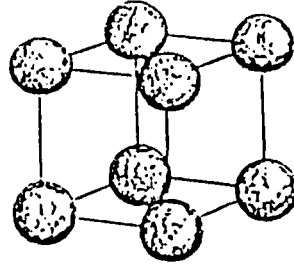
ระบบ	Bravais lattice	จำนวนชนิด	ลักษณะของ unit cell
Triclinic	simple	1	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Monoclinic	simple based - centered	2	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$; $\beta \neq 90^\circ$
Orthorhombic	simple based - centered body - centered faced - centered	4	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
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 - Rhomboidal	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 4.2 ตารางแสดงลักษณะรูปแบบทั้ง 14 ของแลตทิซของบราวเวียสใน 3 มิติ



4.2 โครงสร้างผลึกแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก

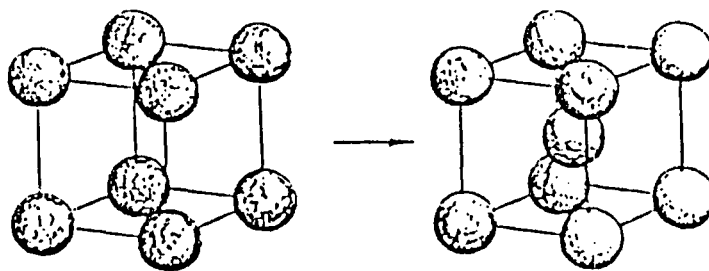
โครงสร้างผลึกแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก จะมีรูปแบบมาจากโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก (simple cubic) โดยโครงสร้างผลึกของซิมเปิลคิวบิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของคิวบิก (cubic unit cell) นั้นจะบรรจุอะตอมเดี่ยว ๆ อยู่ที่มุม ดังรูปที่ 4.1 โดยในหนึ่งหน่วยเซลล์ ของโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก นั้นจะประกอบด้วย 1 อะตอมเท่านั้น



Simple cubic structure

รูปที่ 4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก

แต่สำหรับโครงสร้างผลึกแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก จะมีโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก แต่ที่จุดศูนย์กลางของทุก ๆ อะตอมที่อยู่ที่มุมจะมีอะตอมที่เป็นธาตุชนิดเดียวกันมาแทรกอยู่ กล่าวคือ ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วย 2 อะตอมโดยอะตอมหนึ่งอยู่ที่ $(0,0,0)$ และอีกอะตอมอยู่ที่ $(1/2, 1/2, 1/2)$ ซึ่งได้แสดงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก กับโครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก ไว้ดังในรูปที่ 4.2



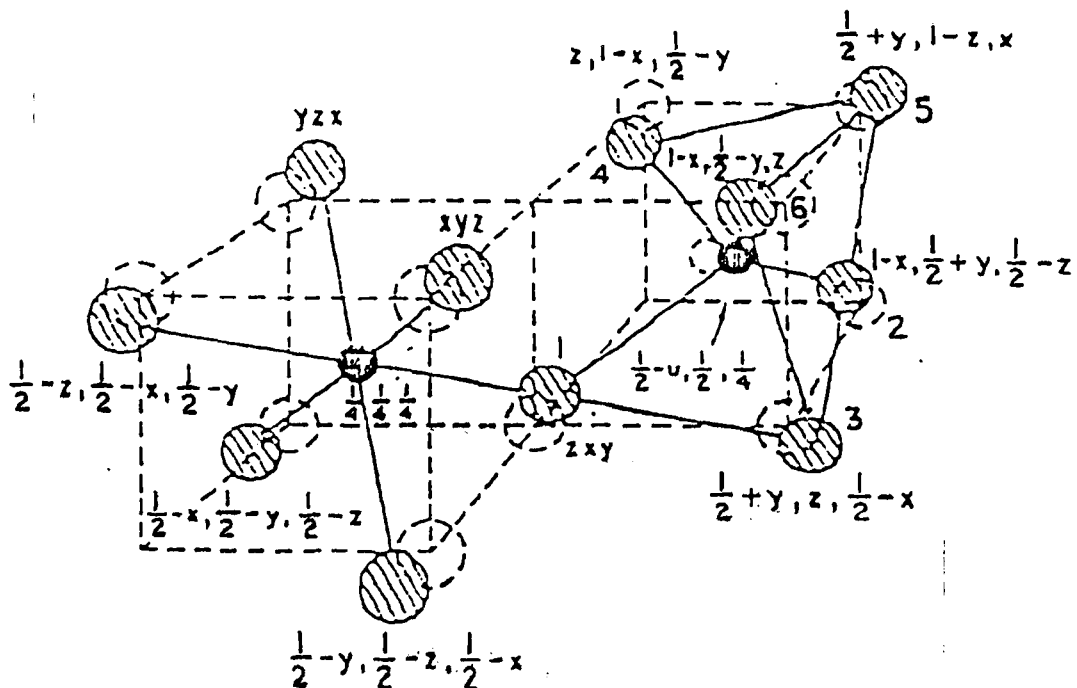
Simple cubic structure

Body centered cubic structure

รูปที่ 4.2 แสดงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกแบบซิมเปิลคิวบิก กับ โครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก

4.3. โครงสร้างผลึกแบบบิกไซต์

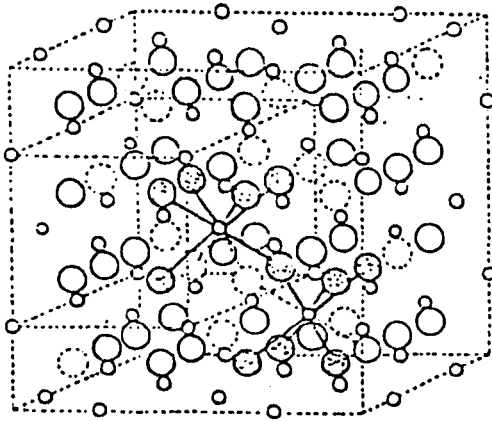
สารประกอบออกไซด์ In_2O_3 มีโครงสร้างผลึกแบบบิกไซต์ จัดอยู่ในตระกูลโลหะออกไซด์ (metallic sesquioxide) ที่มีโครงสร้างแบบซี-แรร์เอิร์ท (c - rare earth) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{C} - \text{M}_2\text{O}_3$ (M คือ Ga, Tl, In เป็นต้น) อีออน M^{3+} และ O^{2-} ยึดเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถอธิบายโครงสร้างได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้าง บอดีเซ็นเตอร์คิวบิกแบบบิกไซต์ [9]

พิจารณาโครงสร้างของ CaF_2 ดังรูปที่ 4.4 ถ้านำประจุลบออกเป็นจำนวน $1/4$ ของทั้งหมด (ตามอะตอมที่เป็นเส้นประ) และทำการจัดเรียงอะตอมใหม่อย่างซ้ำ ๆ จะได้โครงสร้างแบบซี - แรร์เอิร์ท ($\text{C} - \text{M}_2\text{O}_3$) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้อะตอม M จะสร้างพันธะกับอะตอมออกซิเจน 6 พันธะ และอะตอมของออกซิเจนจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของ M อีก 4 พันธะ ส่วนการจัดเรียงพันธะทั้ง 6 นี้ จะผิดแปลกออกไปจากปกติ คือ แทนที่ในหนึ่งหน่วยเซลล์รูปบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก จะมีอะตอมอยู่ครบที่มุมทั้งแปด แต่ในโครงสร้างแบบนี้จะมี 2 มุม ที่อะตอมขาดหายไป ซึ่งแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. อะตอม 2 อะตอม ขาดหายไปจากมุมของลูกบาศก์แบบเฟซไดอะโกนอล (face diagonal) หมายถึงมุมที่อะตอมขาดหายไป 2 มุมนั้นจะอยู่ด้านเดียวกันและเป็นมุมตรงข้ามกัน
2. อะตอม 2 อะตอม ขาดหายไปจากมุมของลูกบาศก์แบบบอดีไดอะโกนอล (body diagonal) หมายถึงมุมที่อะตอมขาดหายไป 2 มุมนั้นอยู่คนละด้านและเป็นมุมตรงข้ามกันและการขาดหายไปของอะตอมทั้ง 2 แบบแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของ CaF_2 ที่มีการขาดหายไปของอะตอม

การขาดหายไปของอะตอมทั้ง 2 กรณีนี้ทำให้ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนทั้ง 6 พันธะแตกต่างกันไป เนื่องจากการขาดหายไปของแรงผลักรั้วทำให้อะตอมที่เหลือถูกดึงดูดด้วยแรงที่ต่างจากเดิม โดยในกรณีแรกจะทำให้ความยาวพันธะต่างกัน 3 กลุ่ม คือ

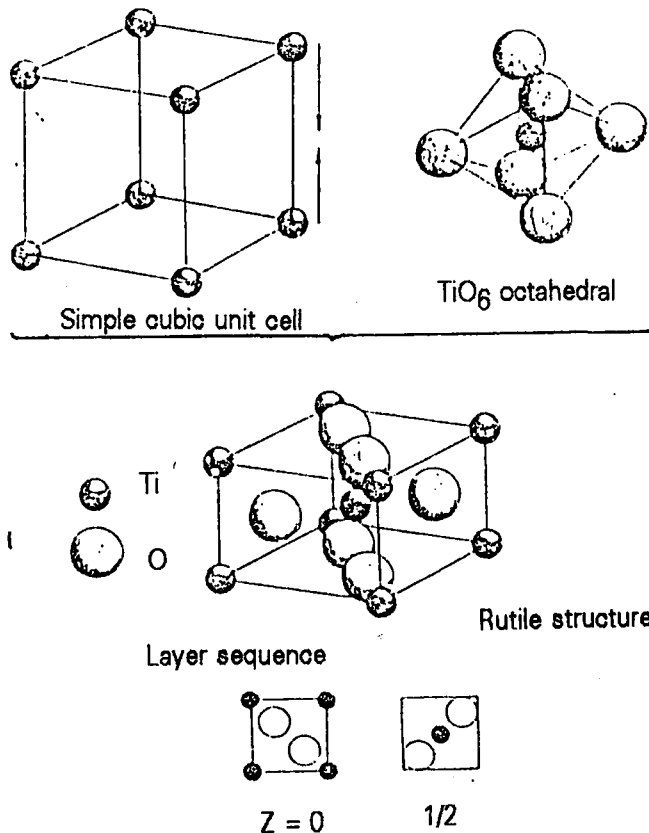
1. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ 2.13 \AA มี 2 พันธะ
2. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ 2.19 \AA มี 2 พันธะ
3. ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนเท่ากับ 2.23 \AA มี 2 พันธะ

สำหรับกรณีที่ 2 ความยาวพันธะระหว่างอินเดียมกับออกซิเจนทั้ง 6 พันธะมีค่าเท่ากันหมดคือ 2.18 \AA ซึ่งเท่ากับค่าเฉลี่ยความยาวพันธะ 3 กลุ่มในกรณีแรก

4.4 โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (rutile structure)

โครงสร้างแบบรูไทล์ (AO₂ : โดยที่ A คือ Ti, Sn, Ge เป็นต้น) สามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยเซลล์รูปเตตระโกนอล (tetragonal) ที่มีอะตอม A อยู่ที่แต่ละมุมของเซลล์ และ A ที่เป็นอะตอมกลางจะสร้างพันธะกับออกซิเจน 6 อะตอมแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) ที่บิดเบี้ยวอยู่ตรงกลางดังรูปที่ 4.5 สำหรับออกตะฮีดรอลดังกล่าว อิออนของ A แต่ละอิออนจะล้อมรอบด้วยอิออนของออกซิเจนใกล้ที่สุด 4 อิออน และอยู่ห่างออกไปอีก 2 อิออน อิออนของ A จะอยู่ในหน่วยเซลล์เตตระโกนอล ณ ตำแหน่ง $0,0,0$; $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ และอิออนของออกซิเจนอยู่ ณ ตำแหน่ง $x,0,0$; $\bar{x},\bar{x},0$; $\frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}$; $\frac{1}{2}-x, \frac{1}{2}+x, \frac{1}{2}$

สารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์นี้มีหลายสารประกอบ เช่น GeO₂, IrO₂, α-MnO₂, MoO₂, NbO₂, CsO₂, PbO₂, RuO₂, TiO₂, SiO₂ (H.P.), SnO₂, AlAsO₄ (H.P.), TeO₂, CrVO₄ เป็นต้น



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์

บทที่ 5 การทดลอง

ในการดำเนินงานชิ้นแรกได้เริ่มจากศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับเตาในแนวตั้ง , สาร ITO , วิธีการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติของผลึก จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบสร้างเตาและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สกลศาสตร์ ตลอดจนการเตรียมผลึกและนำผลึกที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งรายละเอียดของการสร้างในแต่ละส่วนจะได้กล่าว ต่อไป

5.1 เตาในแนวตั้ง

5.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา

1. ขดลวดความร้อน สาเหตุที่เลือกใช้ลวดนำความร้อนเป็นตัวที่ให้ความร้อนเนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย อุณหภูมิมีความสม่ำเสมอ มีเสถียรภาพสูง ราคาเหมาะสมกับประสิทธิภาพ และไม่มีมลภาวะในขณะที่ทำการทดลอง

เลือกใช้ขดลวดโลหะประเภทแคนทัล เอ 1 (kanthal alloy grade A1) ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1375°C โดยเลือกชนิดที่เป็นเส้นลวดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 cm และมีความยาวประมาณ 18 m

2. ปูนทนไฟ ชนิดที่มีชื่อทางการค้าว่า MORTAR 30 HM และ คอนกรีตทนไฟ CAST 15 มีลักษณะเป็นผงปูนต้องผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน

3. ฉนวนกันความร้อน ใช้เซรามิกส์ไฟเบอร์ ซึ่งเซรามิกส์ที่มีขายตามท้องตลาดมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดเป็นก้อนเหมือนสำลี และ ชนิดที่เป็นแผ่น เลือกใช้ชนิดที่เป็นก้อนเหมือนสำลีเพราะมีราคาถูกกว่า

4. ท่อพีวีซี , แผ่นสังกะสี และ แผ่นพลาสติก ใช้เป็นแบบในการหล่อเตา

5. แผ่นอลูมิเนียม ทำกล่องเตา

6. ลวดตาข่าย ช่วยให้เตามีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

5.1.2 วิธีและขั้นตอนในการสร้างเตา จะแยกออกเป็นส่วน ๆ ดังนี้ คือ

5.1.2.1 ท่อเตา

ทำการหล่อขึ้นเองโดยใช้ปูนทนไฟ มีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. ใช้ท่อพีวีซีเป็นแบบในการหล่อ โดยนำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 7.8 cm. มาผ่าครึ่งตามแนวทรงกระบอกโดยตลอด เพื่อง่ายแก่การถอดแบบ
2. นำแผ่นไม้ขนาด $3 \times 80 \times 0.4$ cm.³ 2 แผ่น มาวางระหว่างรอยผ่าให้เสมอกับผิวนอกของท่อ (เพื่อชดเชยส่วนที่สูญเสียไปในการผ่าครึ่ง) แล้วใช้แผ่นเหล็กชั้นน้อด ยึดแผ่นไม้ทั้งสองไม่ให้เคลื่อนเข้ามาหากัน
3. นำแผ่นสังกะสีและแผ่นพลาสติกมาพันรอบท่อ แล้วยึดให้แน่น (แต่สามารถถอดออกได้ในภายหลัง) โดยพันแผ่นสังกะสีก่อนแล้วจึงพันแผ่นพลาสติก
4. ทาน้ำมันให้ทั่วแผ่นพลาสติกก่อนพันตลอด เพื่อไม่ให้ปูนติดกับแผ่นพลาสติก
5. พันตลอดนำความร้อนไปรอบ ๆ ท่อ โดยมีระยะห่างระหว่างรอบประมาณ 0.6 cm. เป็นระยะตามแนวแกนทรงกระบอกประมาณ 50 cm. พันให้แน่นและตลอดแต่ละรอบต้องไม่สัมผัสกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรเมื่อจ่ายพลังงานให้กับเตา แล้วเหลือลวดไว้ที่ปลายท่อเตาทั้งสองพอสมควรเพื่อนำมาต่อกับส่วนจ่ายพลังงานภายนอกหลังจากที่บรรจุท่อเตาลงกล่องแล้ว
6. นำปูนมาผสมกับน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดให้ คือ ปูนทนไฟ(MORTAR 30 HM) 50 kg ต่อ น้ำ 3-4 ลิตร โดยปริมาณน้ำที่เหมาะสมนั้น สังเกตได้จากบริเวณผิวหน้าจะมีน้ำเอี่ยม จากนั้นนำปูนที่ผสมได้ที่แล้วไปโอบรอบตลอดที่พันไว้ ไม่ต้องหนามาก
7. รอให้ปูนหมาด ๆ แล้วจึงพันลวดตาข่ายรอบปูนที่โอบที่ตลอด เพื่อไม่ให้ท่อที่มีความแข็งแรง ไม่หักง่าย รูปร่างลักษณะจะเป็นดังรูปที่ 5.1
8. โอบปูนทับอีก 1 ชั้น พยายามไล่ฟองอากาศออกให้หมด
9. ทำซ้ำข้อ 1.6 และ 1.7 อีก 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของท่อเตา
10. เมื่อปูนแห้งแล้ว จึงเอาพิมพ์ภายในออก
11. นำท่อเตาที่แห้งแล้วไปบ่ม โดยการแช่น้ำเป็นเวลา 2-3 สัปดาห์ เพื่อให้ปูนมีความแกร่งมากขึ้น ไม่แตกร้าวง่าย

ในขั้นตอนนี้เกิดปัญหาขึ้น คือ ปูนที่นำมาหล่อท่อเตาไม่แห้งแม้จะทิ้งไว้เป็นเวลานานมากกว่าปูนปกติแล้วก็ตาม จึงพยายามแก้ปัญหานี้ โดยการผสมทรายในอัตราส่วนต่าง ๆ ถ้าใช้ปูนที่ผสมแล้วเป็นปริมาณน้อย ปูนก็แห้ง แต่ไม่แข็ง และ แตกร่วน จึงมาทดลองทำท่อเตาตามขั้นตอนเดิมแต่ก็ยังคงเป็นเช่นเดิมอีก จึงแก้ปัญหานี้โดยการ เปลี่ยนชนิดของปูนที่ใช้ใหม่ จากเดิม "MORTAR 30 HM" เป็น "CAST 15" แล้วผสมน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ข้างต้น นำมาทำท่อเตาตามขั้นตอนเดิม ปรากฏว่าปูนแห้งภายในเวลาเพียง 30 นาที เมื่อผ่านขั้นตอนต่าง ๆ แล้วก็จะได้ท่อเตาที่เสร็จสมบูรณ์

5.1.2.2 ส่วนประกอบอื่น ๆ ของเตา

ฝาเตา : หล่อปูนให้มีขนาด $40 \times 40 \times 2.5$ cm.³ เว้นช่องตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 cm. (ให้ท่อเตาสอดได้) และบริเวณใกล้เคียง สำหรับชั้นนอตยึดกับกล่อง ดังรูปที่ 5.2

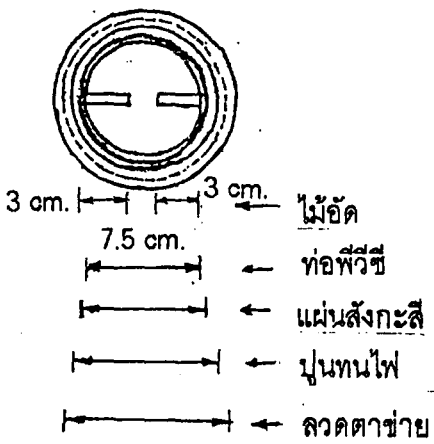
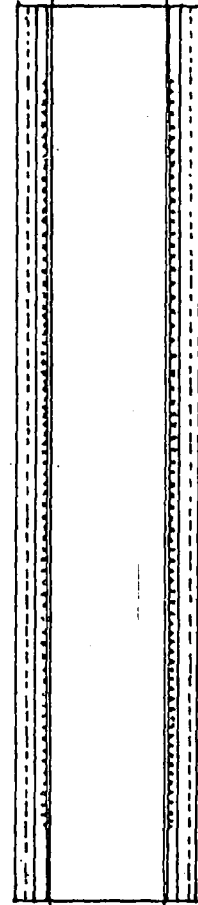
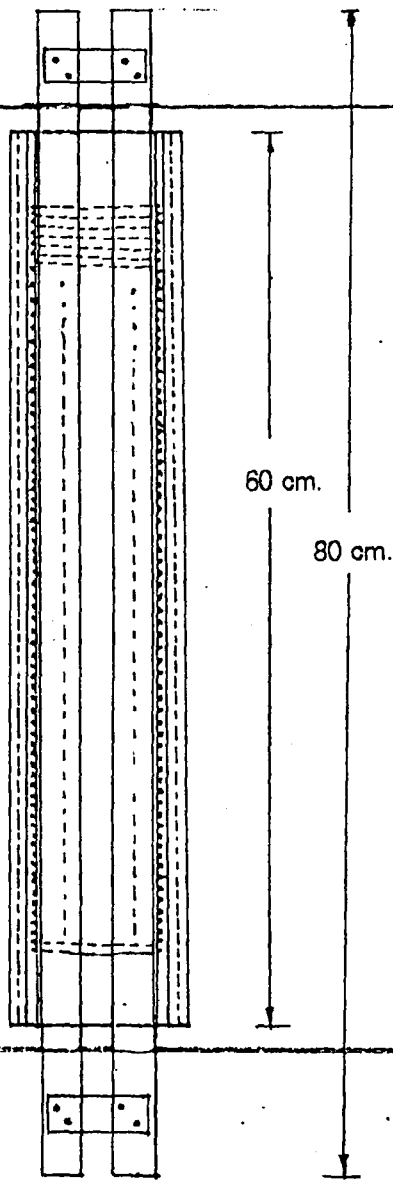
กล่อง : ใช้แผ่นอลูมิเนียมมาพับ ให้มีขนาด $40 \times 40 \times 52$ cm.³ ดังรูปที่ 5.3

ประกอบส่วนต่าง ๆ ลงกล่อง โดยบรรจุเซรามิคส์ไฟเบอร์ลงในบริเวณที่ว่างภายในกล่องให้แน่นพอสมควร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนขณะใช้งาน

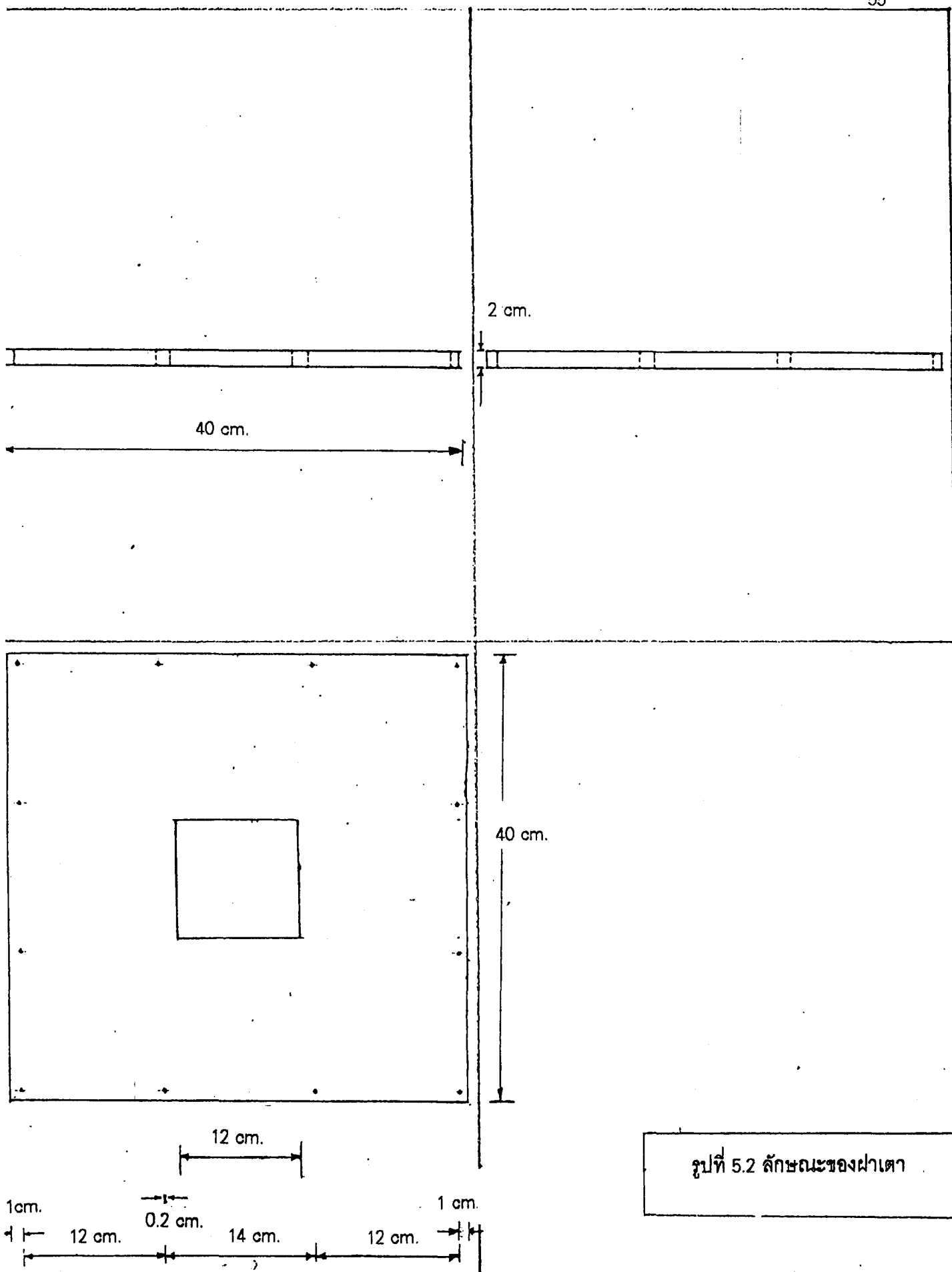
ก่อนที่จะนำเตาไปใช้งาน จะต้องเริ่มจ่ายไฟให้แก่เตาน้อย ๆ เป็นระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อน เพื่อไล่น้ำในท่อเตาออกช้า ๆ เป็นการป้องกันไม่ให้น้ำแตกร้าวในภายหลัง

5.2 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไ้ป้อนแก่ขดลวดความร้อน

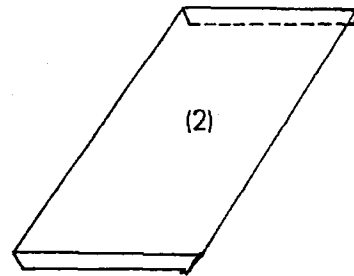
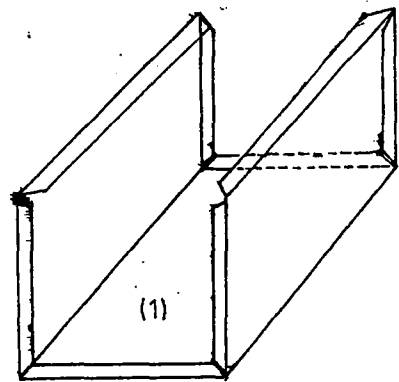
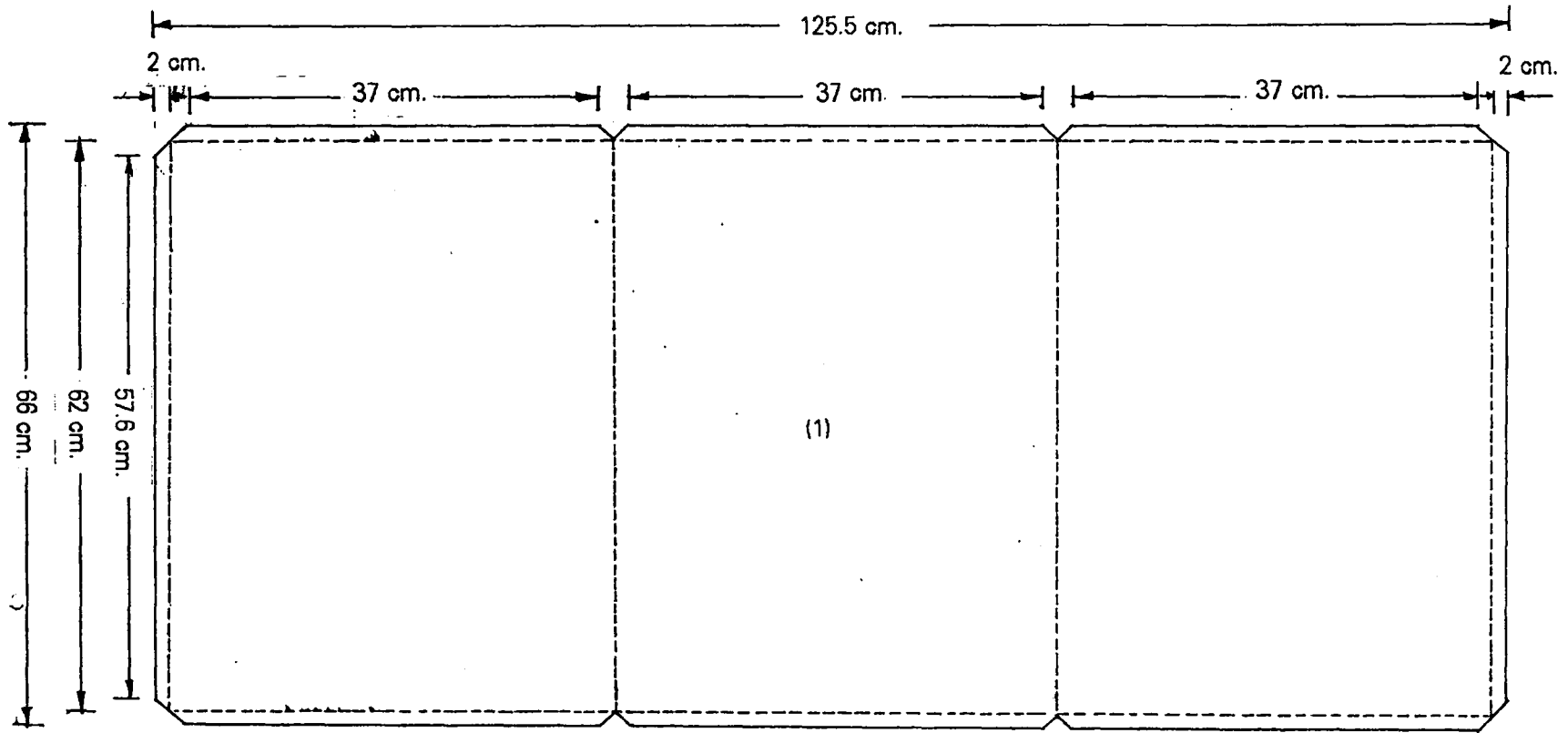
เมื่ออุณหภูมิสูงมาก ๆ สิ่งหนึ่งที่ต้องเกิดขึ้นคือ การขยายตัวของขดลวดนำความร้อน ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดที่ขดลวดสามารถทนได้ จึงเป็นตัวกำหนดขอบเขตของพื้นผิวของขดลวด เพราะฉะนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงจุดนี้ เมื่อใช้ขดลวดกับเตาอุณหภูมิสูงมาก ๆ ขนาดของขดลวดจึงต้องไม่ใหญ่เกินไป หรืออาจกล่าวได้ว่า ขนาดของขดลวดจะแปรผันกับอุณหภูมิของเตา ซึ่งความสัมพันธ์นี้ไม่สามารถแสดงได้แจ่มชัดในทุก ๆ กรณี แต่จะทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของขดลวด โดยจะสามารถให้ใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด และไม่เกิดการลื่นไถลของปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือ ที่อุณหภูมิสูง ๆ ความแข็งแรงของขดลวดนำความร้อนจะลดลง



รูปที่ 5.1 ลักษณะของท่อเตา



รูปที่ 5.2 ลักษณะของฝ่าเตา



รูปที่ 5.3 ลักษณะของกล่องเตา

ตัวอย่างวิธีคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า

ลวดแคนทิล A1 ขนาด 0.2 cm. ความยาว 17.813 m. พันรอบเตาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8 cm. เป็นจำนวน 63 รอบ โดยมีระยะระหว่างรอบ 0.6 cm. เป็นระยะตามแนวแกนทรงกระบอก 50 cm.

จากตาราง ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของขดลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 cm. ที่ $20^{\circ}\text{C} = 0.462 \text{ } \Omega/\text{m}$

ดังนั้น ค่าความต้านทานรวมของขดลวด $= 0.462 \times 17.813 = 8.23 \text{ } \Omega$

จากคู่มือการเลือกขนาดของขดลวดแคนทิล ในภาคผนวก ก สามารถหากระแสที่จะจับขดลวดได้จาก

$$\text{cm}^2 / \Omega = I^2 C_t / p \quad (5.1)$$

โดยที่ I = กระแส

มีหน่วยเป็น A

C_t = แฟคเตอร์ของอุณหภูมิ (temperature factor)

ไม่มีหน่วย

p = ค่ากำลังต่อหน่วยพื้นที่ (surface load)

มีหน่วยเป็น W/cm^2

จากตารางแฟคเตอร์ของอุณหภูมิ ที่ 1200°C

: $C_t = 1.04$

จากกราฟแสดงค่ากำลังต่อหน่วยพื้นที่ของลวดแคนทิล A1 ที่ 1200°C

: $p = 1.1 \text{ W}/\text{cm}^2$

ค่า cm^2/Ω ที่ 20°C ของเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 cm. = 136

แทนค่าในสมการ, จะได้

$$I^2 = (\text{cm}^2/\Omega) (p/C_t)$$

$$= (136)(1.1/1.04)$$

$$= 1.4 \times 10^2 \text{ A}^2$$

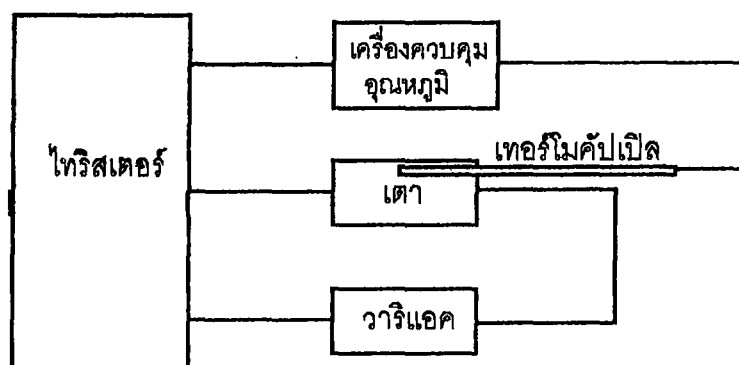
$$I = 12 \text{ A}$$

$$P = I^2 R = 1.4 \times 10^2 \times 8.23 = 1.2 \text{ kW}$$

$$V = IR = 12 \times 8.23 = 99 \text{ V}$$

5.3 แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ

เริ่มจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของระบบควบคุมอุณหภูมิ และแหล่งจ่ายไฟที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเลือกใช้ตัวควบคุมชนิดเปิด-ปิด (On-Off) ที่ทำงานร่วมกับไทรสเตอร์ ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์จะอยู่ในภาคผนวก ข มาต่อเข้ากับเตาและแหล่งจ่ายไฟ คือ วาริแอค (variac) ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพการต่อแหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเตา

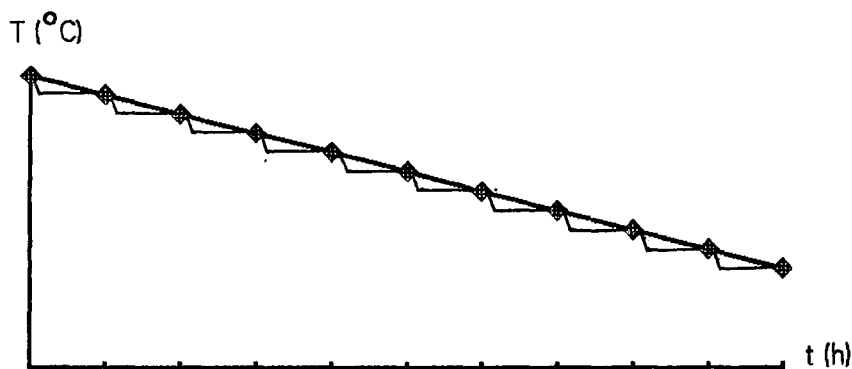
เหตุที่เลือกใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิชนิดเปิด-ปิด เพราะในการใช้งานต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตแบบค่อยเป็นค่อยไปซึ่งทำงานสัมพันธ์กับไทรสเตอร์ คือ ไทรสเตอร์จะค่อย ๆ ลดกระแสจนกระทั่งไทรสเตอร์หยุดทำงาน และถ้าจะให้ไทรสเตอร์ทำงานอีกครั้งหนึ่งก็จะค่อย ๆ เพิ่มกระแสขึ้น จึงไม่เกิดผลเสียแก่ขดลวดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และอายุการใช้งานของเตาก็จะเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5.4 เมื่อจ่ายไฟเข้าไปให้กับขดลวดความร้อนภายในเตา เทอร์โมคัปเปิลจะวัดอุณหภูมิ แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งค่าเอาต์พุตไปควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ โดย

- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ น้อยกว่า อุณหภูมิที่ตั้งไว้มาก เอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะนำกระแสได้มาก (on state) จึงมีไฟป้อนเข้าขดลวดต่อไป
- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ ใกล้เคียงกับ อุณหภูมิที่ตั้งไว้ เอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ไทรสเตอร์ นำกระแสได้น้อยลง จึงเป็นการลดแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวด
- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ มากกว่า อุณหภูมิที่ตั้งไว้มาก เอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ไทรสเตอร์อยู่ในสถานะไม่นำกระแส (off state) จึงไม่มีไฟป้อนเข้าขดลวด

อุปกรณ์ลดอุณหภูมิกิ่งกลศาสตร์

จะใช้ส่วนนี้ในการปลูกผลึกแบบหลอมพลาซิกซ์ ช่วงที่ทำการลดอุณหภูมิ เพราะอัตราในการลดอุณหภูมิเป็น $3 - 4^{\circ}\text{C} / \text{h}$ โดยลดลงจาก $1,200^{\circ}\text{C}$ ถึง 850°C จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้เวลาประมาณ 80 h จึงคิดส่วนนี้ขึ้นมาเพื่อช่วยลดอุณหภูมิโดยที่ไม่ต้องคอยปรับทุกชั่วโมง และการเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบเชิงเส้นมากกว่าการปรับลดเอง ดังรูปที่ 5.5 คือ ถ้าปรับเองโดยลดลง $3 - 4^{\circ}\text{C} / \text{h}$ ต่อการปรับ 1 ครั้ง อุณหภูมิจะลดลงมา $3 - 4^{\circ}\text{C}$ ภายในระยะเวลาอันสั้น แล้วเวลาช่วงที่เหลืออุณหภูมิก็คงที่



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบการปรับลดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติและแบบปรับลดเอง

อุปกรณ์ลดอุณหภูมิกิ่งกลศาสตร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ประกอบด้วย

1. ถ่านไฟฉาย 1.5 V ทำหน้าที่จ่ายแรงดันแก่ตัวต้านทาน
2. ชุดเฟือง ทำหน้าที่ทดรอบในการหมุนตัวต้านทานปรับค่าได้
3. ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10k เป็นตัวแบ่งแรงดัน ซึ่งจะนำแรงดันจากจุดนี้ไปป้อนแก่

เทอร์โมคัปเปิล

4. ตัวต้านทานค่าคงที่ ทำหน้าที่แบ่งแรงดัน ให้มีแรงดันไปตกที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ตามที่ต้องการ

5. มอเตอร์ความเร็วรอบต่ำ 1/60 rpm ทำหน้าที่ขับเคลื่อนชุดเฟืองให้ไปหมุนตัวต้านทานปรับค่า

ได้

5.3.1 หลักการทำงาน

เทอร์โมคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิ จะวัดได้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมคัปเปิลด้วย แล้วจึงไปทำการแปลงเป็นค่าอุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิ 1200°C มีแรงดันเท่ากับ 11.947 mV สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิดเอส (S) (ภาคผนวก ค)

ถ้าจะทำการลดอุณหภูมิโดยไม่ต้องปรับวารีแอก หรือ ตัวควบคุม ก็ต้องป้อนแรงดันเพิ่มให้แก่เทอร์โมคัปเปิล จึงเหมือนกับว่าอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลวัดได้สูงขึ้น ตัวควบคุมก็จะส่งสัญญาณเอาท์พุทไปที่ไทรสเตอร์ให้นำกระแสลดลง มีไฟป้อนเข้าขดลวดน้อยลง และถ้าเพิ่มแรงดันที่ป้อนแก่เทอร์โมคัปเปิลไปเรื่อย ๆ ตัวควบคุมก็จะส่งสัญญาณเอาท์พุทให้ไทรสเตอร์นำกระแสลดลงเรื่อย ๆ อุณหภูมิภายในเตาก็จะสามารถลดลงได้โดยไม่ต้องปรับสิ่งใด ๆ ทั้งสิ้น

ตัวอย่างการคำนวณ

ต้องการลดอุณหภูมิจาก 1200°C จนถึง 850°C ด้วยอัตราประมาณ 4.4°C / h

∴ ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 80 ชั่วโมง

T 1200°C ; V = 11.947 mV , T 850°C; V = 7.892 mV

∴ $\Delta V = 11.947 - 7.892 = 4.055 \text{ mV}$

ดังนั้นใน 1 ชั่วโมง จะต้องจ่ายแรงดันป้อนแก่เทอร์โมคัปเปิล = 4.055 mV / 80

= 0.0506 mV

ชุดเฟืองจะต้องทดรอบจากมอเตอร์ความเร็วรอบต่าอัตรา 1 รอบต่อชั่วโมง ทั้งสิ้น 80 รอบ ไปหมุนตัวต้านทานปรับค่าได้เพียง 1 รอบ

จากความสัมพันธ์

$$Z_1 n_1 = Z_2 n_2 \quad (5.2)$$

โดยที่ i คือ อัตราทดความเร็วรอบ

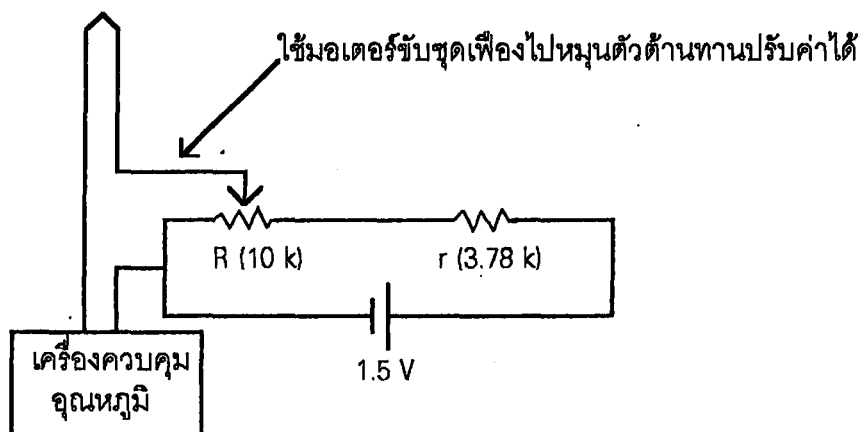
Z คือจำนวนฟันของเฟือง

n คือความเร็วรอบของเฟือง , n₁ เป็นเฟืองขับ และ n₂ เป็นเฟืองตาม

ดังนั้น จะได้ อัตราส่วนของจำนวนพื้น = อัตราส่วนกลับของความเร็วรอบ

$$i = Z_2 / Z_1 = n_1 / n_2 \quad (5.3)$$

ก็จะได้ชุดเฟืองที่ไปหมุนตัวด้านทานปรับค่าได้ โดยมีลักษณะวงจรเป็นดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงการต่ออุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่กลศาสตร์เข้ากับเทอร์โมคัปเปิลและตัวควบคุมอุณหภูมิ

5.4 การเตรียมสาร

การปลูกผลึกเดี่ยว ITO ด้วยวิธีหลอมฟลักซ์นี้อ้างอิงจากการทดลองของ รีมัยกา และ สเปนเซอร์ [13,14] ซึ่งศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเดี่ยว ITO

5.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เภาหลอมที่ทำจากอลูมินา (alumina crucible)
2. สารเคมี : In_2O_3 , SnO_2 , B_2O_3 ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%
PbO ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ซึ่งทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ของ Cerac
3. เครื่องชั่งไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. ครอบบดสารอากาศ

5. HCl และ HNO_3 ที่มีความเข้มข้น 37 % และ 69 % ตามลำดับ ใช้ทำความสะอาด เบ้าหลอมและครกบดสารอาเกต

6. น้ำดีไอออไนซ์ (DI water) ใช้ผสมกับกรดให้เจือจาง เพื่อทำความสะอาด เบ้าหลอม และ ครกบดสารอาเกต

5.4.2 วิธีการปลูกผลึก

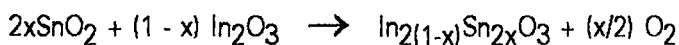
ก่อนที่จะทำการปลูกผลึก จะต้องทำโปรไฟล์ (profile) เตา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เสียก่อน เพื่อหาบริเวณที่จะใช้งาน จากนั้นจึงเริ่มเตรียมสารที่จะนำไปปลูกผลึก

1. ทำความสะอาดเบ้าหลอม และ ครกบดสาร ด้วย HCl และ HNO_3 อัตราส่วน 1 : 1 แล้วเจือจางด้วยน้ำดีไอออไนซ์ แล้วเป่าให้แห้ง

2. ชั่งสาร $\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ กับ PbO และ B_2O_3 มีน้ำหนักรวม เท่ากับ 45 กรัม ตามอัตราส่วน ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3 \quad (x = 0.09) &= 3.1500 \text{ g} \quad (\text{In}_2\text{O}_3 \text{ กับ } \text{SnO}_2) \\ \text{PbO} &= 39.15 \text{ g} \\ \text{B}_2\text{O}_3 &= 2.7 \text{ g} \end{aligned}$$

คำนวณน้ำหนักของ In_2O_3 กับ SnO_2 ได้ดังนี้ คือ



$$\begin{aligned} \text{น้ำหนัก SnO}_2 &= \frac{(\text{น้ำหนักสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม} \times \text{มวลโมเลกุลของ } 2x\text{SnO}_2)}{(\text{มวลโมเลกุลของ } \text{In}_{2(1-x)}\text{Sn}_{2x}\text{O}_3)} \\ &= (3.15 \times 27.124) / (279.774) \\ &= 0.305 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนัก In}_2\text{O}_3 &= \frac{(\text{น้ำหนักสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม} \times \text{มวลโมเลกุลของ } (1-x)\text{In}_2\text{O}_3)}{(\text{มวลโมเลกุลของ } \text{In}_{2(1-x)}\text{Sn}_{2x}\text{O}_3)} \\ &= (3.15 \times 252.650) / (279.774) \\ &= 2.845 \text{ g} \end{aligned}$$

3. นำสารที่ซึ่งทั้งหมดมาบดให้ละเอียดและเข้ากันดี ประมาณ 30 นาที
4. นำสารที่บดแล้วมาใส่เบ้าหลอมอลูมินา ปิดฝา ใส่ไว้ในเตาบริเวณที่เหมาะสม พิจารณาได้จากโปรไฟล์เตา แล้วปิดปากเตาให้สนิท เพื่อมิให้ความร้อนจากภายในเตาออกมา ภายนอก และ ความเย็นจากภายนอกเข้าไปในเตา
5. เริ่มเผาโดยการเพิ่มอุณหภูมิชั่วโมงละ 100°C จนถึง 1200°C แล้วคงที่ที่อุณหภูมินี้ เป็นเวลา 6 - 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิจาก 1200°C จนถึง 850°C ด้วยอัตรา $4.4^{\circ}\text{C} / \text{h}$ ด้วยอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ประดิษฐ์ขึ้น
7. ลดอุณหภูมิจาก 850°C จนถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยอัตรา $100^{\circ}\text{C} / \text{h}$ (สามารถปิดแหล่งจ่ายไฟได้ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C หลังจากนั้นปล่อยให้เตาเย็นลงเอง)
8. นำเบ้าหลอมอลูมินาออกจากเตา สังเกตผลึกที่เกิดขึ้น ก่อนนำผลึกที่ได้ไปทดสอบต่อไป

บทที่ 6

ผลการทดลอง

เตาโซนเดียวที่ทำการสร้างจะมีลักษณะของส่วนต่าง ๆ ดังนี้คือ

1. ท่อเตา ภายหลังจากแกะแบบภายในออกแล้ว จะนำมาบ่มเพื่อให้ปูนมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังรูปที่ 6.1



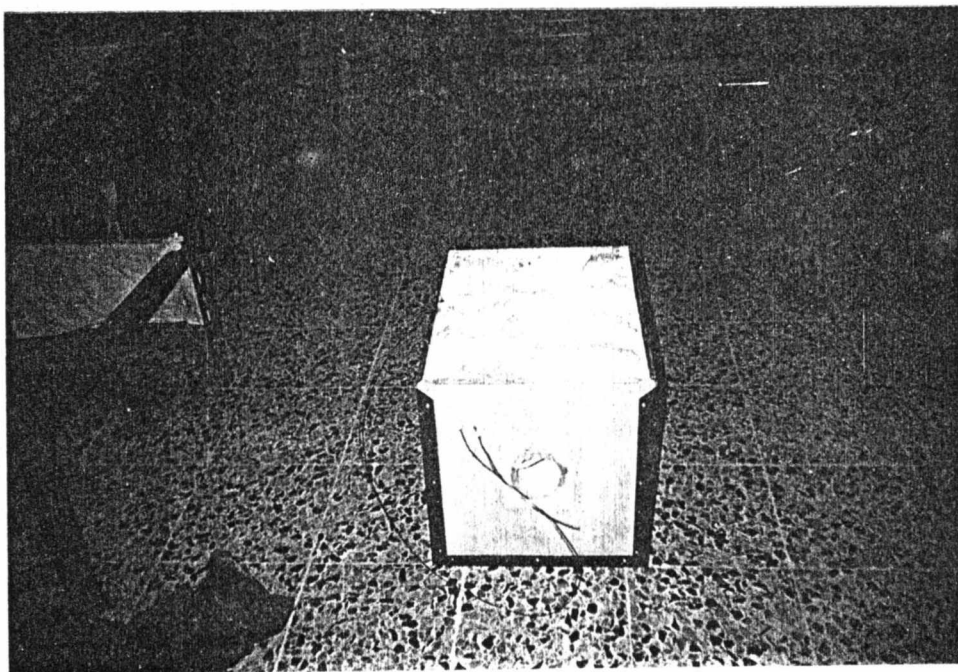
รูปที่ 6.1 แสดงท่อเตา

2. ก่อเตา ภายในบรรจุด้วยฉนวนกันความร้อน และ ท่อเตา โดยปลายท่อเตาจะวางอยู่ที่ฝาเตา ดังรูปที่ 6.2



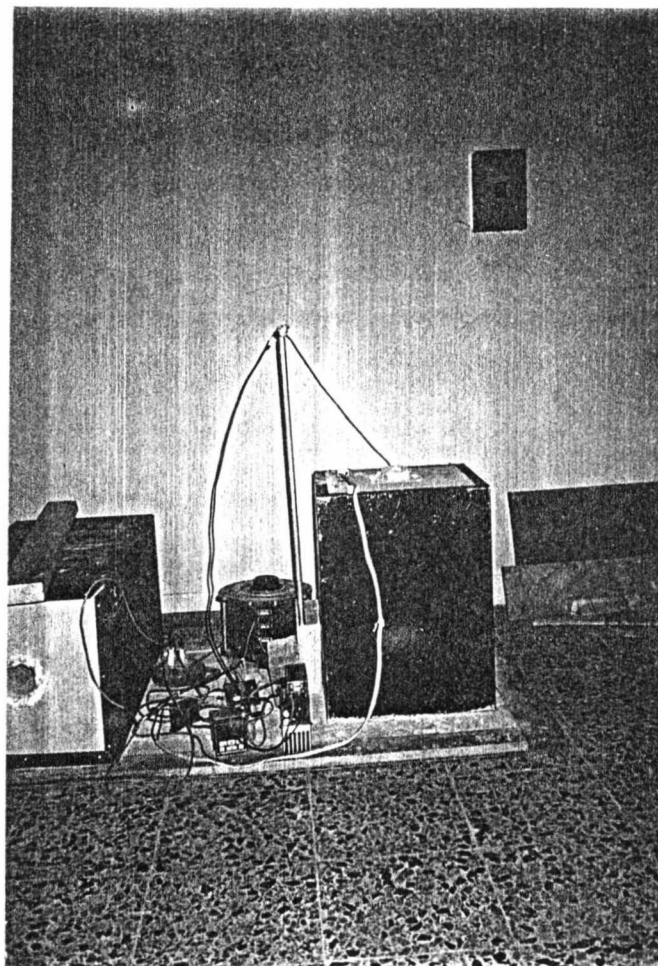
รูปที่ 6.2 แสดงภายในกล่องเตา

เมื่อบรรจุจนจนกันความร้อนจนเต็มแล้ว จึงปิดกล่อง ดังรูปที่ 6.3

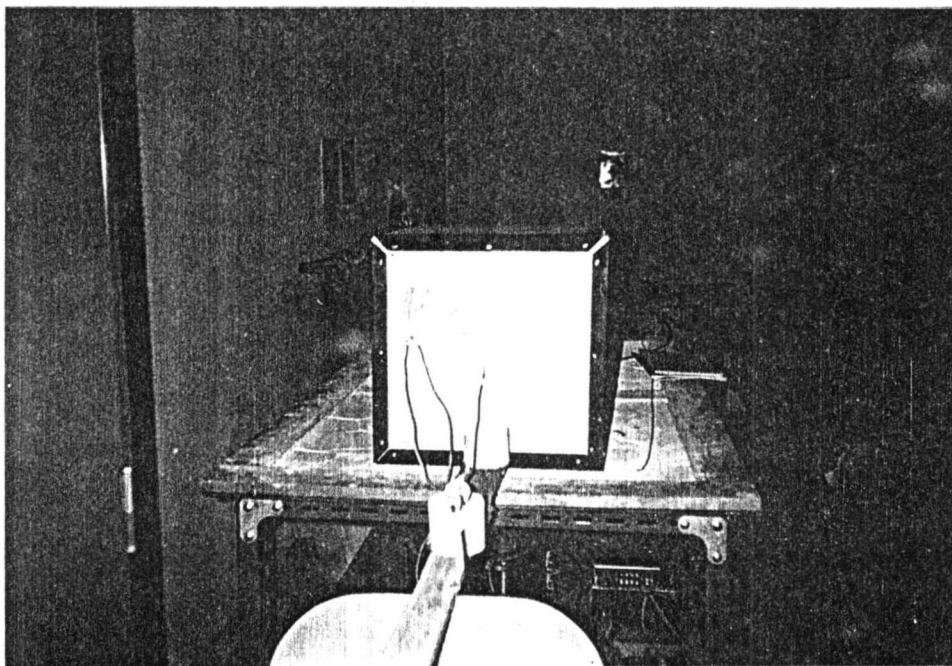


รูปที่ 6.3 แสดงกล่องที่บรรจุจนจนกันความร้อนจนเต็ม

จากนั้นจึงนำมาต่อกับแหล่งจ่ายไฟ , ตัวควบคุมอุณหภูมิ และ ทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 6.4 และใส่เทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในเตาเพื่อวัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 6.5



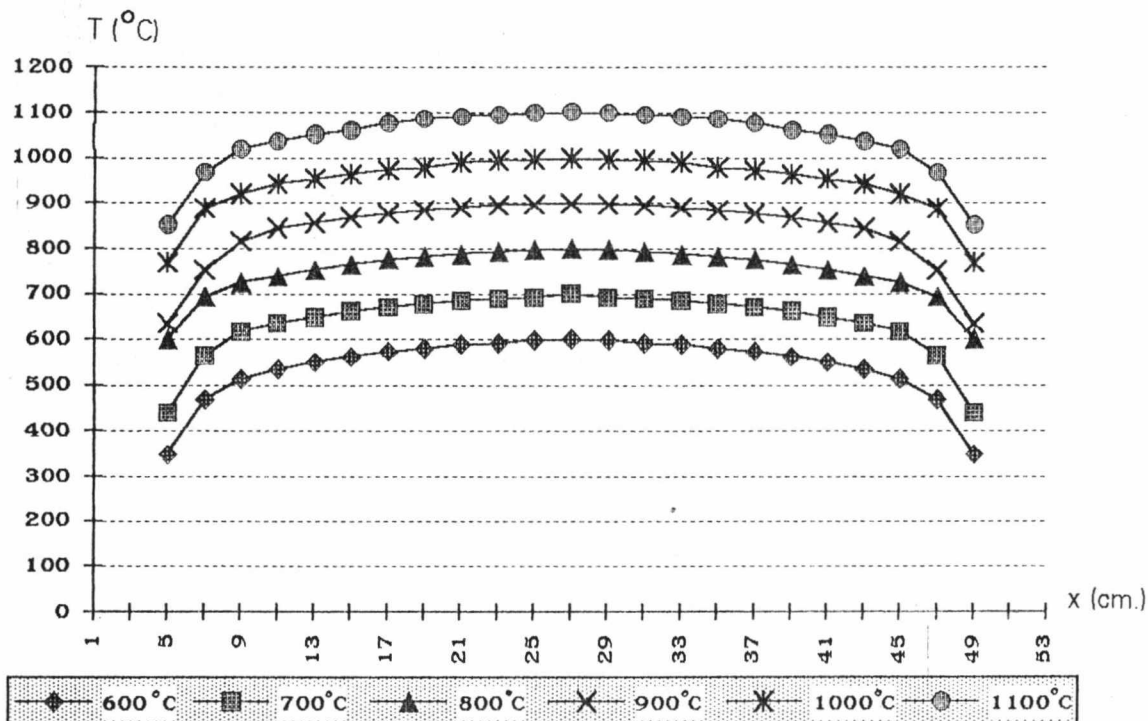
รูปที่ 6.4 แสดงการต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับเตา



รูปที่ 6.5 แสดงการใส่เทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในเตาเพื่อวัดอุณหภูมิ

ทำการจ่ายไฟแก่ขดลวดความร้อนภายในเตา ครั้งแรกเป็นปริมาณน้อย ๆ เพื่อทำการไล่น้ำออกจากท่อเตาให้หมด เป็นระยะเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงเพิ่มไฟขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อทำโปรไฟล์เตา พิจารณาอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ภายในเตา

ลักษณะของโปรไฟล์เตาที่สร้างขึ้นเป็นดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะของอุณหภูมิที่ระยะต่าง ๆ ภายในเตา

พิจารณาจากโปรไฟล์เตา จะได้บริเวณที่เหมาะสมในการปลูกผลึก คือ ที่ระยะ 23-31 cm. เพราะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่

สามารถหาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิได้ดังนี้ คือ

$$\text{ที่ } T = 1100 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (1100-1095)/(27-23) = 1.25 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

$$T = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (1000-995)/(27-23) = 1.25 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

$$T = 900 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (900-895)/(27-23) = 1.25 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

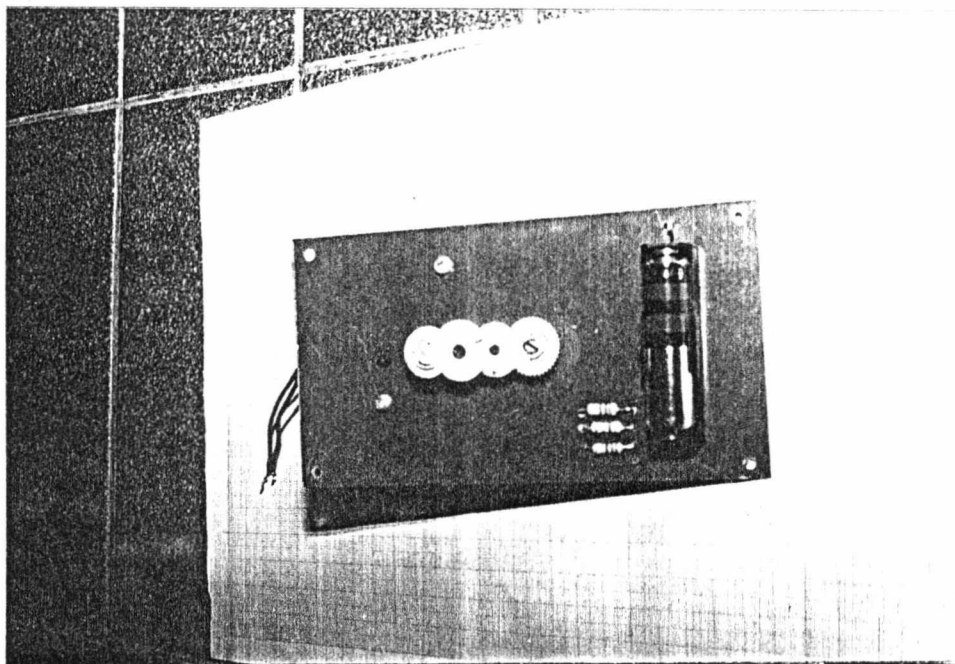
$$T = 800 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (800-794)/(27-23) = 1.5 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

$$T = 700 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (700-695)/(27-23) = 1.25 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

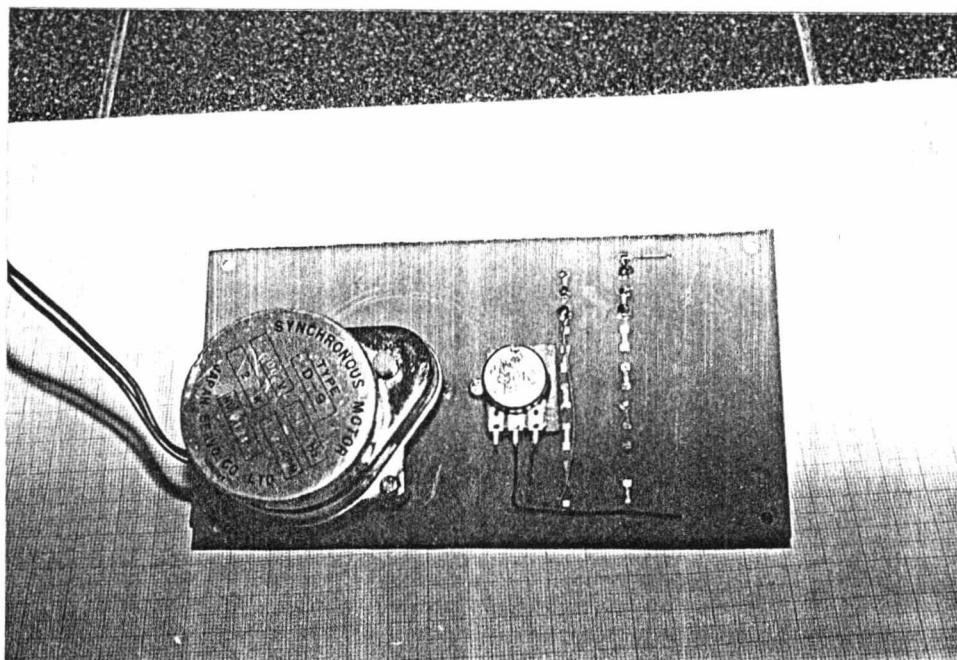
$$T = 600 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad dT/dx = (600-596)/(27-23) = 1 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$$

∴ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $1.25 \text{ } ^\circ\text{C/cm.}$

ในระหว่างการปลูกผลึก หลังจากทีปล่อยให้อุณหภูมิคงที่มาประมาณ 8 ชั่วโมง จึงทำการลดอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์กึ่งกลศาสตร์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น ดังรูปที่ 6.7 อุณหภูมิจะลดลงด้วยอัตราประมาณ $4.4 \text{ } ^\circ\text{C/h}$ โดยอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ตัวควบคุมอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลง และอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลอ่านได้จะเปลี่ยนแปลงไป $\pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (จากเดิมจะคงที่ที่อุณหภูมิที่ตั้งไว้)



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่นักกลศาสตร์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น สามารถทราบอุณหภูมิที่แท้จริงในขณะที่ลดอุณหภูมิได้ โดยใส่เทอร์โมคัปเปิลเพิ่มเข้าไปอีก 1 ตัว ตั้งแต่เริ่มปลุกผลึก (จะไม่ใส่ในขณะที่ทำการปลุกผลึกเพราะจะเป็นการรบกวนระบบ)

เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 850°C แล้ว ก็ทำการลดอุณหภูมิโดยการปรับค่าที่ตั้งไว้ที่ ตัวควบคุมอุณหภูมิ ด้วยอัตรา $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 500°C จึงปิดแหล่งจ่ายไฟ

หลังจากที่ทำการปลุกผลึกแล้ว นำเข้าหาลอมออกมาจากเตา ลักษณะของเข้าหาลอมจะเป็นดังรูปที่ 6.8

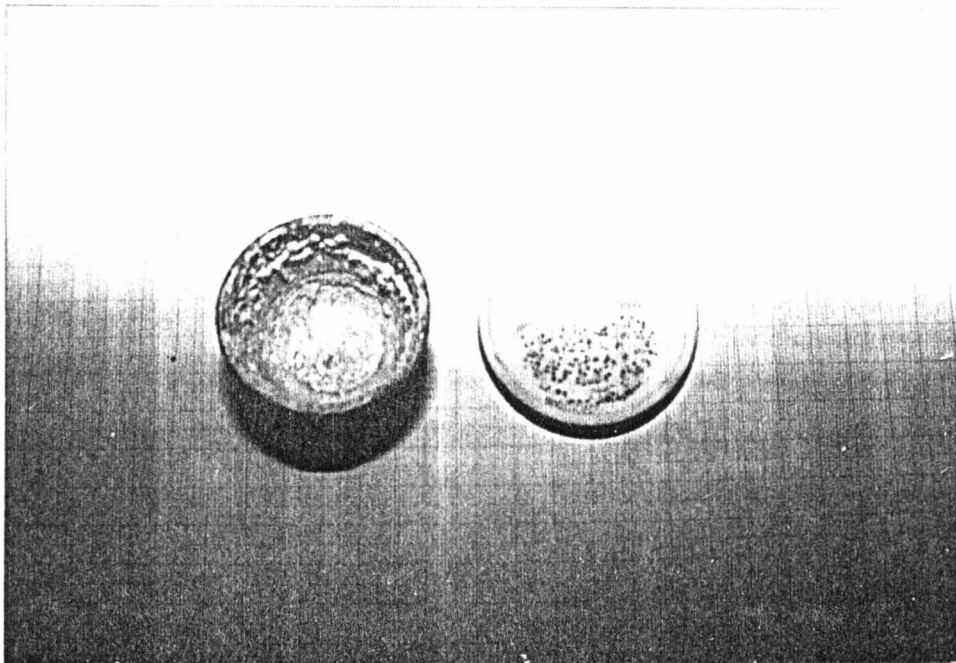
พิจารณาเข้าหาลอม จะเห็นว่าเกิดผลึกในหลายลักษณะคือ

- 1) ผลึกสีดำรูปลูกบาศก์ ขนาดเล็ก จำนวนมากฝังอยู่ที่ผิวของเข้าหาลอม , ที่ฝา และบางส่วนตกค้างอยู่ที่ก้นเข้าหาลอม
- 2) ผลึกขาวเกาะอยู่ที่ก้นเข้าหาลอม
- 3) ผลึกสีขาวขุ่นเกาะอยู่บริเวณปากเข้าหาลอมและที่ฝา

จากการทดลองของ Yasuo และ S.J.Wen [13,14] บอกได้ว่าผลึกสีดำที่เกิดขึ้นเป็นผลึกของ ITO และผลึกอื่น ๆ เป็นผลึกของฟลักซ์ แต่ไม่สามารถบอกได้ทันทีว่าเป็นผลึกของสารชนิดใด เพราะในขณะที่ปลุกผลึกอาจเกิดปฏิกิริยา ได้เป็นสารตัวใหม่ขึ้น หรือ ยังคงเป็นฟลักซ์ตัวเดิม

เมื่อนำเอาผลึกสีดำขนาดเล็ก ในปริมาณเล็กน้อย ไปบดเป็นผงละเอียด และทดสอบ โดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเป็นเฟสเดี่ยว มีสเปกตรัมการเลี้ยวเบน (pattern) สอดคล้องกันดีกับ ITO ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีทางเซรามิกส์ [15]

นอกจากจะมีผลึก ITO ฝังอยู่ที่ผิวภายในของเข้าหาลอมแล้ว ที่ผิวภายนอกก็เกิดผลึกในลักษณะนี้เช่นกัน แต่ไม่สามารถบอกได้ว่า สารละลายซึมผ่านเนื้อเข้าหาลอมออกมาได้หรือเกิดจากการฉีกออกมา



รูปที่ 6.8 เข้าหาลอมหลังจากการปลุกผลึก

บทที่ 7

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ลักษณะของท่อเตาที่ทำด้วยปูนทนไฟ มีข้อดีดังนี้ คือ

1. ลักษณะโปรไฟล์ของเตาจะเรียบ สม่ำเสมอ (smooth) และ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าต่ำโดยเฉพาะบริเวณกลางเตา คือ เท่ากับ $1.25\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$. ทำให้มีบริเวณใช้งานกว้างมากขึ้น
2. ราคาถูก
3. ให้อุณหภูมิเพื่อการใช้งานได้สูงกว่า $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$

แต่ท่อเตาที่ทำด้วยปูนทนไฟก็มีข้อเสีย คือ เมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานแล้ว ปูนจะค่อย ๆ กระจายออกมาทีละน้อย ซึ่งอาจไปเจือปนในสารตัวอย่างขณะกำลังเผาในเตาได้ง่าย

อุปกรณ์ลดอุณหภูมิinggกลศาสตร์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการลดอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิลดลงด้วยอัตราค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับการปรับลดเอง อีกทั้งยังช่วยให้นำเอาเวลาส่วนที่ต้องปรับลดอุณหภูมิต่างนี้ ไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้อีกด้วย

เตาที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการปลูกผลึกได้ แต่ผลึกที่ได้มีขนาดเล็ก และฝังอยู่ในเบ้าหลอม ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ เนื่องจาก การใช้เบ้าหลอมอลูมินา ไม่เหมาะสมกับการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจาก

1. PbO และ B_2O_3 เพราะ PbO และ B_2O_3 ขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงจะไปทำให้เบ้าหลอมเกิดความเสียหาย ถึงแม้ B_2O_3 จะมีส่วนช่วยในการลดจำนวนจุดเล็ก ๆ ที่ก่อให้เกิดผลึกได้ก็ตาม [1]

2. ลักษณะของเบ้าหลอมอลูมินานั้น ถ้าสังเกตด้วยตาเปล่าผิวของเบ้าหลอมอาจจะเรียบอยู่ในระดับหนึ่ง แต่ถ้าพิจารณาให้ดีแล้ว ผิวของเบ้าหลอมอลูมินาจะประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้เองที่ก่อให้เกิดการตกผลึกที่มีขนาดเล็ก จำนวนมาก ในเวลาเดียวกันและฝังอยู่ในเนื้อเบ้าหลอม

3. ยังไม่พบว่า มีรายงานถึงผลของการปลูกผลึกแบบหลอมฟลักซ์ที่มีต่อเบ้าหลอมอลูมินา จึงไม่สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ได้ว่า เพราะเหตุใดจึงมีผลึกเกิดที่ผิวนอกของเบ้าหลอมอลูมินาด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะพัฒนาอุปกรณ์ลดอุณหภูมิถึงกลศาสตร์ให้ใช้งานได้กว้างขึ้น เช่น สามารถกำหนดอัตราการเพิ่มแรงดัน หรือ ระยะเวลาการลดอุณหภูมิ (คือ การเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิ) เป็นต้น
2. ทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจจะได้โดย การเพิ่มปริมาณ B_2O_3 ในอัตราส่วนที่เหมาะสม หรือ เปลี่ยนมาใช้เบ้าหลอมแพลทินัมแทนเบ้าหลอมอลูมินา เพื่อที่จะลดจำนวนจุดก่อกำเนิดผลึก ซึ่งจะส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น และอาจจะนำเอาผลึกเหล่านั้นไปศึกษาสมบัติทางกายภาพในโอกาสต่อไป

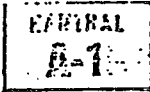
เอกสารอ้างอิง

1. Pamplin , Brian R. "Crystal Growth" , Vol. 6 .pp.530-538, Pergamon Press Ltd. ,New York , 1975.
2. ชาวดี พิชัยรัตน์,ศราวุธ วังบุญคง และ สมภพ ภูริวิทย์พงศ์ "เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต , ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ , คณะวิทยาศาสตร์ , สจล. , 2532.
3. วันชัย คุณากรวงศ์ และ คณะ "การคำนวณวงจรถานซิสเตอร์" หน้า 293-309 , สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , กรุงเทพฯ.
4. Guyer , Eric C. "Handbook of Applied Thermal Design" , pp.(12-6)-(12-17) , McGraw-Hill book Company, New York , 1988.
5. พุดมพงษ์ กนกบรรณกร และ ศุภชัย สายพิมพ์ "การสร้างเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอล อนาคต" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต , ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ , คณะวิทยาศาสตร์ , สจล. ,2535.
6. Electronic Research Center. "Solid State Technology" , pp(1-6)-(1-11) , Faculty of Engineering KMITL , Bangkok
7. สมเกียรติ ศุภเดช "ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ " หน้า 119-124 , อีเลคทรอนิกส์เวิลด์ , กรุงเทพฯ , 2525.
8. ดุสิต เครื่องงาม "โซลิตสเตทฟิสิกส์" ซีเอ็ดยูเคชั่น , กรุงเทพฯ , 2535.
9. Wen,S.J.,Campet,G.,Portier,J.,Couturier,G. and Goodenough,J.B. "Correlation Between the Electronic Properties of Doped Indium Oxide - Ceramics and the Nature of the Doping Element" Mater.Sci.Engng. B14(1992) : 115-119.
10. Suchet, J.P. in Crystal Chemistry and Semiconduction in Transition Metal Binary Compound, pp 236-237, Academic Press, New York,1971
11. Mavezio, M. " Refinement of the Crystal Structure of In_2O_3 at two Wavelengths"Acta Cryst. 20(1966) : 723.
12. Galasso,F.S. in Structure and Properties of Inorganic Solids 1st ed., pp 26-27, Pergamon Press, London, 1970.

13. S.J. Wen, G. Couturier, J.P. Chaminade, E. Marquestaut, J. Claverie and P. Hagenmuller.
"Electrical Properties of Pure InO and Sn Doped InO Single Crystal And Ceramics"
" J. Solid Stat. Chem. 1992 : 50-65.
14. Yasuo, Kanai. "Electrical Properties of Indium-Tin-Oxide Single Crystals" Japanese J. Appl. Phys. 23(1). (1984) : L12-L14.
15. กรุณา สุจิโรจน์ " การศึกษาโครงสร้างผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ " โครงการพิเศษ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต , ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ , คณะวิทยาศาสตร์ , สจล. , 2537.
16. D. McGee , Thomas. "Principles and Methods of Temperature Measurements" , pp.552-554 ,
John Wiley & Sons , New York , 1988.
17. Chase, A.B. and Wilcox, W.R. "Temperature Fluctuation and Striations in Flux Crystal Growth"
J. Am. Ceram. Soc. 50(6). (1967) : 332-333.
18. อนันต์ สมบูรณ์ศรี, สมชาย ประภามณฑล และ สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร "การศึกษาสาร
กึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์" โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต , ภาควิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ , คณะวิทยาศาสตร์ , สจล. , 2531.
- 19 Laughton , MA. ; and Say MG. "Electrical Engineer's Reference Book" , 14th ed. pp. 26/11-
26/12 , Butterworth & Co(Publishers) Ltd. , London , 1985.

ภาคผนวก ก
คู่มือการเลือกขนาดของขดลวดแกนทึบ

คู่มือการเลือกขนาดของลวด KANTHAL A-1



80-10 mm Ø
 Resistivity, $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$ 1.45
 Specific gravity, g cm^{-3} 7.1

Wire mm
 Cold drawn

$$cm^2/11 = \frac{P \cdot C_t}{p}$$

I = Current
 C_t = Temperature factor
 p = Surface load W/cm^2
 Regarding the use of $cm^2/11$ see also page 52.

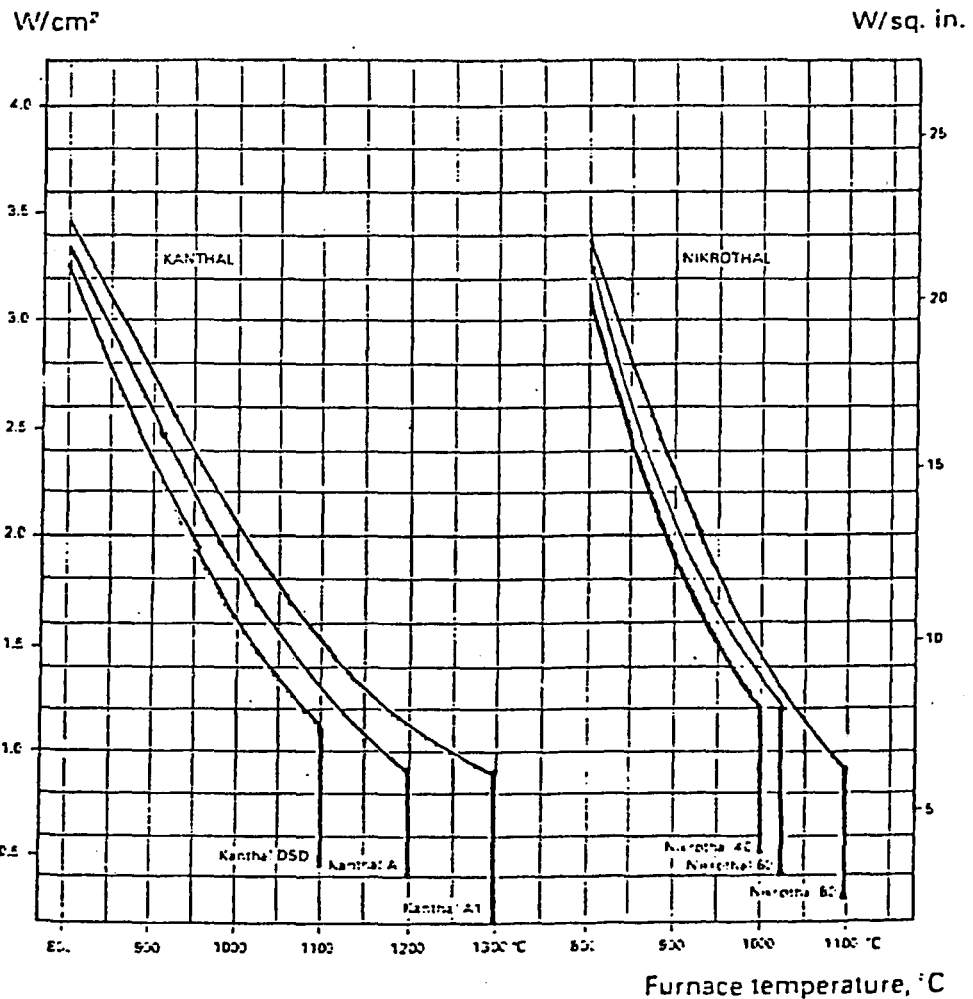
To obtain resistivity at working temperature multiply by the factor C_t in the following table:

	°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1450
Kanthal A-1	C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.05	1.04	1.05

The table figures are valid for Kanthal A-1

Diameter mm	Resistance per length unit Ω/m 20°C	$cm^2/11$ 20°C	Weight per length unit g/m	Surface per length unit cm^2/m	Cross sectional area mm^2	Diameter mm
8.0	0.0289	8690	357	251	50.3	8.0
7.5	0.0328	7200	314	236	44.2	7.5
7.0	0.0377	5840	273	220	35.5	7.0
6.5	0.0437	4670	235	204	33.2	6.5
6.0	0.0513	3680	201	188	28.3	6.0
5.5	0.0610	2830	169	173	23.3	5.5
5.0	0.0739	2130	139	157	19.6	5.0
4.8	0.0802	1880	128	151	18.1	4.8
4.5	0.0912	1550	113	141	15.9	4.5
4.2	0.105	1260	98.3	132	13.8	4.2
4.0	0.115	1090	89.2	126	12.6	4.0
3.8	0.128	930	80.5	119	11.3	3.8
3.5	0.151	730	68.3	110	9.62	3.5
3.2	0.180	556	57.1	100	8.05	3.2
3.0	0.205	460	50.2	94.3	7.07	3.0
2.8	0.236	374	43.7	88.0	6.16	2.8
2.5	0.295	266	34.9	78.5	4.91	2.5
2.2	0.382	181	27.0	69.1	3.63	2.2
2.0	0.462	136	22.3	62.8	3.14	2.0
1.9	0.511	117	20.1	59.7	2.82	1.9
1.8	0.570	99.2	18.1	56.6	2.54	1.8
1.7	0.639	83.6	16.1	53.4	2.27	1.7
1.5	0.721	69.7	14.3	50.3	2.01	1.5
1.5	0.821	57.4	12.6	47.1	1.77	1.5
1.4	0.942	46.7	10.9	44.0	1.54	1.4
1.3	1.09	37.4	9.42	40.8	1.33	1.3
1.2	1.28	29.4	8.03	37.7	1.15	1.2
1.1	1.53	22.7	6.75	34.5	0.993	1.1
1.0	1.85	17.0	5.53	31.4	0.765	1.0

ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับลวด KANTHAL A-1

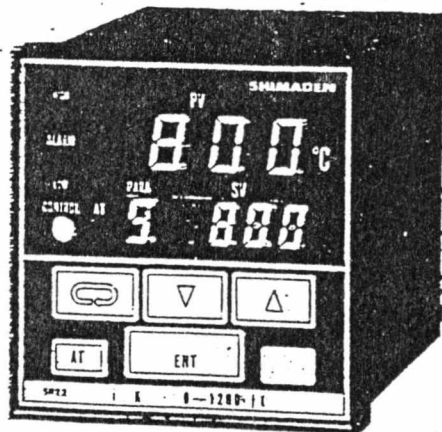


Recommended surface loads in W/cm^2 and $W/sq. in.$ for Kanthal and Nikrothal heating elements in industrial furnaces.

กราฟแสดงค่ากำลังต่อหน่วยพื้นที่ของ ลวด Kanthal และ Nikrothal ในเตาไฟฟ้า

ภาคผนวก ข
คู่มือการใช้งาน และ รายละเอียดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้

- Accuracy = 0.3%
- Auto-Tuning PID
- RA/DA Internally Selectable
- Parameter-Selectable Inputs (Thermocouple)
- Parameter-Selectable Ranges
- Programmable-Scaling (DC mV, DC mA)
- Universal Power Supply (100~240V AC)
- User-Friendly Alarm Options



FUNCTIONS

- PV) Display: Digital LED (10.1mm high)
- Accuracy: $\pm 0.3\% + 1$ digit at $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Resolution: Upon scaling (0.01, 0.1, 1)
- SV Display: Digital LED (8.0mm high)
- SV, PB, IT, DT High/Low alarm set values, High/Low alarm set limiter, SA (On/Off mode), PB Cycle, Alarm sensitivity, Control output, Setting lock, PV bias
- Control: Auto-tuning, High/Low alarm, Control output
- Keypad: Front membrane Keypad
- Display: Same as Parameter display
- Resolution: Upon scaling (0.01, 0.1, 1)
- Control: Parameter check, UP, DOWN, AT, ENT, Mode key (6 Modes)
- Standards: JIS/ANSI/DIN T, J, E, K, N, R, S, B, WRe5-26, U & L (DIN 43710)
- Output Impedance: 100 Ω max.
- Output Resistance: 500k Ω
- Output Mode: Standard feature (Up-scale)
- Temperature Range: 5~45 $^{\circ}\text{C}$
- Input: Pt100 Ω JIS/ANSI/DIN 1mA
- Measurable Range: 5 Ω max./wire
- Input Impedance: 0~10mV, 10~50mV, 0~20mV, 0~50mV, -10~10mV/500k Ω -Programmable range
- Receiving: 4~20mA, 0~20mA/250 Ω -Programmable range
- Control: Auto-tuning PID with anti-reset windup
- PI Band (PB): 0~200.0% (On/Off mode at 0 setting, contact & SSR only)
- Time (IT): 1~3600 seconds
- Time (DT): 0~1200 seconds (PI mode at 0 setting)
- DT Cycle: 1~120 seconds (Contact & SSR output)
- Alarm Sensitivity: 0.1~5% FS (Contact & SSR output)
- Output Characteristics: RA/DA internally selectable (factory set RA)
- Output: Contact= 240V AC 2.5A/resistive load, 1A/inductive load
Voltage= 0~10V DC load current/2mA max.
Current= 4~20mA DC load resistance/600 Ω max.
SSR Voltage= 15V DC 20mA max.
- Response Cycle: 0.25 second
Between input and internal circuit
Between internal circuit and output

Alarm Mode:	Individually setting/output. High/Low alarm selectable. deviation/absolute value selectable
Alarm Setting:	Digital setting by keypad
Alarm Setting Ranges	
Deviation:	High alarm = SV 0 ~ +1999 Low alarm = SV 0 ~ -1999
Absolute Value:	Within measuring range for both high & low alarms. High alarm > Low alarm
Alarm Mode & Sensitivity:	On/Off, 0.1 ~ 5% FS
Inhibit/Non-inhibit:	Internally selectable (factory set non-inhibit)
Alarm Output/Rating:	Contact/240V AC, 2.5A/resistive load
Data Memory:	By nonvolatile static RAM
Operating Ambient Temperature Range:	-10 ~ 50°C
Operating Ambient Humidity Range:	90% RH max. (non-condensing)
Power supply:	100 ~ 240V AC \pm 10%, 50/60Hz. (universal power supply)
Power Consumption:	Approx. 7.5VA
Insulation Resistance:	500V DC 20M Ω between input terminal and power supply terminal 500V DC 20M Ω between power supply terminal and earth terminal
Dielectric Strength:	One minute at 500V AC between input terminal and power supply terminal One minute at 1000V AC between power supply terminal and earth terminal
External Dimensions:	72 (H) X 72 (W) X 103 (D) mm (panel depth 90mm)
Weight:	Approx. 310g

ORDERING INFORMATION

ITEMS	CODE	SPECIFICATIONS
SERIES	SR22-	MPU-Based PID Auto-Tuning Controller, DIN 72 X 72mm, \pm 0.3% FS Accuracy
INPUT	1	Thermocouple, User-Selectable Inputs, Programmable Ranges
	2	R.T.D. (Pt100), User-Selectable Ranges
	3	DC Voltage, User-Selectable 0~10, 10~50, -10~10, 0~20, 0~50mV Linear, User-Programmable Ranges
	4	DC Current, 4~20, 0~20mA Linear, User-Programmable Ranges
	9	Others (Please consult before ordering.)
CONTROL OUTPUT	Y-	Contact: PB Cycle 1~120 seconds, Capacity=240V AC/Resistive Load 1A/Inductive Load
	I-	Current: 4~20mA DC, Load Resistance 600 Ω max.
	P-	SSR Voltage: PB Cycle 1~120 seconds, Output Rating 15V DC/20mA max.
	V-	Voltage: 0~10V DC, Load Current 2mA max.
	X-	Others (Please consult before ordering.)
ALARM	00	None
	09	Individually Setting/Output, High/Low, Deviation/Absolute Value (Selectable), Inhibit/Non-Inhibit (Selectable), SA: 0.1~5% FS (Selectable)
REMARKS	0	Without
	9	With (Please consult before ordering.)

STANDARD RANGE & USER-PROGRAMMABLE SCALINGS

Since the Series SR22- has been designed for user-selectable inputs, user-selectable ranges and user-programmable scaling, the unit will be shipped with one factory-set standard ranges.

If a range selection other than the standard is required, user-selectable inputs (T/C's) and user-selectable ranges (T/C's & RTD) are possible at the specific application as listed page 89.

Standard Range (Factory-Set when shipping)

Input	Standard/Rating	Ranges
1 Thermocouple	JIS (K)	0~800°C
2 R.T.D.	JIS Pt100	0~200.0°C
3 DC Voltage	0~10mV	0~100.0%
4 DC Current	4~20mA	0~100.0%

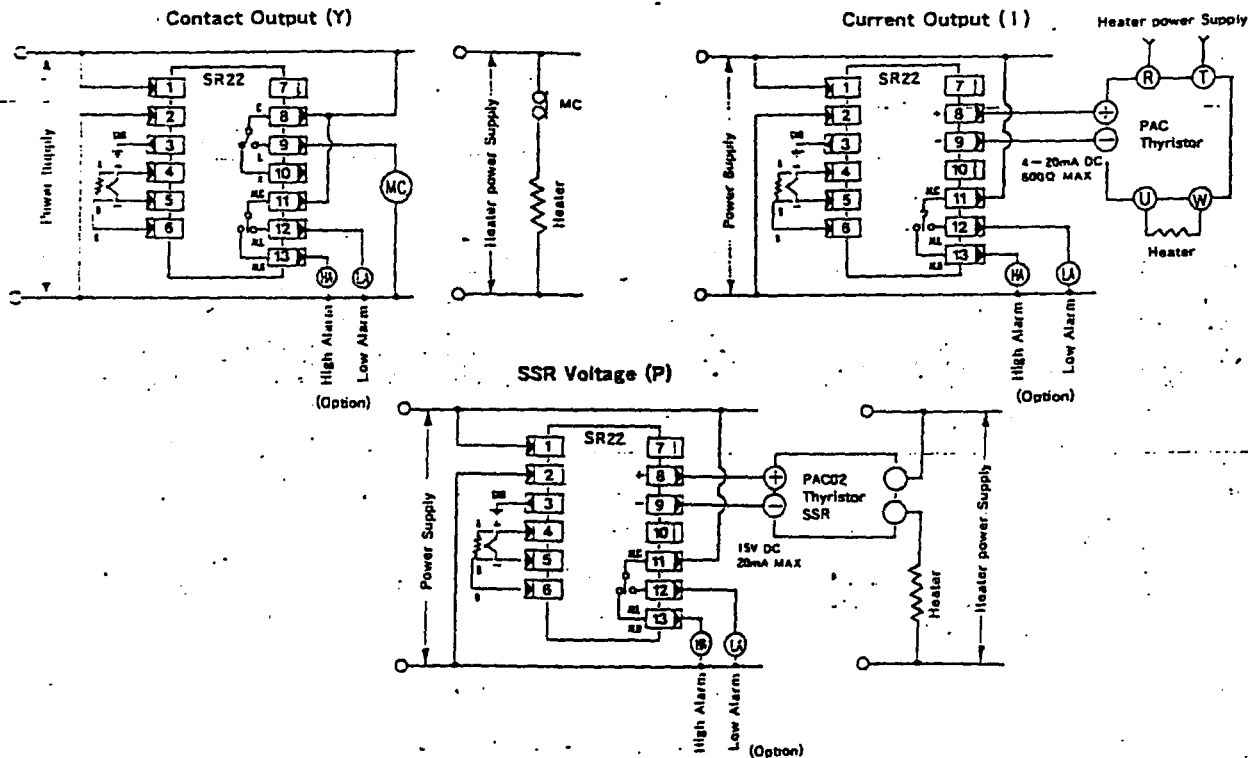
INPUT	Type	JIS ANSI	DIN	OTHERS	°C	°F
Thermocouple	T	○	○		-200 ~ 200	-300 ~ 400
	J	○	○		0 ~ 400.0	0 ~ 750
	E	○	○		-100 ~ 600	-150 ~ 1100
	K	○	○		0 ~ 400.0	0 ~ 750
	K	○	○		0 ~ 800	0 ~ 1450
	K	○	○		0 ~ 1200	0 ~ 2200
	N			○	0 ~ 1200	0 ~ 2200
	R	○	○		0 ~ 1600	0 ~ 2900
	S	○	○		0 ~ 1600	0 ~ 2900
	B *	○	○		0 ~ 1800	0 ~ 3200
	WRe5-26			○	0 ~ 2300	0 ~ 4200
	U (DIN 43710)			○	-200 ~ 200	-300 ~ 400
	L (DIN 43710)			○	0 ~ 400	0 ~ 750
R.T.D.	Pt100	○	○		-200 ~ 600	-300 ~ 1100
	Pt100	○	○		-100.0 ~ 200.0	-150 ~ 390
	Pt100	○	○		-100.0 ~ 300.0	-150 ~ 570
	Pt100	○	○		0 ~ 50.0	0 ~ 120.0
	Pt100	○	○		0 ~ 100.0	0 ~ 200.0
	Pt100	○	○		0 ~ 200.0	0 ~ 400.0
	Pt100	○	○		0 ~ 500	0 ~ 950

USER PROGRAMMABLE SCALING

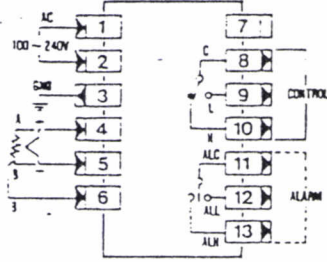
DC Voltage & DC Current Inputs

For DC voltage and DC current inputs, user-programmable scaling is available with scaling range of -1999~7999 digits and scaling factor of 100~5000 digits.

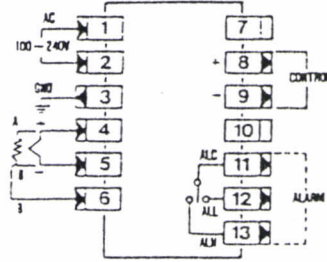
WIRING EXAMPLE



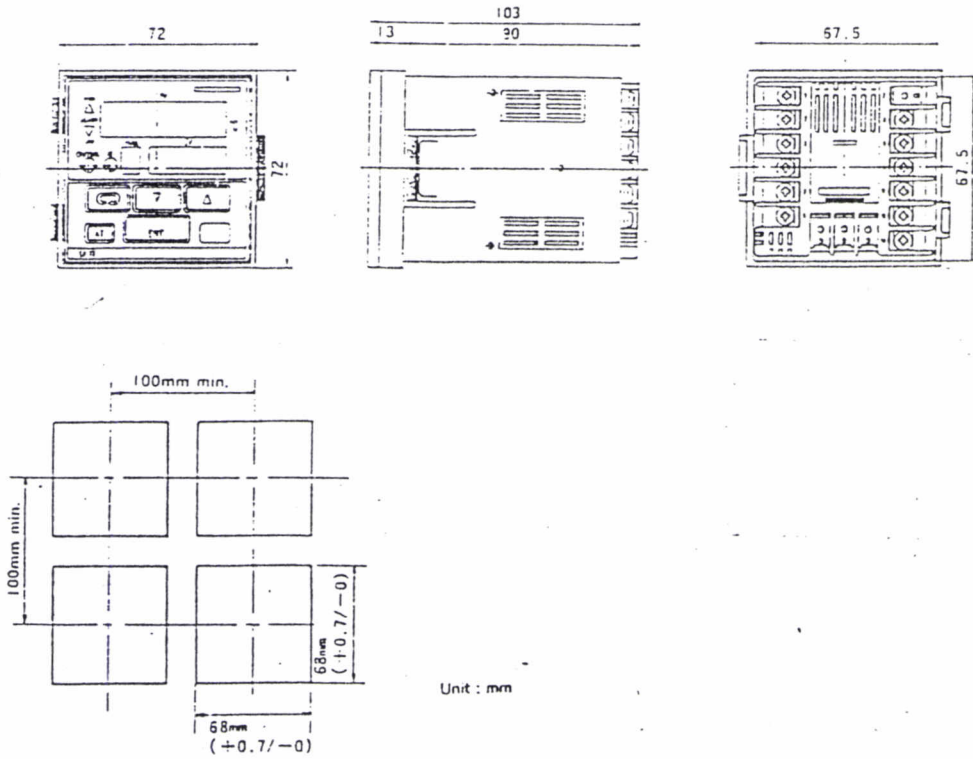
Contact Output (Y)



Current Output (I) Voltage Output (V)
SSR Voltage (P)

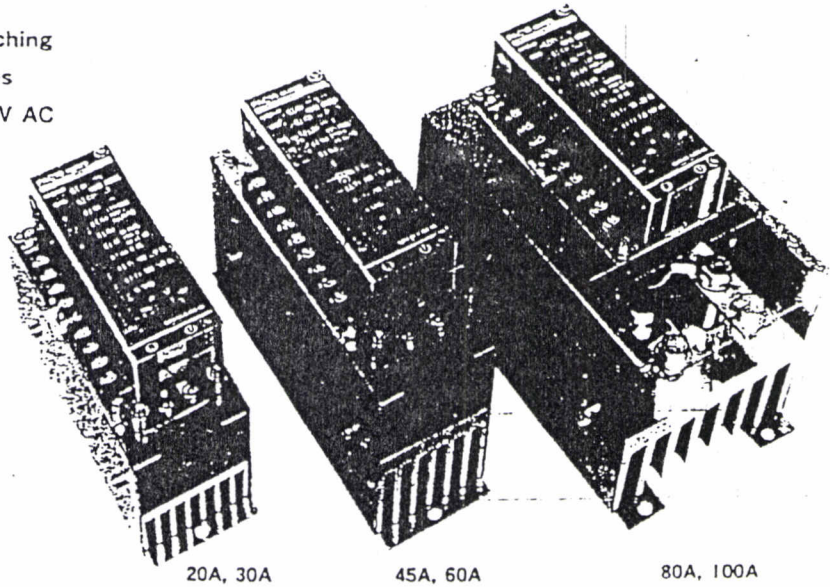


EXTERNAL DIMENSIONS & PANEL CUTOUT



Unit : mm

- Phase Angle or Zero Voltage Switching
- Current Capacity: 20~100 Amperes
- Power Supply: 100~120/200~240V AC



SPECIFICATIONS

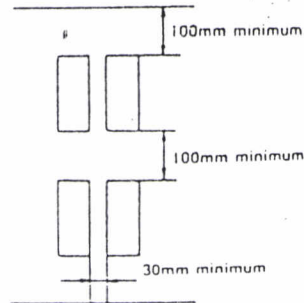
Control Mode:	Phase angle (PAC15P) Zero voltage switching (PAC15C)
Possible Loads:	All resistance loads (PAC15P) Constant resistance loads (PAC15C)
Power Supply Cycle:	50/60Hz. (Internally selectable - PAC15P) 50/60Hz. common (PAC15C)
Output Voltage Control Range:	0~95% min. 50/60Hz. of input voltage (PAC15P) 0~95% min. of load power (PAC15C)
Power Lamp:	Green LED lamp (PAC15P)
Output Indication:	Green LED lamp (when load 'ON' - PAC15C)
Current Capacity:	20, 30, 45, 60, 80 and 100 Amps.
Power Supply:	100~120V/200~240V AC $\pm 10\%$
Control Input:	Current= 4~20mA DC (Receiving impedance: 100 Ω) Contact= Zero voltage contact
Power Adjuster:	Current input= Internally standard fix (Externally fix available) Contact input= Externally standard fix
Auto/Manual Power Adjuster:	Only current input type is available - optional
Thyristor Element Cooling:	Natural air
Over-Current Protection:	None available (Use a fuse for semiconductor)
Minimum Load:	0.5 Amps
Operating Ambient Temperature and Humidity:	-10~50°C, 90%RH max.
Insulation Resistance:	500V DC 20M Ω between power supply terminals and chassis 500V DC 20M Ω between power supply terminals and input terminals
Dielectric Strength:	One minute at 2000V AC between power supply terminal and chassis
Dimensions and Weight:	See page 123.

PAC15 Series Total Heating Value

Capacity	20A	30A	45A	60A	80A	100A
Heating Value	24W	36W	48W	60W	84W	100W

- * Care must be taken for air-ventilation.
- * Vertical mounting is recommended.
- When mounting horizontally, use at 70% of the current capacity.

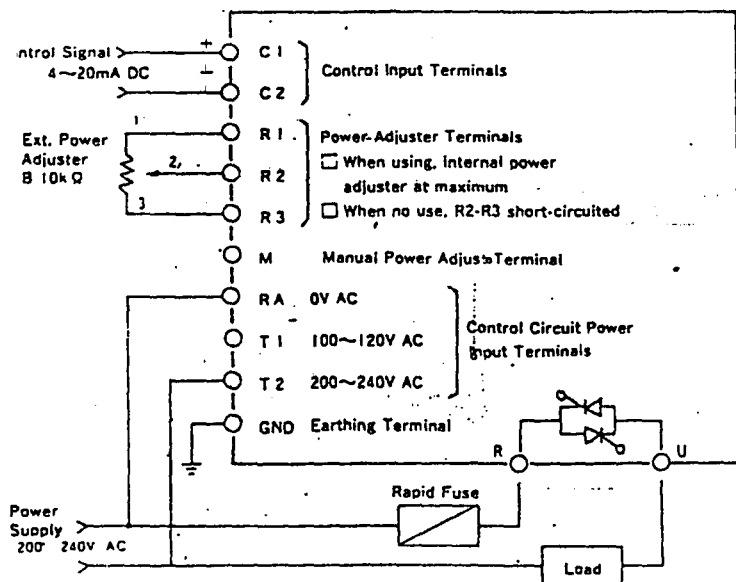
Recommended mounting



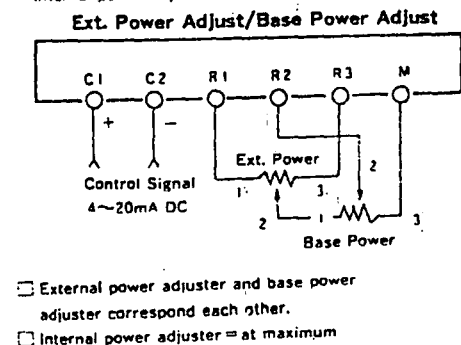
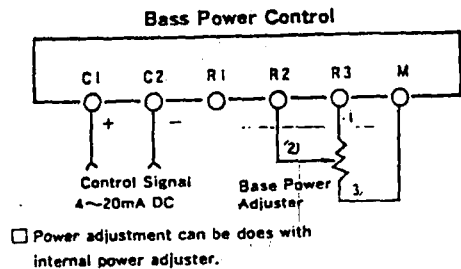
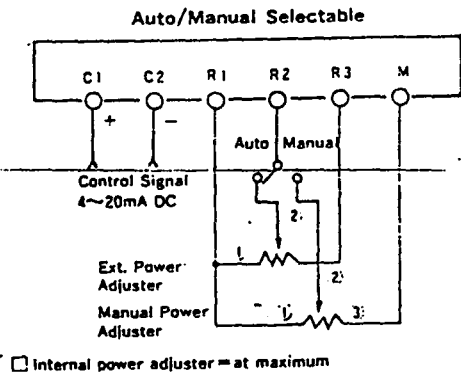
ORDERING INFORMATION

ITEM	CODE	SPECIFICATIONS	
SERIES	PAC 15P	Phase Angle Single Phase Power Regulator	
	PAC 15C	Zero Voltage Switching Single Phase Power Regulator	
CONTROL INPUT	0	4~20mA DC Receiving Impedance: 100Ω	
	2	Non-Voltage Contact	
	9	Others (Please consult before ordering.)	
CURRENT CAPACITY	020	20A	
	030	30A	
	045	45A	
	060	60A	
	080	80A	
	100	100A	
POWER SUPPLY	81-	100~120V/200~240V AC ± 10% 50/60Hz	
	99-	Others (Please consult before ordering.)	
EXTERNAL POWER ADJUSTER	N	None (Internally standard installed)	Current Input
	P	External Power Adjuster	
	M	Manual Power Adjuster	
	B	Base Power Adjuster	
	W	External Power Adjuster + Manual Power Adjuster	Contact Input
	Y	External Power Adjuster + Base Power Adjuster	
	P	None	
	B	Base Power Adjuster	
X	Others (Please consult before ordering.)		
REMARKS	0	Without	
	9	With (Please consult before ordering.)	

TERMINAL & WIRING (CURRENT INPUT TYPE)



POWER ADJUSTER CONNECTIONS



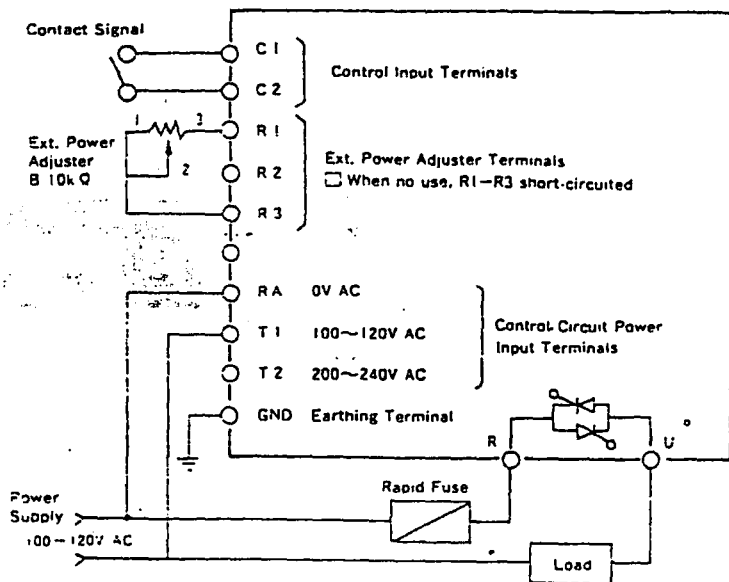
บริษัท ว. ทวีพัฒนา จำกัด

โทร. 3930930, 3933032

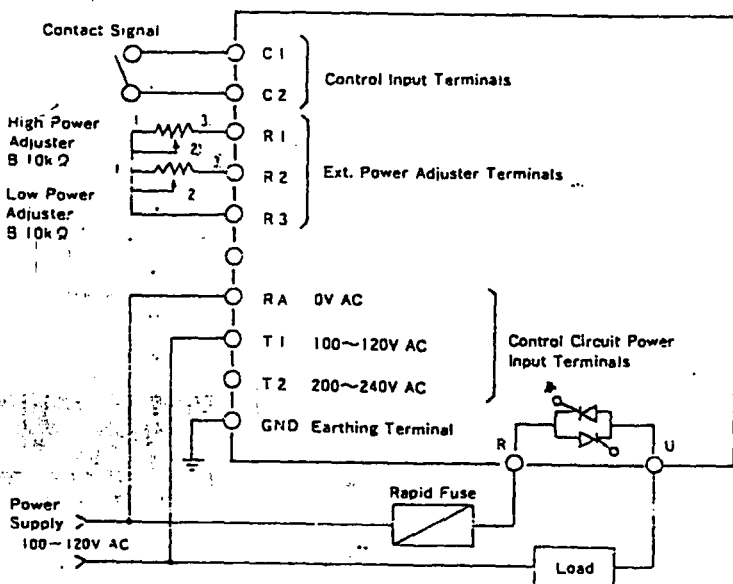
FAX: (662) 3986501

TERMINAL & WIRING (CONTACT INPUT TYPE)

Normal Control



High/Low Control



- Output when high power adjust/contact (C1-C2 = ON)
0~100% power output control available by the high power adjuster
- Output When low power adjust/contact = OPEN
- Low Power Output =
High Power Value + Low Power Value - 100%
(When output of low power is (-), low power output is zero.)

CONTROL MODES & WAVE FORM

Control Mode	Item	Noise	Moving Coil Deflection	Heating Element Capacity	Output Wave Form		
					10% Output	50% Output	90% Output
Phase Angle Control (P)		Little	Continuous	Very Small			
Zero-voltage Switching Control (C)		None	<ul style="list-style-type: none"> • Low Output/Big Deflection • Mid ~ High Output/Almost Continuous 	Small	 1 cycle ON and 9 cycle OFF	 1 cycle ON and 1 cycle OFF continuously	 9 cycle ON and 1 cycle OFF

บริษัท ว. ทวีพัฒนา จำกัด

โทร. 3930990, 3933032

FAX (662) 3986501



Ceramic Fiber เป็นฉนวนชนิดใหม่ใช้สำหรับ งานที่มีปัญหาหรือต้องเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูงมาก ๆ เช่น งานหลอมโลหะ งานเชื่อมโลหะ Ceramic Fiber จะช่วยป้องกันชิ้นส่วนต่าง ๆ จากความร้อนสูง หรือป้องกันความร้อนภายในเตาเผาไม่ให้รั่วไหลได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วย

Ceramic Fiber เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษมีความยืดหยุ่นสูงสามารถโค้งงอได้ถึง 180° มีค่านำความร้อนที่ต่ำมาก สามารถตัดให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วโดยเพียงแต่ใช้มีด หรือกรรไกรเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

■ **ชนิดของการใช้งาน**

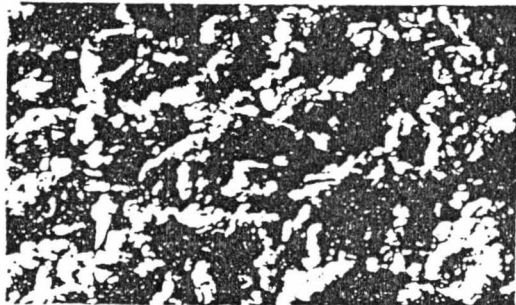
- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนรั่วไหลในตู้อบหรือเตาเผา
- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนให้กับท่อ
- ใช้ควบคุมแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์
- ใช้ป้องกันแก๊สในเตาหลอมโลหะโดยการหุ้มไว้ภายใน
- ใช้เป็นปะเก็น และซีล
- ใช้หุ้มบริเวณข้อต่อที่มีการขยายตัว
- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนของหม้อน้ำหรือเครื่องจักรไอน้ำ (Turbine)
- ช่วยลดแรงเค้นในการเชื่อมและเป็นฉนวนกัน ความร้อนเวลาเชื่อม
- ใช้บุผนังห้องเพื่อป้องกันไฟไหม้

■ **CERAMIC BULK FIBER**

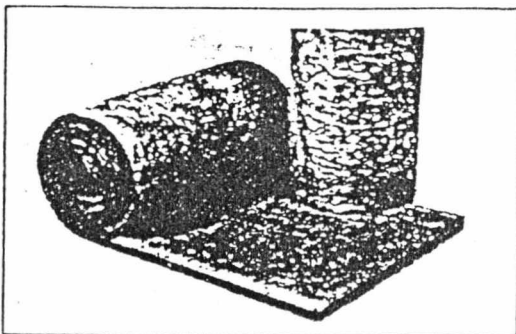
ทำขึ้นจาก Fiber ที่มีขนาดขยาวมก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถคืนตัวได้ดีถึงแม้จะโดนแรงอัดอย่างมากก็ยังสามารถกลับคืนรูปเดิมได้ มีน้ำหนักเบา และมีค่านำความร้อนที่ต่ำ มีค่าความหนาแน่นคงที่ (0.06 - 0.20 g / cm³) นำไปใช้งานได้ง่ายโดยเพียงแต่ตึง หรือตัดออกก็ได้ ขนาดบรรจุ 5 กก. และ 20 กก. / กล่อง

■ **CERAMIC BLANKET**

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



■ **BULK แบบเป็นก้อนเหมือนสำลี**



■ **BLANKET แบบเป็นผืน**

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

ผู้แทนจำหน่ายแต่ผู้เดียวในประเทศไทย



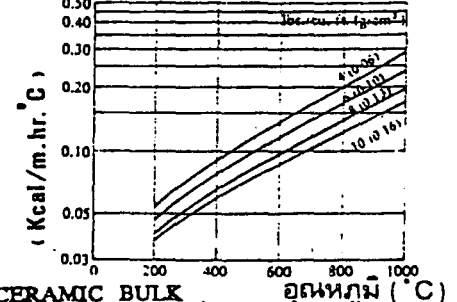
บริษัท แสงชัยมิเตอร์ จำกัด

694/25-26 สะพานควาย ต.รังษามชอชย์วัดไผ่ดิน 13ซอย 151 ถนนพหลโยธิน กรุงเทพฯ 10400
TEL: 271-0239, 271-4969-77, 279-7550, 278-5525, 279-0894-5, 270-1980-2
FAX: 1021-271-1030 TELEX: 87253 SCM TH

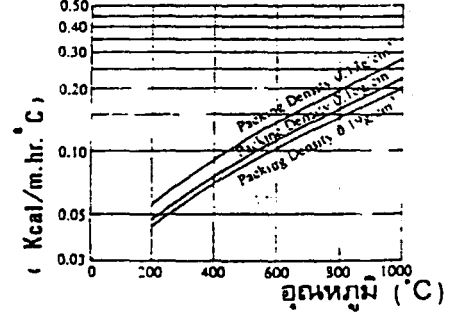
ลักษณะ	BULK แบบเป็นก้อนเหมือนสำลี	BULK แบบผืนผ้า	1400 BLANKET แบบผืนผ้า
ลักษณะ	ค่าความนำความร้อนต่ำน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นได้ดีสามารถจับให้เข้ารูปได้โดยง่ายและให้ความหนาแน่นคงที่ด้วย	เป็นลักษณะผืนผ้าม้วนอยู่บนแกน	เป็นลักษณะผืนผ้าม้วนอยู่บนแกน สามารถใช้ในที่ที่มีอากาศน้อยหรือสูญญากาศได้
ขนาด	มีขนาดบรรจุ 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 (cm ³)	ความหนาแน่นในการบรรจุระหว่าง 0.06 - 0.20	0.10 (6lb.)	0.13 (8lb.)
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด	1260 °C	1260 °C	1400 °C
หลอมเหลว	1760 °C	1760 °C	1815 °C
การนำความร้อน (cal/m.hr. °C)	ที่มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm ³	ที่มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm ³	มีความหนาแน่นของ BULK เท่ากับ 0.16 g/cm ³
0 °C	0.07 kcal	0.07 kcal	0.06 kcal
100 °C	0.11 kcal	0.10 kcal	0.10 kcal
200 °C	0.16 kcal	0.15 kcal	0.14 kcal
300 °C	0.22 kcal	0.21 kcal	0.20 kcal
วิธีการใช้งาน	<ul style="list-style-type: none"> ■ ใช้ห่อหุ้มข้อต่อของท่อที่มีการขยายตัว ■ ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผา ■ ใช้ใส่เพิ่มเติมให้เต็มในกรณีทำงานที่ใช้นั้นอาจจะใช้แบบ BLANKET แล้วยังเหลือที่อยู่เพียงเล็กน้อยหรือใช้ใส่ในจุดที่ใส่ BLANKET เข้าไปไม่ได้ ■ ใช้แทนแอสเบสทอส 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผา ■ ใช้เป็นม่านป้องกันความร้อนในขณะที่กำลังเปิดเตาเผา ■ ใช้เป็นฉนวนรองรับหรือป้องกันความร้อนในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน ■ ใช้แทนแอสเบสทอส 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนรั่วไหลในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ ■ ใช้เป็นฉนวนห่อหุ้มและป้องกันวัสดุชิ้นงานที่มีอุณหภูมิสูงมาก ๆ
ราคา	250 บาท/kg	2,900 บาท/ผืน	5,400 บาท/ผืน

CERAMIC BLANKET

ทำการนำความร้อนที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ



ทำการนำความร้อนที่มีค่าความหนาแน่นต่าง ๆ



คุณสมบัติของ CERAMIC FIBER

ชื่อผลิตภัณฑ์	CERAMIC FIBER	CERAMIC FIBER 1400
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	1260	1400
สี	ขาว	ขาว
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (um)	2.5	2.8
ความยาวของเส้นใย (mm)	- 250	- 150
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.6	2.6
ข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมี (%)		
Al ₂ O ₃	47.3	56.3
Si O ₂	52.3	43.3
Cr O _{2 3}	—	—
L.O.I.	0.0	0.0

ภาคผนวก ค

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันของเทอร์โมคัปเปิล type S

TYPE S THERMOCOUPLES

TEMPERATURES IN DEGREES C (IPTS 1968).											REFERENCE JUNCTION AT 0 C		TEMPERAT
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10.	DEG C	
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS													
-50	-0.236												550
-40	-0.194	-0.199	-0.203	-0.207	-0.211	-0.215	-0.220	-0.224	-0.228	-0.232	-0.236		560
-30	-0.150	-0.155	-0.159	-0.164	-0.168	-0.173	-0.177	-0.181	-0.186	-0.190	-0.194		570
-20	-0.103	-0.108	-0.112	-0.117	-0.122	-0.127	-0.132	-0.136	-0.141	-0.145	-0.150		580
-10	-0.053	-0.058	-0.063	-0.068	-0.073	-0.078	-0.083	-0.088	-0.093	-0.098	-0.103		590
0	0.000	-0.005	-0.011	-0.016	-0.021	-0.027	-0.032	-0.037	-0.043	-0.048	-0.053		600
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055		610
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113		620
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.142	0.148	0.154	0.161	0.167	0.173		630
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.203	0.210	0.216	0.222	0.228	0.235		640
40	0.235	0.241	0.247	0.254	0.260	0.266	0.273	0.279	0.286	0.292	0.299		650
50	0.299	0.305	0.312	0.318	0.325	0.331	0.338	0.345	0.351	0.358	0.365		660
60	0.365	0.371	0.378	0.385	0.391	0.399	0.405	0.412	0.419	0.425	0.432		670
70	0.432	0.439	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502		680
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.537	0.544	0.551	0.558	0.566	0.573		690
90	0.573	0.580	0.587	0.594	0.602	0.609	0.616	0.623	0.631	0.638	0.645		700
100	0.645	0.653	0.660	0.667	0.675	0.682	0.690	0.697	0.704	0.712	0.719		710
110	0.719	0.727	0.734	0.742	0.749	0.757	0.764	0.772	0.780	0.787	0.795		720
120	0.795	0.802	0.810	0.818	0.825	0.833	0.841	0.848	0.856	0.864	0.872		730
130	0.872	0.879	0.887	0.895	0.903	0.910	0.918	0.926	0.934	0.942	0.950		740
140	0.950	0.957	0.965	0.973	0.981	0.989	0.997	1.005	1.013	1.021	1.029		750
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.093	1.101	1.109		760
160	1.109	1.117	1.125	1.133	1.141	1.149	1.158	1.166	1.174	1.182	1.190		770
170	1.190	1.198	1.207	1.215	1.223	1.231	1.240	1.248	1.256	1.264	1.273		780
180	1.273	1.281	1.289	1.297	1.306	1.314	1.322	1.331	1.339	1.347	1.356		790
190	1.356	1.364	1.373	1.381	1.389	1.398	1.406	1.415	1.423	1.432	1.440		800
200	1.440	1.448	1.457	1.465	1.474	1.482	1.491	1.499	1.508	1.516	1.525		810
210	1.525	1.534	1.542	1.551	1.559	1.568	1.576	1.585	1.594	1.602	1.611		820
220	1.611	1.620	1.628	1.637	1.645	1.654	1.663	1.671	1.680	1.689	1.698		830
230	1.698	1.706	1.715	1.724	1.732	1.741	1.750	1.759	1.767	1.776	1.785		840
240	1.785	1.794	1.802	1.811	1.820	1.829	1.838	1.846	1.855	1.864	1.873		850
250	1.873	1.882	1.891	1.899	1.908	1.917	1.926	1.935	1.944	1.953	1.962		860
260	1.962	1.971	1.979	1.988	1.997	2.006	2.015	2.024	2.033	2.042	2.051		870
270	2.051	2.060	2.069	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141		880
280	2.141	2.150	2.159	2.168	2.177	2.186	2.195	2.204	2.213	2.222	2.232		890
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.286	2.295	2.304	2.314	2.323		900
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.359	2.368	2.378	2.387	2.396	2.405	2.414		910
310	2.414	2.424	2.433	2.442	2.451	2.460	2.470	2.479	2.488	2.497	2.506		920
320	2.506	2.516	2.525	2.534	2.543	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599		930
330	2.599	2.608	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692		940
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786		950
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.852	2.861	2.870	2.880		960
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974		970
370	2.974	2.984	2.993	3.003	3.012	3.022	3.031	3.041	3.050	3.059	3.069		980
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.117	3.126	3.136	3.145	3.155	3.164		990
390	3.164	3.174	3.183	3.193	3.202	3.212	3.221	3.231	3.241	3.250	3.260		1,000
400	3.260	3.269	3.279	3.288	3.298	3.308	3.317	3.327	3.336	3.346	3.356		1,010
410	3.356	3.365	3.375	3.384	3.394	3.404	3.413	3.423	3.433	3.442	3.452		1,020
420	3.452	3.462	3.471	3.481	3.491	3.500	3.510	3.520	3.529	3.539	3.549		1,030
430	3.549	3.558	3.568	3.578	3.587	3.597	3.607	3.616	3.626	3.636	3.645		1,040
440	3.645	3.655	3.665	3.675	3.684	3.694	3.704	3.714	3.723	3.733	3.743		1,050
450	3.743	3.752	3.762	3.772	3.782	3.791	3.801	3.811	3.821	3.831	3.840		1,060
460	3.840	3.850	3.860	3.870	3.879	3.889	3.899	3.909	3.919	3.928	3.938		1,070
470	3.938	3.948	3.958	3.968	3.977	3.987	3.997	4.007	4.017	4.027	4.036		1,080
480	4.036	4.046	4.056	4.066	4.076	4.086	4.095	4.105	4.115	4.125	4.135		1,090
490	4.135	4.145	4.155	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.214	4.224	4.234		1,100
500	4.234	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.333		1,110
510	4.333	4.343	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432		1,120
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532		1,130
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632		1,140
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732		1,150

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	8.515	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	12.115	12.127	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	12.345	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	13.956	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	14.526	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	15.589	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	16.665	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		

TEMPERATURE	DEG C
-190	-1.1
-180	-1.1
-170	-1.1
-160	-1.1
-150	-1.1
-140	-1.1
-130	-1.1
-120	-1.1
-110	-1.1
-100	-1.1
-90	-1.1
-80	-1.1
-70	-1.1
-60	-1.1
-50	-1.1
-40	-1.1
-30	-1.1
-20	-1.1
-10	-1.1
0	0
10	0
20	0
30	1
40	1
50	2
60	2
70	2
80	3
90	3
100	4
110	4
120	5
130	5
140	6
150	6
160	7
170	7
180	8
190	8
200	9
210	9
220	10
230	10
240	11
250	12
260	12
270	13
280	13
290	14
300	14
310	15
320	16
330	16
340	17
350	17
360	18
370	18
380	19
390	20
400	20