

621.4025

ก 952 ก

ร. 3

การออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกโซนเดียว

15 ต.ค. 2539

ปริญญานิพนธ์
ของ
โกวิทย์ บุญยะกาญจน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์

มีนาคม 2539

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

B. 46185

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
วิชาเอกฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

.....*ผศ.ดร. ณสรุค ผลโคก*.....ประธาน

(ผศ. ดร. ณสรุค ผลโคก)

.....*อ.บัญชา ศิลปสกุลสุข*.....กรรมการ

(อ.บัญชา ศิลปสกุลสุข)

คณะกรรมการสอบ

.....*ผศ.ดร. ณสรุค ผลโคก*.....ประธาน

(ผศ. ดร. ณสรุค ผลโคก)

.....*อ.บัญชา ศิลปสกุลสุข*.....กรรมการ

(อ.บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....*อ.ชุมพล พัฒนสุวรรณ*.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อ.ชุมพล พัฒนสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....*ดร. ศิริฎา พูลสุวรรณ*.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ดร. ศิริฎา พูลสุวรรณ)

วันที่ ๘ เดือน มีนาคม พ.ศ. ๒๕๖๑

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยการได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณสรวงศ์ ผลโภค ประธานที่ปรึกษา และอาจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข กรรมการควบคุม ปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไข ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์สิริชัย ประเสริฐวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ที่ส่งกลับไปแล้ว ซึ่งได้มีส่วนช่วยให้คำปรึกษาและให้ใช้อุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณอาจารย์ชุมพล พัฒนสุวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้

ขอขอบคุณอาจารย์สุพจน์ มุศิริ คุณวีระศักดิ์ ชมภูวิเศษ คุณวิชุดา สุบรรณณ์ คุณวิฑิตา เกิดปั้น และคุณमारศรี สันติชัยศรี ที่ช่วยเหลือในการให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และช่วยให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มลงได้

ขอขอบคุณ คุณอรรถ อัฐเมือง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ที่กรุณาให้ยืมเครื่องมือในการประกอบเตา

ขอขอบคุณ คุณปราณีต อ่อนแย้ม คุณอารีวรรณ จิตต์บรรเทา คุณปรากฏ กิจนิตยชีร์ และคุณวิมล รัฐถาวาวัน ที่กรุณาอุดหนุนทุนสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณวิจิตรา จะโนภาษ ที่กรุณาคำประกันในการลาศึกษาต่อครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์หมวดวิทยาศาสตร์โรงเรียนปทุมธานี“นันทมนีนันท์” และเพื่อนๆ รวมทั้งนิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ ที่เป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ พี่ๆ น้องๆ ตลอดจนภรรยาและบุตร ที่เป็นผู้ส่งเสริมและเป็นกำลังใจในการศึกษาของผู้วิจัย

โกวิทย์ บุญยะกาญจน์

สารบัญ

บทที่

หน้า

1 บทนำ	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย	7
ขอบเขตของงานวิจัย	7
ความสำคัญของงานวิจัย	8
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
ทฤษฎีการถ่ายทอดความร้อน	9
ทฤษฎีการออกแบบและสร้างเตา	25
3 อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	29
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	29
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
4 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง	44
5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ	76
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	76
ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	81
ประวัติย่อของผู้วิจัย	88

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ค่าสภาพนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ	10
2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีต่างๆ	11
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)	44
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)	45
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3)	46
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (คิดจากค่าเฉลี่ยในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)	47
4.1ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)	53
4.1ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหลังเตาตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)	54
4.2ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)	54
4.2ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหลังเตาตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)	55
4.3ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหน้าเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3)	55
4.3ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหลังเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3)	56
4.4ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตา ไปทางด้านหน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง) ..	56

4.4x ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทาง ด้านหลังเตาตามแนวแกนกลางเตา(ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)	57
5.1 ค่าเวลาในการลดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิสูงสุด $1,100^{\circ}\text{C}$ (การทดลองครั้งที่ 1)	62
5.2 ค่าเวลาในการลดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิสูงสุด $1,100^{\circ}\text{C}$ (การทดลองครั้งที่ 2)	65
5.3 ค่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิกึ่งกลางเตาสูงสุด $1,100^{\circ}\text{C}$ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2)	68
6 วัสดุที่ใช้ทำลวดความร้อน	82
7 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน	83
8 การอุ่นคอนกรีตทนไฟ	85
9 ผลิตภัณฑ์คอนกรีตทนไฟของโรงงานผลิตวัสดุทนไฟทำหหลวง	86
10 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อใช้ เทอร์โมคัปเปิล type R วัดอุณหภูมิ	87

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ส่วนประกอบต่างๆของเตาตามวิธีของไซราลสกี	2
2ก ลักษณะของเตาตามวิธีการของบริดจ์แมนตามแนวนอน	3
2ข ลักษณะของเตาตามวิธีการของบริดจ์แมนตามแนวตั้ง	4
3 ลักษณะของเตาไฟฟ้าชนิดต่างๆ	6
4 การนำความร้อนเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมขนาด $dr, r d\theta, dz$ ในพิกัดทรงกระบอก ..	14
5ก การนำความร้อนของรูปทรงกระบอกตามแนวรัศมี	15
5ข การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนังเตา	15
6 การนำความร้อนผ่านรูปทรงกระบอกหลายชั้น	18
7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนังรูปทรงกระบอกหลายชั้น	20
8 ท่อที่มีรัศมีวงนอก r_o หุ้มด้วยฉนวนความร้อนที่มีรัศมีภายนอก r_o	22
9 การเปลี่ยนแปลงของ Q และ $1/2\pi r_o L h + \ln(r_o/r_i)/2\pi k L$ กับ r_o	24
10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางตามแนวแกนกลางของเตา เมื่อผนังเตายาวมากและมีฉนวนหุ้ม	26
11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางตามแนวแกนกลางของเตา สำหรับเตาทั่วไป	27
12 ท่ออลูมินาที่ใช้ทำผนังเตา	29
13 ลวดแคนดัล-เอเอฟ	30
14 แผ่นใยเซรามิก	30
15 คอนกรีตทนไฟ 16	31
16 ผนังด้านนอกของเตาทำจากแผ่นสแตนเลส	31
17 เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า	32
18 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล	33
19 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ แอมมิเตอร์กระแสลับ และนาฬิกาจับเวลา	34

20	ภาคตัดขวางของตัวเตาปลุกผลึกโซนเดียวแสดงชั้นของการวางวัสดุที่ใช้ประกอบเป็นเตา	36
21	การผันลดความร้อนรอบท่ออุณหภูมิโดยมีระยะของการผันสม่ำเสมอ	38
22	การผันลดความร้อนรอบท่ออุณหภูมิ	39
23	ฝาประกอบด้านหน้าของเตา	39
24	การผันแผ่นใยเซรามิกรอบท่อเตา	40
25	การบรรจุท่อเตาที่พันด้วยแผ่นใยเซรามิกแล้วบรรจุลงในท่อสเตนเลส	40
26	การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเตาปลุกผลึกโซนเดียว	41
27	เตาปลุกผลึกโซนเดียวที่สร้างเสร็จแล้ว	41
28	การวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อเตา	43
29	ลักษณะภายในท่อเตาขณะที่เตามีอุณหภูมิ $1,100^{\circ}\text{C}$	43
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ข้อมูลจากผล การทดลองครั้งที่ 1)	48
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า(ข้อมูลจากผล การทดลองครั้งที่ 2)	49
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า(ข้อมูลจากผล การทดลองครั้งที่ 3)	50
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ข้อมูลจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)	51

34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เตา	52
35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)	58
36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)	59
37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3)	60
38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา (ข้อมูลจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)	61
39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)	72
40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)	73
41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	74

ภาคผนวก

ภาคผนวก	หน้า
ก วัสดุที่ใช้ทำลวดความร้อน	82
ข วัสดุที่ใช้เป็นฉนวนความร้อน	83
ค เทคนิคการใช้คอนกรีตทนไฟ	84
ง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล	87

บทที่ 1

บทนำ

ในปลายศตวรรษที่ 18 (Dryburgh, 1986 : 10-13) นักสังเคราะห์ผลึกยังคงปลูกผลึกออกมาโดยใช้สมมุติฐานการปลูกผลึกจากสารละลายเพียงอย่างเดียวมาเป็นพื้นฐานในการปลูกผลึก และในปลายศตวรรษที่ 18 ที่เมืองเอดินเบิร์ก (Edinburgh) ได้จัดประชุม ณ The Sixth International Summer School on Crystal Growth (ISSCG6) ส่งผลให้เริ่มมีการปลูกผลึกด้วยวิธีการหลอมเหลวสาร ดังนั้นการปลูกผลึกจากการหลอมเหลวของสารจึงเริ่มต้นที่เอดินเบิร์กนั่นเอง

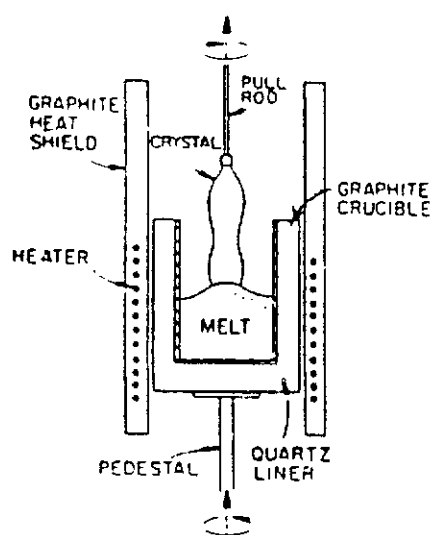
ในปีค.ศ. 1798 เซอร์ เจมส์ ฮอลล์ (Sir James Hall) ได้สาธิตการทดลองการปลูกผลึกโดยอาศัยหลักการหลอมเหลว และการเย็นตัวของสาร การทดลองนี้ได้ผลสรุปว่า ผลึกสามารถผลิตได้จากการเย็นตัวอย่างช้าๆของสารที่ถูกหลอมเหลว ซึ่งสารที่เซอร์ เจมส์ ฮอลล์ นำมาใช้ในการทดลองนี้คือ หินบะซอลต์ (Basaltic rock) จาก Arthur's seat ซึ่งเป็นหินที่อุดอยู่ตามปากปล่องภูเขาไฟ พบมากบริเวณรอบๆเมืองเอดินเบิร์ก จากผลสรุปของการทดลองนี้ทำให้เหล่านักธรณีวิทยาเกิดความตื่นตัวและหันมาสนใจทดลองหาการเกิดผลึกกันมากขึ้น

ความพยายามที่จะค้นคว้าหาเทคนิคในการปลูกผลึกเกิดขึ้นจากการที่มีการค้นพบหลักการทํางานของทรานซิสเตอร์เมื่อ ปี ค.ศ. 1948 ดี.ซี. เบนเน็ต (D.C. Bennett) และ บี. ซอว์เยอร์ (B. Sawyer) ต้องการที่จะนำเอาเทคนิคการทำให้บริสุทธิ์แบบแยกโซน (Zone-refining) มาใช้ในการผลิตสารเยอรมาเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (High purity germanium) และใช้เทคนิคโซซาร์ลสกี (Czochralski technique) สำหรับการผลิตผลึกเยอรมาเนียม ในโรงงานอุตสาหกรรม

กรรมวิธีในการปลูกผลึกเดียวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมการผลิตผลึกเดียวเพื่อการวิจัยในห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายกรรมวิธี แต่แบบหนึ่งที่ใช้กันคือการปลูกผลึกจากสภาวะหลอมเหลว (Melt growth) ซึ่งมีมากมายหลายวิธีทั้งในระบบเปิดและระบบปิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของธาตุที่กำลังหลอมเหลว (Dryburgh, 1986 : 15) การปลูกผลึกโดยวิธีนี้ได้ผลเร็วที่สุดในทางปฏิบัติการปลูกผลึกจากวิธีนี้อาจใช้ผลึกนำ (Seed) หรือไม่ใช้ก็ได้ ตัวอย่างของการปลูกผลึกจากสภาวะหลอมเหลวได้แก่

วิธีโซซาร์ลสกี (Czochralski method) วิธีนี้สารจะถูกหลอมเหลวในภาชนะที่ใส่สารซึ่งให้ความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวของสารนั้น แกนของผลึกนำจะถูกเลื่อนลงให้อยู่เหนือผิวสารหลอมเหลวและจุ่มผลึกนำบนผิวหน้าของสารที่หลอมเหลวปรับอุณหภูมิจนของเหลวจับติดผลึกนำและขยายใหญ่ขึ้น

ขณะเดียวกัน ผลึกจะถูกหมุนและดึงขึ้นด้วยอัตราเร็วคงตัว การควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกทำได้โดยการปรับอุณหภูมิให้กับสารที่หลอมเหลว หรือปรับอัตราการดึงผลึกขึ้นจากของเหลว ในกรณีสารที่จะเตรียมเป็นไอได้ง่ายจะใช้วิธีการเตรียมในภาชนะปิดเพื่อให้สามารถควบคุมความดันได้ ส่วนสารที่เป็นไอได้ยากสามารถเตรียมในภาชนะเปิด ภายใต้บรรยากาศที่ต้องการได้

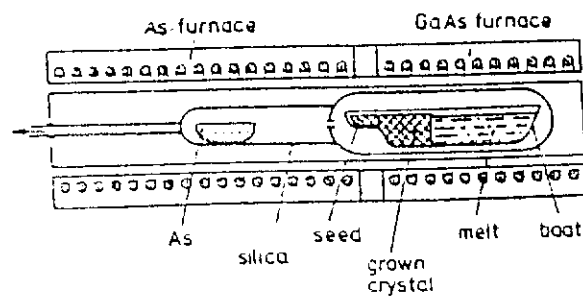


ภาพประกอบ 1 ส่วนประกอบต่างๆของเตาตามวิธีของไซราลสกี(Dryburgh. 1986 : 42)

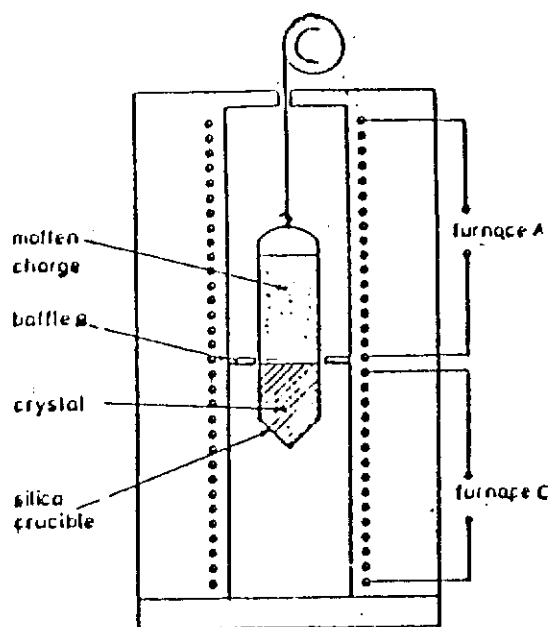
ในการปลูกผลึกด้วยวิธีของไซราลสกี ผลึกที่ได้ไม่สัมผัสกับภาชนะ ผิวรอยต่อระหว่างผลึกกับของเหลว (Solid liquid interface) จะอยู่ใกล้ระดับของเหลว ผลึกใหม่จะเรียงตัวอยู่แนวเดียวกับผลึกนำวิธีนี้สามารถใช้เตรียมผลึกขนาดใหญ่และเตรียมได้เร็วทั้งยังสามารถควบคุมการเตรียมผลึกที่มีความสะอาดบริสุทธิ์ได้เป็นอย่างดี ข้อจำกัดของวิธีนี้คือไม่สามารถใช้เตรียมผลึกจากสารองค์ประกอบที่มีความดันไอสูง ณ จุดหลอมเหลว การเตรียมผลึกไม่สามารถเตรียมได้อย่างต่อเนื่อง ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์หมุนและการดึง ตำแหน่งหลอดความร้อน (Thermal configuration) เพื่อรักษาความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างไอกับสารที่หลอมเหลว

วิธีนอร์มอล ฟรีซซิง (Normal freezing method) สามารถแบ่งตามการวางตัวของภาชนะที่บรรจุสารได้เป็น วางตัวในแนวนอน (Horizontal normal freezing) และวางตัวในแนวตั้ง (Vertical normal freezing) ซึ่งทั้งสองแบบโดยปกติแล้วจะใส่สารที่ต้องการเตรียมผลึกไว้ในภาชนะปิด สารทั้งหมด

จะถูกหลอมเหลว แล้วลดอุณหภูมิของสารเพื่อให้เกิดผลึกโดยการเลื่อนภาชนะบรรจุสารออกจากเตา หรือเลื่อนเตาออกห่างภาชนะที่บรรจุสารก็ได้ ถ้าเป็นการวางภาชนะในแนวนอน และเลื่อนภาชนะบรรจุสารออกจากเตา ผิวรอยต่อระหว่างผลึกกับของเหลวจะเคลื่อนที่ในแนวนอนเรียกว่าวิธีการของบริดจ์แมนตามแนวนอน (Horizontal Bridgman method) ดังภาพประกอบ 2ก แต่ถ้าภาชนะวางในแนวตั้งที่ปลายหนึ่งของภาชนะเป็นปลายแหลมโดยให้ภาชนะเลื่อนลง ซึ่งส่วนล่างของเตาจะร้อนน้อยกว่า ส่วนบนผิวรอยต่อระหว่างผลึกกับของเหลวจะเคลื่อนขึ้นจะเรียกวิธีนี้ว่าวิธีการของบริดจ์แมนตามแนวตั้ง (Vertical Bridgman method) ดังภาพประกอบ 2ข



ภาพประกอบ 2ก ลักษณะของเตาวิธีการของบริดจ์แมนตามแนวนอน(Dryburgh. 1986 : 145)



ภาพประกอบ 2ฯ ลักษณะของเตาตามวิธีการของบริดจ์แมนในแนวดิ่ง (Dryburgh, 1986 : 193)

วิธีนอร์มอลฟรีซซิงใช้มากในการเตรียมผลึกเดี่ยวของสารที่เป็นไอง่าย หรือมีองค์ประกอบของสารที่เป็นไอง่ายอยู่ด้วย เช่น สารกึ่งตัวนำ กลุ่ม II - VI และสารประกอบกึ่งตัวนำ กลุ่ม IV - V

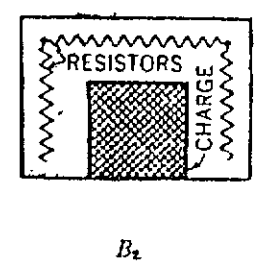
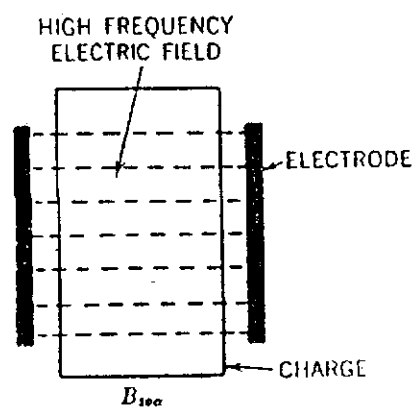
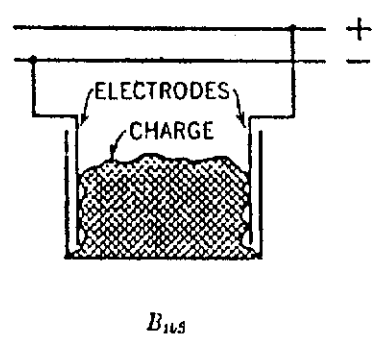
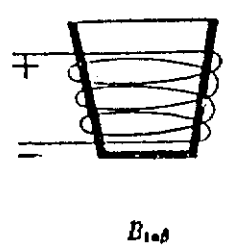
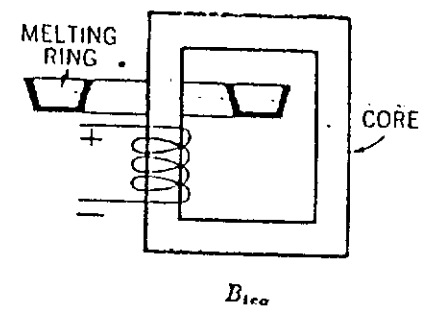
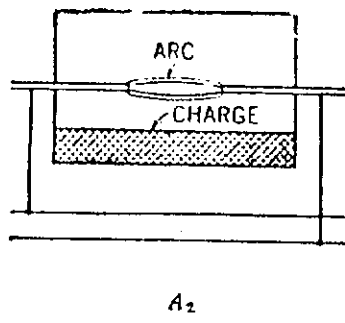
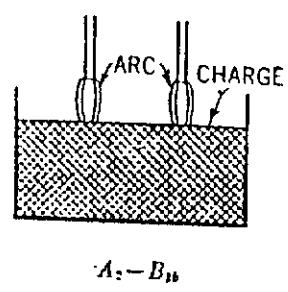
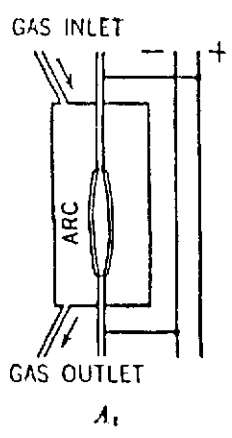
สำหรับการเลือกวิธีการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความบริสุทธิ์ ขนาดของผลึก อัตราการโตของผลึก ค่าใช้จ่าย คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการ และคุณสมบัติของธาตุหรือสารประกอบที่ใช้ในการปลูกผลึก ซึ่งปัจจุบันนี้มีผลึกเดี่ยวมากมายหลายชนิดที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานในการศึกษา การวิจัยและเชิงการค้าโดยใช้วิธีการปลูกผลึกจากสภาวะหลอมเหลวเป็นส่วนใหญ่เพราะวิธีนี้ให้ผลเร็วที่สุด อัตราการโตของผลึกไม่ถูกจำกัดด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล (Mass transport) อีกทั้งยังสามารถปลูกผลึกได้ทั้งในระบบปิดและระบบเปิด แต่ข้อสำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการปลูกผลึกจากสภาวะหลอมเหลวก็คือ การปลูกผลึกโดยวิธีนี้ต้องการอุณหภูมิที่สูง เพื่อหลอมสารให้อยู่ในสภาวะหลอมเหลว ดังนั้นจึงต้องอาศัยการออกแบบเตาสำหรับหลอมสาร (Furnace) ที่เหมาะสม ให้อุณหภูมิสูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

เตาที่ใช้หลอมสารในปัจจุบันนิยมใช้เตาไฟฟ้า เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง เช่น สามารถสร้างอุณหภูมิสูงๆได้ง่าย สามารถเพิ่มความร้อนจากภายในได้ การควบคุมการทำงานของเตาทำได้ง่ายและไม่ทำให้เกิดมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ชนิดของเตาไฟฟ้า (Paschkis, 1945 : 4-12)

เตาไฟฟ้าสามารถแบ่งตามคุณลักษณะของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนแก่ตัวเตาได้ 2 แบบ คือ

1. เตาไฟฟ้าชนิดอาร์ค (Arc furnaces) เป็นเตาที่ให้ความร้อนโดยการใช้ความร้อนที่ได้จากการอาร์ค ซึ่งสามารถแบ่งตามประเภทการให้ความร้อนแก่ตัวเตาได้เป็น เตาไฟฟ้าชนิดให้ความร้อนโดยตรง (Direct-heat furnaces) และเตาไฟฟ้าชนิดให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect-heat furnaces)
2. เตาไฟฟ้าชนิดความต้านทาน (Resistance furnaces) เป็นเตาที่ให้ความร้อนโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้น สามารถแบ่งตามประเภทการให้ความร้อนแก่ตัวเตาได้เป็น เตาไฟฟ้าชนิดให้ความร้อนโดยตรง และเตาไฟฟ้าชนิดให้ความร้อนโดยอ้อมรูปแบบของเตาไฟฟ้าชนิดต่างๆแสดงได้ดังในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ลักษณะของเตาไฟฟ้าชนิดต่างๆ(Paschkis. 1945 : 5)

จากภาพประกอบ 3 A₁: เตาไฟฟ้าชนิดอาร์คที่ให้ความร้อนโดยตรง

A₂: เตาไฟฟ้าชนิดอาร์คที่ให้ความร้อนโดยอ้อม

- $A_2 - B_{1b}$: เต้าไฟฟ้าชนิดที่รวมกันระหว่างเต้าไฟฟ้าชนิดอาร์คที่ให้
ความร้อนโดยอ้อมกับเต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทาน
แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความร้อนโดยตรง
- $B_{1a\alpha}$: เต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทานแบบขดลวดเหนียวน้ำซึ่ง
มีแกน (With core) ที่ให้ความร้อนโดยตรง
- $B_{1a\beta}$: เต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทานแบบขดลวดเหนียวน้ำซึ่ง
ไม่มีแกน (Without core) ที่ให้ความร้อนโดยตรง
- $B_{1b\alpha}$: เต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทานแบบอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง
ที่ให้ความร้อนโดยตรง
- $B_{1b\beta}$: เต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทานแบบอิเล็กทรอนิกส์ความถี่
ต่ำที่ให้ความร้อนโดยตรง
- B_2 : เต้าไฟฟ้าชนิดความต้านทานที่ให้ความร้อนโดยอ้อม

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

เพื่อให้ได้เต้าปลุกผลึกโซนเดี่ยวชนิดความต้านทานที่ให้ความร้อนโดยอ้อมซึ่งสามารถปรับ
ระดับอุณหภูมิได้ และ ศึกษาสมบัติเฉพาะของเต้าปลุกผลึก เช่น เกรเดียนท์ของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของเต้า ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับอุณหภูมิภายในเต้า เป็นต้น

ขอบเขตของงานวิจัย

ออกแบบและสร้างเต้าปลุกผลึกโซนเดี่ยวตามแนวนอนที่สามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุด 1,200
องศาเซลเซียส

ความสำคัญของการวิจัย

1. ทราบสมบัติเฉพาะของเตาที่สร้างขึ้น
2. สามารถนำเทคนิคและวิธีการต่างๆจากงานวิจัยครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและสร้างเตาที่มีลักษณะคล้ายกันได้อีก
3. สามารถใช้เตาที่สร้างขึ้น ทดลองปลูกผลึกสารต่างๆที่มีอุณหภูมิของการหลอมเหลวต่ำกว่า 1,200 องศาเซลเซียส

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การถ่ายเทความร้อน (Simonson. 1967 : 1-27)

ความร้อนถ่ายเทจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธี คือการนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ในการถ่ายเทของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิดความร้อนและตัวกลางของการถ่ายเทความร้อน

วิธีการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer methods)

1. การนำความร้อน คือวิธีการที่ความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกัน หรือเป็นการถ่ายเทของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกันแต่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทผ่านโมเลกุลของสาร

นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อโจเซฟฟูริเยร์ (Joseph Fourier) ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 (Kreith. 1973 : 7) โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองได้เป็นสมการดังนี้

$$Q_x = -kA \left(\frac{dT}{dX} \right) \quad (1)$$

โดยที่ Q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางของ X มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

k คือ ค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/mK)

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทของความร้อน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

$\frac{dT}{dX}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง (Temperature gradient) มีหน่วยเป็น เคลวินต่อเมตร (K/m)

เรียกสมการ (1) ว่าสมการฟูริเยร์เรท (Fourier rate equation) ใช้ในกรณีที่ค่าสภาพนำความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ เช่น สารจำพวกอโลหะ จะมีค่า k ต่ำ ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 ค่าสภาพนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ

วัตถุ	ค่าสภาพนำความร้อน (W/mK)
แก๊ส (ที่ความดันบรรยากาศ)	0.0069 - 0.17
ฉนวน	0.034 - 0.21
ของเหลว (อโลหะ)	0.086 - 0.69
ของแข็ง (อโลหะ)	0.034 - 2.6
โลหะเหลว	8.6 - 76
โลหะผสม	14 - 120
โลหะบริสุทธิ์	52 - 410

(Kreith, 1973 : 9)

สำหรับเครื่องหมายลบในสมการที่ (1) แสดงว่าความร้อนจะถ่ายเทไปในทิศทางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ

2. การพาความร้อนคือ วิธีการที่ความร้อนถ่ายเทระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง หรืออาจกล่าวได้ว่าการพาความร้อน คือการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล เมื่อของแข็งและของไหลมีอุณหภูมิต่างกันการพาความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1 การพาโดยการบังคับ (Forced convection) เป็นการถ่ายเทของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ

2.2 การพาตามธรรมชาติ (Natural convection) เป็นการถ่ายเทของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของแข็งจะเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเองซึ่งแรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

ในปี ค.ศ 1701 ไอแซค นิวตัน (Isac Newton) (Kreith. 1973 : 13) ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทของความร้อนโดยการพาดังนี้

$$Q_c = h_c A (T_h - T_c) \quad (2)$$

โดยที่ Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน ($W/m^2 K$)

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทของความร้อน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหลหรือพื้นผิวของของแข็ง) มีหน่วยเป็นเคลวิน(K)

T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหลหรือพื้นที่ผิวของของแข็ง) มีหน่วยเป็นเคลวิน(K)

ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในกรณีต่างๆ

ชนิดของการพา	ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W / m^2 K$)
การพาตามธรรมชาติเมื่อของไหลเป็นอากาศ	6 - 30
การพาโดยการบังคับเมื่อของไหลเป็นอากาศ	30 - 300
การพาโดยการบังคับเมื่อของไหลเป็นน้ำมัน	60 - 1,800
การพาโดยการบังคับเมื่อของไหลเป็นน้ำ	300 - 6,000
การพาเมื่อน้ำกำลังเดือด	3,000 - 60,000
การควบแน่นของไอน้ำ	6,000 - 120,000

(Kreith. 1973 : 14)

3. การแผ่รังสีความร้อน คือการที่ความร้อนถ่ายเทได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่เหมือนการนำและการพาความร้อน กลไกการถ่ายเทของความร้อนโดยการแผ่รังสีอธิบายได้ดังนี้คือการแผ่รังสีวัตถุจะเปลี่ยนพลังงานภายใน (Internal energy) ไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อคลื่นเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุอื่น พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเหล่านี้จะถูกดูดกลืนไว้แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยวัตถุที่แผ่รังสีจะสูญเสียพลังงานภายในไปเรื่อยๆ ถ้าวัตถุไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งอื่นอุณหภูมิของวัตถุนั้นก็จะลดลง และอุณหภูมิของวัตถุที่แผ่รังสีจะคงที่ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนมีค่าเท่ากับอัตราการรับความร้อน

ในปี ค.ศ. 1884 สตีเฟนและโบลทซ์แมน (Stefan and Boltzmann) (Kreith, 1973 : 11-12) ได้เสนอสมการในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุที่มีพื้นที่ A และอุณหภูมิ T ดังนี้

$$Q_r = \sigma AT^4 \quad (3)$$

โดยที่ Q_r คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

σ คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลทซ์แมน (Stefan-Boltzmann constant)

$$= 5.67 \times 10^{-8} \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร เคลวิน}^4$$

A คือ พื้นที่ที่มีการแผ่รังสี มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

T คือ อุณหภูมิของวัตถุที่มีการแผ่รังสี มีหน่วยเป็น เคลวิน (K)

วัตถุที่จะให้ค่าการแผ่รังสีความร้อนตามสมการ (3) เรียกว่า วัตถุอุดมคติ (Ideal body) หรือวัตถุดำ (Black body) วัตถุที่มีอยู่ทั่วไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุโดยทั่วไปที่มีอุณหภูมิ T และพื้นที่ A จะเขียนได้ดังนี้

$$Q_r = \epsilon \sigma AT^4 \quad (4)$$

โดยที่ ϵ คือ สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด ϵ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

สมการ (4) ใช้สำหรับหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุที่มีพื้นที่ A ถ้าเราพิจารณากรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว A และมีสภาพเปล่งรังสีความร้อน ϵ กับวัตถุใหญ่ที่ล้อมรอบวัตถุเล็กอยู่ โดยวัตถุเล็กมีอุณหภูมิ T_h และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ T_c เราจะเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$Q_r = h_r A (T_h - T_c) \quad (5)$$

โดยที่ h_r คือ สัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer coefficient)

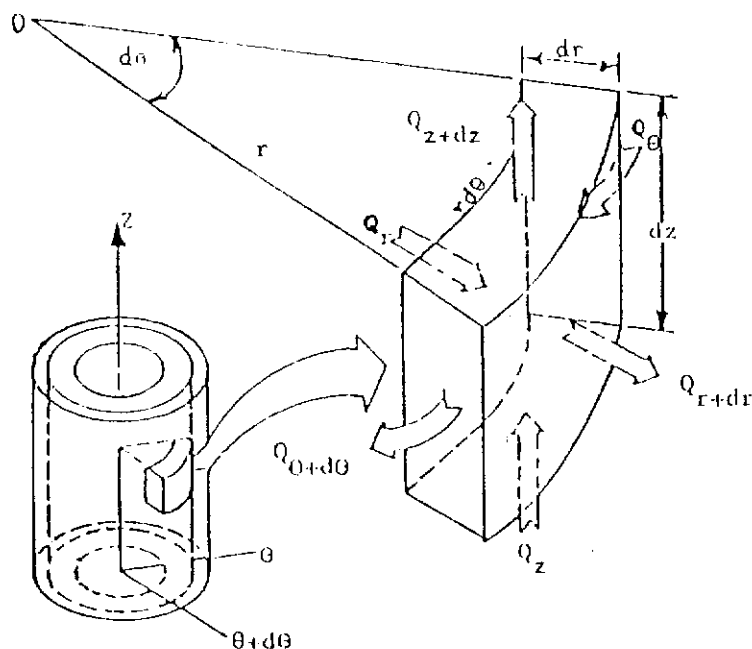
สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการนำความร้อน (Differential equation of heat conduction)

(Simonson, 1967 : 13-18)

จุดมุ่งหมายที่สำคัญในการวิเคราะห์เกี่ยวกับเรื่องการนำความร้อนก็คือการหาอุณหภูมิที่จุดต่างๆในวัตถุหรือการกระจายของอุณหภูมิในวัตถุ (Temperature distribution) เมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่ผิว ด้านนอกของวัตถุหรือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเมื่อเรารู้ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆแล้ว เราก็สามารถที่จะหาค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆได้ โดยใช้สมการของฟูริเยร์

สมการในรูปพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates)

ในกรณีของแกนในรูปพิกัดทรงกระบอก เราพิจารณาทิศทางของ r , θ และ Z โดยความร้อนเข้าสู่ปริมาตรเล็กๆที่มีด้านยาว dr , dz และ $rd\theta$ ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 การนำความร้อนเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมขนาด dr , $r d\theta$, dz ในรูป
พิกัดทรงกระบอก (Simonson, 1967 : 17)

สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการนำความร้อนในรูปพิกัดทรงกระบอกจะได้เป็น

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \frac{q_g}{k} = \frac{\rho C_p}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (6)$$

โดยที่ $\frac{\partial T}{\partial r}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวรัศมี

$\frac{\partial T}{\partial \theta}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางมุม θ

$\frac{\partial T}{\partial z}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางของ z

q_g คือ อัตราการผลิตความร้อนภายในปริมาตรต่อหน่วยปริมาตร

k คือ ค่าสภาพนำความร้อนของวัตถุ

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของวัตถุ

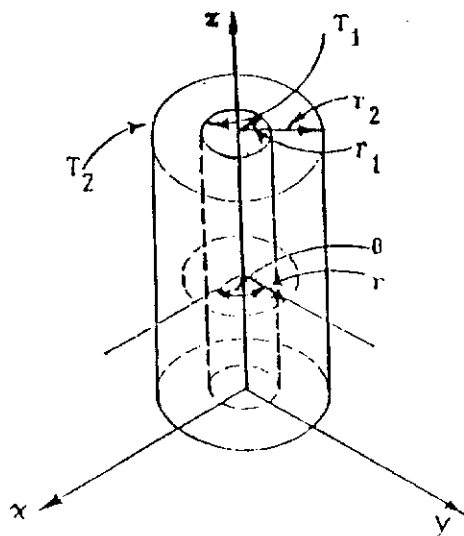
C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ

$\frac{\partial T}{\partial x}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา

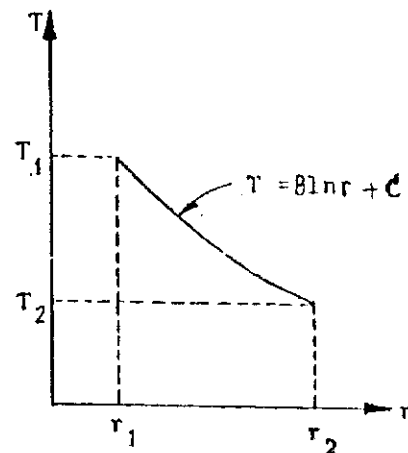
ในการที่จะแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆในตัวกลางหรือวัตถุใดๆจะต้องทราบเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions) ของระบบเสียก่อน โดยที่เงื่อนไขขอบเขต ระบุค่าของอุณหภูมิ และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขอบเขตของระบบ ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้นจะระบุค่าของอุณหภูมิของระบบที่จุดต่างๆในขณะที่จะเริ่มพิจารณา ($t = 0$)

การนำความร้อนผ่านผนังรูปทรงกระบอก (Simonson . 1967 : 25)

ในกรณีการนำความร้อนผ่านผนังรูปทรงกระบอก โดยที่มีอุณหภูมิความร้อนรูปทรงกระบอก ห่อหุ้มที่รูปทรงกระบอกกลวง เพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนจากท่อ ในการคำนวณ จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อนในแนวรัศมีซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบมิติเดียวอุณหภูมิของพื้นผิวของท่อจะมีค่าคงที่โดยอุณหภูมิข้างในท่อเป็น T_1 และอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกเป็น T_2 ดังภาพประกอบ 5



5ก



5ข

ภาพประกอบ 5ก แสดงการนำความร้อนของรูปทรงกระบอกตามแนวรัศมี

5ข แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนัง

สมการการนำความร้อนสำหรับรูปทรงกระบอกจะเป็นไปตามสมการที่ (6) คือ

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \frac{q_g}{k} = \frac{\rho C_p}{k} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

พิจารณาสำหรับสภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ถ้าเป็นทรงกระบอกที่ยาวมาก และอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของรูปทรงกระบอกนั้นก็คือ $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ และอุณหภูมิตามเส้นรอบวงใด ๆ จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงไปทั่วทั้งกระบอก ดังนั้น $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$ นอกจากนี้เรายังพิจารณาในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานความร้อนในผนังวัตถุ หรือ $q_g = 0$ ดังนั้นสมการ (6) จะเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (7)$$

ผลแก้ของสมการ (7) ได้เป็น

$$T = B \ln r + C \quad (8)$$

โดยที่ B และ C คือค่าคงที่

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต

$$\text{ที่ } r = r_1 ; T = T_1$$

$$\text{และ } r = r_2 ; T = T_2$$

จากเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดทำให้เราสามารถหาค่า B และ C ได้เป็น

$$B = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

และ
$$C = T_1 - \ln r_1 \left[\frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \right]$$

นำค่า B และ C แทนในสมการ (8) จะได้

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (9)$$

จากสมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของฟูริเยร์

$$Q = kA \left(\frac{dT}{dr} \right)$$

แทนค่า $A = 2\pi rL$ และ $\frac{dT}{dr} = \left(\frac{B}{r} \right)$ เราจะได้

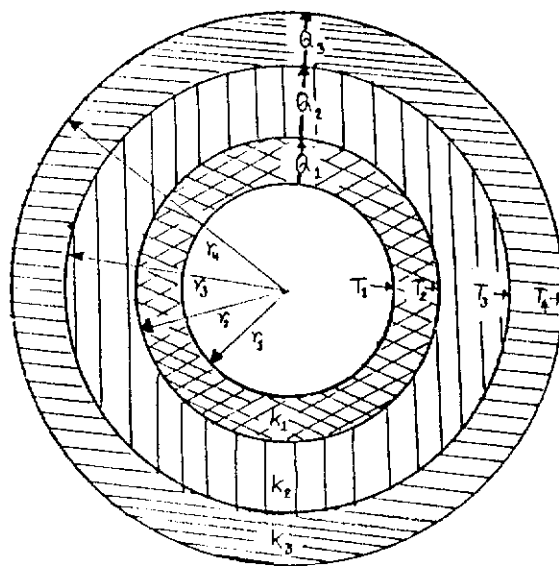
$$Q = -k2\pi rL \left(\frac{B}{r} \right)$$

แทนค่า B จะได้ปริมาณความร้อนที่ได้จากผนังด้านในเคลื่อนที่สู่ด้านนอกเป็น

$$Q = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (10)$$

สมการ (10) ใช้คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีของท่อทรงกระบอก เมื่อรู้ค่ารัศมีภายในและภายนอกรวมทั้งอุณหภูมิที่ผิวในและผิวนอกของท่อทรงกระบอกโดยที่อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวรัศมี เป็นเส้นโค้งซึ่งให้ได้ตามสมการ (8) ดังแสดงในภาพประกอบ 5

สำหรับรูปทรงกระบอกที่มีหลายชั้นตามภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การนำความร้อนผ่านรูปทรงกระบอกหลายชั้น (Chapman, 1974 : 50)

โดยใช้สมการ (10) พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังรูปทรงกระบอกแต่ละชั้นได้ดังนี้

สำหรับชั้นที่หนึ่ง

$$Q_1 = \frac{2\pi k_1 L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{หรือ} \quad T_1 - T_2 = \frac{Q_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}$$

ชั้นที่สอง

$$Q_2 = \frac{2\pi k_2 L (T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad \text{หรือ} \quad T_2 - T_3 = \frac{Q_2 \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L}$$

ชั้นที่สาม

$$Q_3 = \frac{2\pi k_3 L (T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad \text{หรือ} \quad T_3 - T_4 = \frac{Q_3 \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k_3 L}$$

จากสภาวะสม่ำเสมอจะได้ $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$ โดยที่

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k_3 L}} \quad (11)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการถ่ายเทของความร้อนตามแนวรัศมี

T_1 คือ อุณหภูมิที่ผนังด้านในของรูปทรงกระบอกชั้นที่หนึ่ง

T_2 คือ อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของรูปทรงกระบอกชั้นที่หนึ่ง

T_3 คือ อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของรูปทรงกระบอกชั้นที่สอง

T_4 คือ อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของรูปทรงกระบอกชั้นที่สาม

r_1 คือ รัศมีวงในของผนังรูปทรงกระบอกชั้นที่หนึ่ง

r_2 คือ รัศมีวงนอกของผนังรูปทรงกระบอกชั้นที่หนึ่ง

r_3 คือ รัศมีวงนอกของผนังรูปทรงกระบอกชั้นที่สอง

r_4 คือ รัศมีวงนอกของผนังรูปทรงกระบอกชั้นที่สาม

L คือ ความยาวของผนังรูปทรงกระบอก

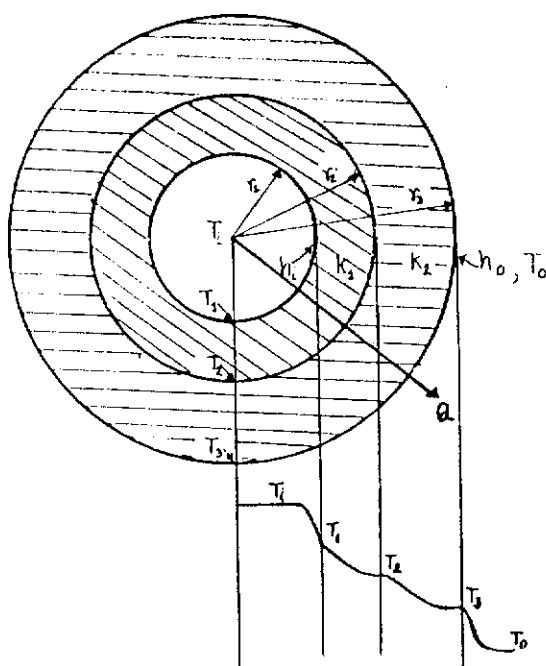
k_1 คือ ค่าสภาพนำความร้อนของท่อทรงกระบอกชั้นที่หนึ่ง

k_2 คือ ค่าสภาพนำความร้อนของท่อทรงกระบอกชั้นที่สอง

k_3 คือ ค่าสภาพนำความร้อนของท่อทรงกระบอกชั้นที่สาม

สมการ (11) ใช้คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีผ่านผนังรูปทรงกระบอกสามชั้นโดยทั่วไปในการใช้สมการหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน จะต้องพิจารณาถึงการพาความร้อนด้วย ในกรณีการถ่ายเทความร้อนจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำผ่านผนังซึ่งจะมีก็ชั้นก็ได้ความร้อนจะถ่ายเทจากของไหลมาสู่ผนังโดยการพาและถ่ายเทผ่านผนังแต่ละชั้นโดยการนำ แล้วถ่ายเทจากผิวของผนังชั้นสุดท้ายไปสู่ของไหลโดยการพา หากว่าเป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีสภาวะสม่ำเสมอ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวของผนัง และผนังแต่ละชั้นย่อมมีค่าเท่ากัน

กรณีผนังรูปทรงกระบอกหลายชั้น พิจารณาดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนังรูปทรงกระบอกหลายชั้นเมื่อมีการถ่ายเทความร้อน จากของไหลภายในท่อ มายังของไหลภายนอกท่อ (Simomson, 1967 : 26)

จากภาพประกอบ 7 เมื่อ T_i เป็นอุณหภูมิของของไหลภายในท่อ T_o เป็นอุณหภูมิของของไหลภายนอกท่อ โดย $T_i > T_o$ เราสามารถเขียนสมการสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลในท่อถึงของไหลนอกท่อได้ดังนี้

การพาความร้อนจากของไหลด้านในถึงผิวผนังด้านในท่อทรงกระบอกเป็น

$$Q = 2\pi r_1 L h_i (T_i - T_1) \quad \text{หรือ} \quad T_i - T_1 = \frac{Q}{2\pi r_1 L h_i}$$

การนำความร้อนผ่านผนังท่อชั้นแรกเป็น

$$Q = \frac{2\pi K_1 L (T_1 - T_2)}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \quad \text{หรือ} \quad T_1 - T_2 = \frac{Q \ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi K_1 L}$$

การนำความร้อนผ่านผนังท่อชั้นที่สอง

$$Q = \frac{2\pi K_2 L (T_2 - T_3)}{\ln(\frac{r_3}{r_2})} \quad \text{หรือ} \quad T_2 - T_3 = \frac{Q \ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi K_2 L}$$

การพาความร้อนจากผิวนอกของท่อถึงของไหลด้านนอก

$$Q = 2\pi r_3 L h_o (T_3 - T_o) \quad \text{หรือ} \quad T_3 - T_o = \frac{Q}{2\pi r_3 L h_o}$$

เมื่อรวมทั้ง 4 สมการเข้าด้วยกันจะได้ว่า

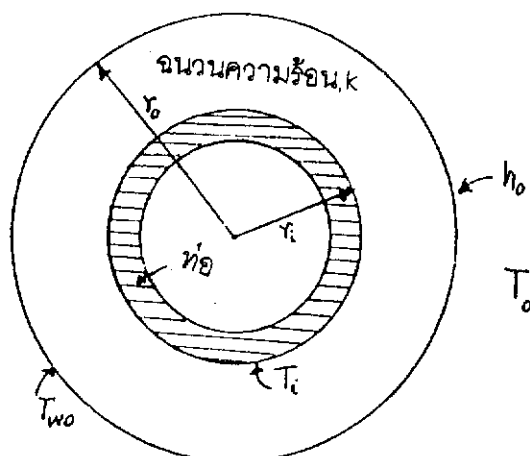
$$T_i - T_o = Q \left[\frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi K_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_o} \right]$$

และได้
$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi K_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_o}} \quad (12)$$

สมการ (12) ใช้คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีของท่อทรงกระบอกที่มีผนังหลายชั้นโดยที่มีการถ่ายเทความร้อนจากของไหลภายในท่อไปยังของไหลภายนอกท่อ

ความหนาวิกฤติของฉนวน(Critical thickness of insulation)

ในการศึกษาสมการของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ทำให้ทราบว่าการลดอัตราการสูญเสียความร้อนโดยเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อนขึ้น ก็คือเพิ่มค่าของ r_o ดังแสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงท่อที่มีรัศมีวงนอก r_i หุ้มด้วยฉนวนความร้อนที่มีรัศมีภายนอก r_o

(Chapman, 1974 : 65)

จากภาพประกอบ 8 พิจารณาการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวท่อที่มีอุณหภูมิ T_i มาสู่อากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิ T_o การนำความร้อนจากรัศมี r_i ถึง r_o เราเขียนสมการได้เป็น

$$Q = \frac{2\pi KL(T_i - T_{wo})}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad \text{หรือ} \quad T_i - T_{wo} = \frac{Q \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi KL}$$

การพาความร้อนจากผิวออกสู่อากาศภายนอกมีสมการเป็น

$$Q = 2\pi r_o L h (T_{w_o} - T_o) \text{ หรือ } T_{w_o} - T_o = \frac{Q}{2\pi r_o h L}$$

รวมสมการทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วแก้สมการหาค่า Q จะได้

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_o L h} + \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi K L}} \quad (13)$$

จากสมการ (13) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อน หรือค่าของ r_o จะทำให้ค่าของ $\ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ เพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้ค่าของ $1 / 2\pi r_o L h$ ลดลง ดังนั้น $1 / 2\pi r_o L h + \ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ จึงอาจไม่เพิ่มขึ้น และค่า Q อาจจะไม่ลดลงก็ได้เมื่อเราเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อน หรือค่าของ r_o

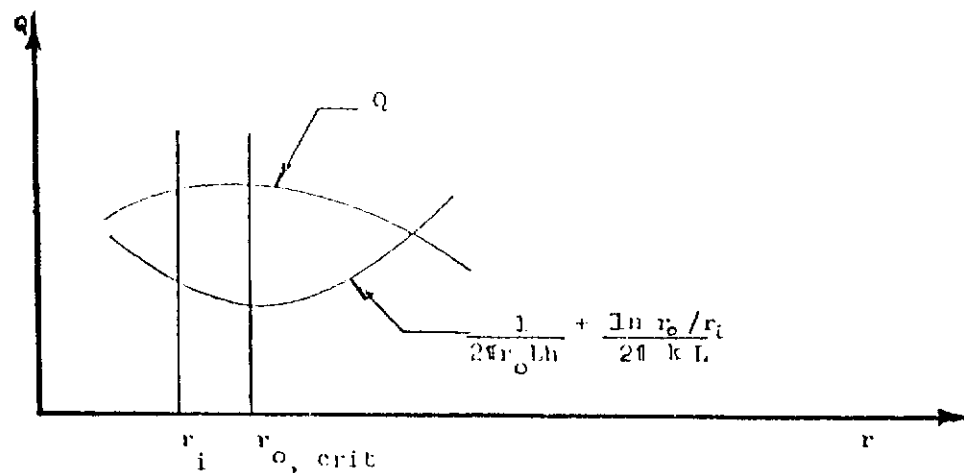
สมการ (13) แสดงให้เห็นว่า Q จะมีค่ามากที่สุด เมื่อ $1 / 2\pi r_o L h + \ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ มีค่าน้อยที่สุด ในการที่จะหาเงื่อนไขที่ทำให้ $1 / 2\pi r_o L h + \ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ มีค่าน้อยที่สุด ต้องดิฟเฟอเรนเชียล $1 / 2\pi r_o L h + \ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ แล้วให้ผลที่ได้เท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ได้เงื่อนไขที่จะให้ $1 / 2\pi r_o L h + \ln(r_o / r_i) / 2\pi K L$ มีค่าน้อยที่สุด

$$\frac{d}{dr_o} \left[\frac{1}{2\pi r_o L h} + \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi K L} \right] = 0$$

$$-\frac{1}{2\pi r_o^2 L h} + \frac{1}{2\pi r_o L K} = 0$$

$$r_o = 0 \text{ หรือ } r_o, \text{ crit} = 0 \quad (14)$$

โดยที่ $r_{0, \text{crit}}$ คือ r_0 ในกรณีที่ทำให้ Q ในสมการ (13) มีค่ามากที่สุดเรียกว่ารัศมีวิกฤติ (Critical radius)
 เมื่อเราเขียนกราฟระหว่างค่าของ Q และ $1/2\pi r_0 Lh + \ln(r_0/r_i)/2\pi KL$ กับ r_0 จะได้
 กราฟดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การเปลี่ยนแปลงของ Q และ $1/2\pi r_0 Lh + \ln(r_0/r_i)/2\pi KL$ กับ r_0

(Simonson. 1967 : 29)

จากภาพประกอบ 9 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มความหนาแน่นของฉนวนความร้อนขึ้นหรือเพิ่มค่า r_0 จะไม่ทำให้ค่าของ Q ลดลงเสมอไป ในบางกรณี Q อาจเพิ่มขึ้นก็ได้ ดังนั้น เราจะต้องแน่ใจว่า ฉนวนความร้อนที่เราใช้หนากว่า k/h นั่นคือ เมื่อ $r_0 > k/h$ แล้ว Q จะมีค่าลดลงเสมอ แต่อย่างไรก็ตามในบางครั้งเราจะพบว่าค่าของ k/h ที่ได้น้อยกว่า r_i ซึ่งแสดงว่าในกรณีนี้จะไม่มีความหมายของ $r_{0, \text{crit}}$ นั่นแสดงว่า เมื่อเราเริ่มใช้ฉนวนความร้อนค่าของการถ่ายเทความร้อนจะลดลงทันที

หลักการออกแบบและการสร้างเตา (Olsen. 1982 : 235-245)

ในการออกแบบสร้างเตาไฟฟ้าต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของเตาในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปแล้วจะต้องรู้ค่าจุดหลอมเหลวของสารที่ต้องการจะปลูกผลึกว่ามีค่าเท่าใด จะได้ใช้เป็นตัวกำหนดอุณหภูมิภายในของเตา ซึ่งอุณหภูมิของเตาควรจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 2-10% เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนที่อาจเกิดขึ้นได้

2. ลวดความร้อน(Heater) ในการสร้างเตาไฟฟ้า การเลือกใช้ลวดความร้อนจะต้องเลือกลวดความร้อนที่สามารถทนต่ออุณหภูมิได้มากกว่าอุณหภูมิใช้งานของเตา นอกจากนั้นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติเฉพาะของลวดความร้อนแต่ละชนิดซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทาน จุดหลอมเหลว และคุณสมบัติการทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation)กับบรรยากาศ

3. ผนังเตา สำหรับวัสดุที่นำมาสร้างเป็นผนังเตาต้องคำนึงถึงอุณหภูมิการใช้งานเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของเตาโดยจะใช้วัสดุที่มีอายุการใช้งานนานๆและจะต้องทนความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุที่จะใช้ในการปลูกผลึก

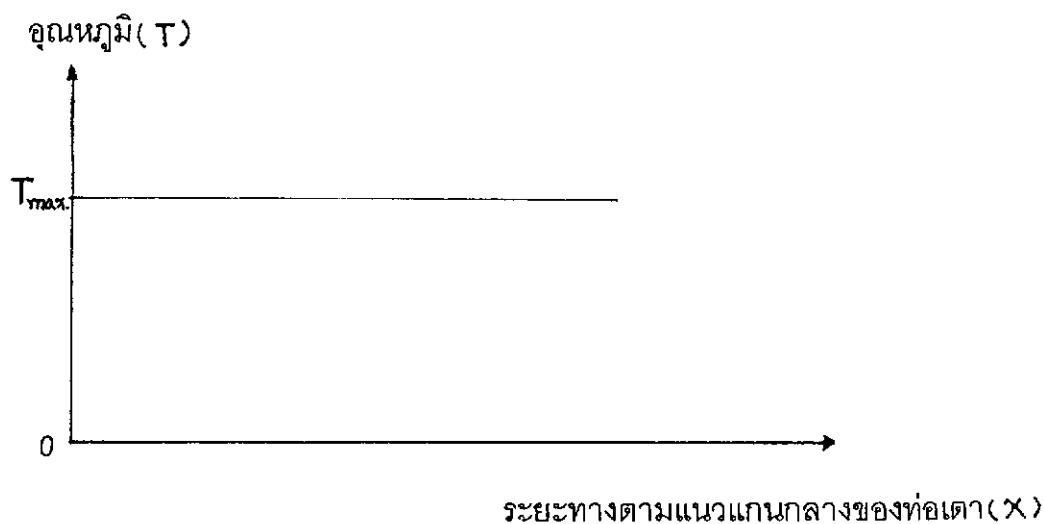
4. ฉนวนความร้อน ถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงเพราะจะเป็นตัวช่วยให้เกิดการเก็บกักความร้อนไว้ได้นานๆและมีการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอกได้น้อยที่สุดลักษณะของฉนวนความร้อนที่ดีจะต้องมีลักษณะเป็นยุ่นุ่นคล้ายสำลีหรือสีกหลาด หรือมีลักษณะเป็นผงฝุ่นที่อัดตัวเป็นก้อนซึ่งมีความเปราะและมีรูพรุนอยู่มากมายที่สำคัญคือมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำมากๆ

5. กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเตา โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนจะต้องสามารถให้ความร้อนได้ในระดับอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าค่าอุณหภูมิที่ต้องการทั้งนี้เพื่อชดเชยความร้อนบางส่วนที่เกิดการสูญเสียไปสำหรับอุณหภูมิที่ต้องการเราสามารถควบคุมได้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัวตรวจวัด เมื่ออุณหภูมิเกินระดับที่กำหนดเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะตัดวงจรกระแสไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิลดลง

เกรเดียนท์อุณหภูมิ(Temperature gradient) (Druburah 1987 : 145)

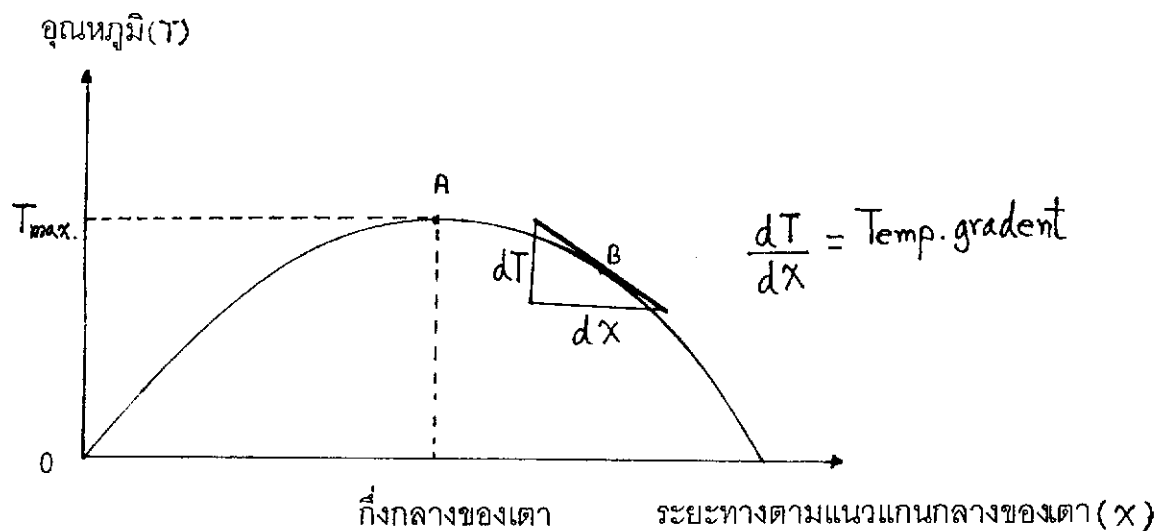
เกรเดียนท์อุณหภูมิ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับระยะทาง โดยทั่วไปแล้วสำหรับเตาที่มีผนังตัวเตายาวมากๆและมีฉนวนหุ้มแบบอุดมคติ (ไม่มีการสูญเสียปริมาณ

ความร้อนตามความยาวของท่อเตาและตามแนวรัศมีของท่อเตา) เกรเดียนท์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกนกลางของเตาจะคงตัว ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางตามแนวแกนกลางของท่อเตาเมื่อผนังเตายาวมากและมีจนวนแบบอุดมคติหุ้มอยู่ (Dryburgh, 1987 : 145)

แต่ในทางปฏิบัติไม่มีจนวนแบบอุดมคติและความยาวของท่อเตามีขอบเขตจำกัดจึงต้องมีการสูญเสียความร้อนทั้งในแนวรัศมีทรงกระบอกและด้านปลายทั้งสองของทรงกระบอก ดังนั้น ความร้อนส่วนหนึ่งจะถ่ายเทออกทางตอนหัวและท้ายของปลายท่อเตามีผลทำให้อุณหภูมิที่บริเวณตอนปลายท่อเตาทั้งสองข้างต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางของเตา ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางตามแนวแกนกลางของเตาสำหรับเตาทั่วไป (Dryburgh, 1987 : 147)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อิติณัย แก้วแดง (2530) ได้ศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ โดยได้สร้างเตาหลอมผลึกโซนเดียวแบบบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ตามแนวนอน ตัวผนังเตาทำด้วยท่อมูนไลท์คอร์ (Moonlite core) พื้นด้านนอกด้วยลวดแคนดัล มีแผ่นใยเซรามิกเป็นฉนวนความร้อนบรรจุอยู่ในกล่องอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า อุณหภูมิสูงสุดภายในเตา 1,200 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้โดยไม่ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการสร้างเตา กล่าวคือสร้างเตาเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงพอสำหรับการหลอมเป็นสำคัญ

อารีย์ วิเชียรฉาย และคณะ (2532) ได้สร้างเตาอุณหภูมิสูงเพื่อศึกษาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสร้างเตาลักษณะทรงกระบอกแบบโซนเดียวที่มีอุณหภูมิใช้งานภายในเตา 1,500 องศาเซลเซียส ผนังเตาทำจากท่ออลูมินา (Alumina tube) บริเวณโซนร้อนของเตาใช้แก๊สเป็นตัวควบคุมบรรยากาศ โดยที่แก๊สทั่วไปมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำยกเว้นไฮโดรเจนและฮีเลียม สำหรับลวดความร้อนที่ใช้เป็นประเภท Molybdenum Disilicide (MoSi_2) รุ่น SMU125 ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิสูง

ถึง 1,650 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของเตาใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของเตา ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเลือกใช้วัสดุในการทำเตาและวงจรในการควบคุมอุณหภูมิเป็นสำคัญ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ (2533) ได้สร้างเตาเผาพลอย ที่มีอุณหภูมิสูงสุดภายในเตา 1,600 องศาเซลเซียส รูปแบบของเตาเป็นรูปลูกบาศก์ภายในเตาทำด้วยซิเมนต์ทนความร้อน มีฉนวนกันความร้อนทำด้วยแผ่นใยเซรามิก สำหรับผนังด้านนอกเตาหุ้มด้วยแผ่นสแตนเลส ในส่วนของขดลวดความร้อนใช้ลวดความร้อนสำเร็จรูปด้วย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทแคนดัล ประเทศสวีเดน ในการทำงาน ofเตาจะมีเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิสำเร็จรูปซึ่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการพิจารณาเลือกวัสดุที่ใช้ทำเตาเป็นสำคัญเพื่อใช้ในการเผาพลอยที่ต้องการอุณหภูมิภายในเตาสูง

บทที่ 3
อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเตาปลูกผลึกโซลิตเดียว

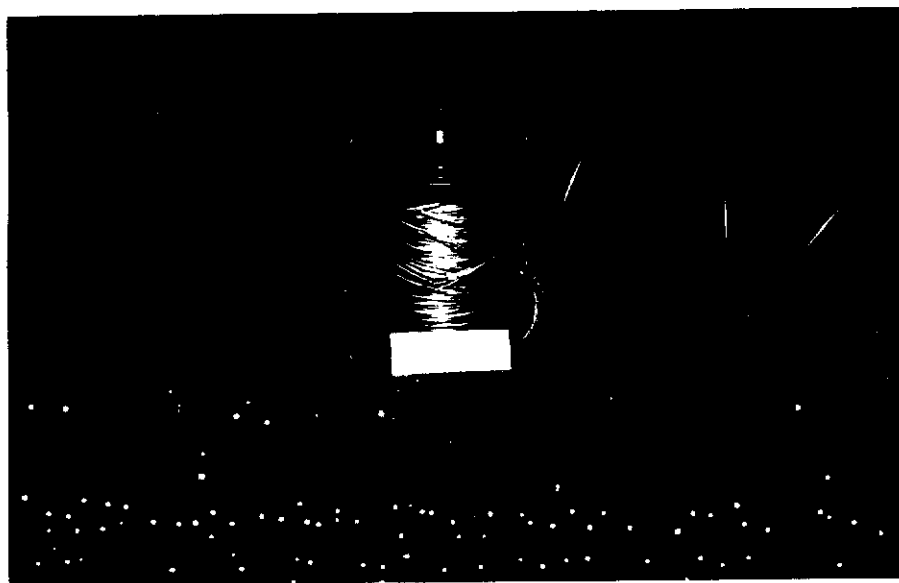
1.1.1 ท่ออลูมินา (Alumina) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.6 เซนติเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.3 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม ปริมาตรภายในท่ออลูมินา 871.32 ลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,600 องศาเซลเซียส ใช้เป็นผนังเตา



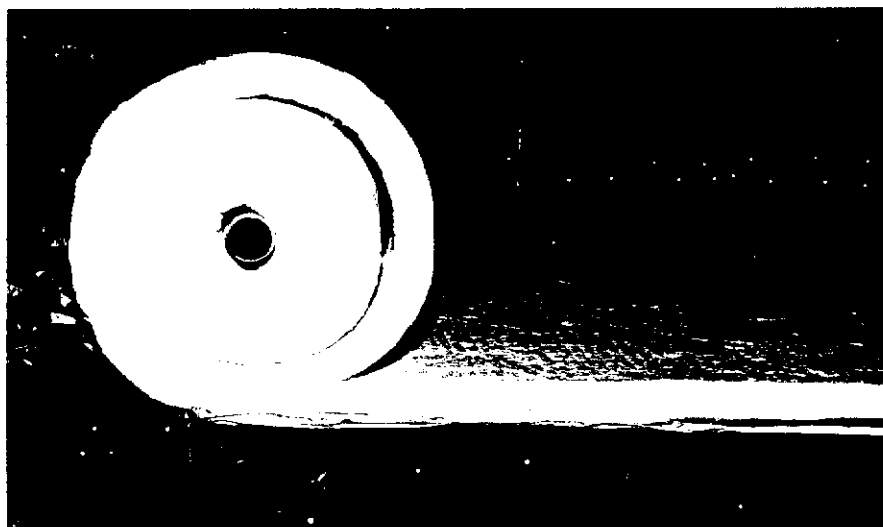
ภาพประกอบ 12 ท่ออลูมินาที่ใช้ทำผนังเตา

1.1.2 ลวดความร้อน (Heater) ใช้ลวดแคนดัล-เอเอฟ (Kanthal-AF) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร มีความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเป็น 1.78 โอห์มต่อเมตร ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,350 องศาเซลเซียส ใช้พันรอบท่ออลูมินาเพื่อเป็นแหล่งผลิตความร้อน



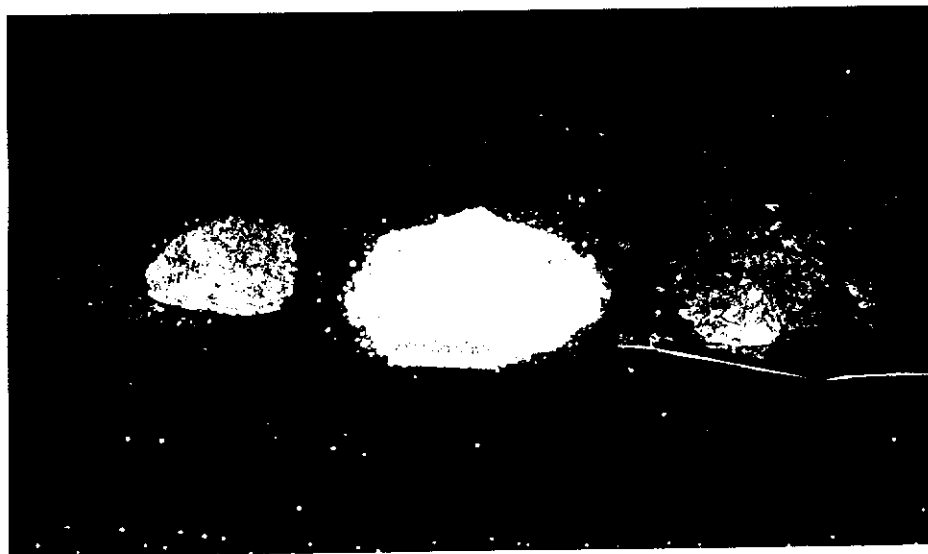
ภาพประกอบ 13 ลวดแคนดัล-เอเอฟ

1.1.3 แผ่นใยเซรามิก (Ceramic fiber) อุณหภูมิใช้งาน 1,260 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อน 0.05 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ใช้เป็นฉนวนสำหรับการป้องกันการสูญเสียความร้อน



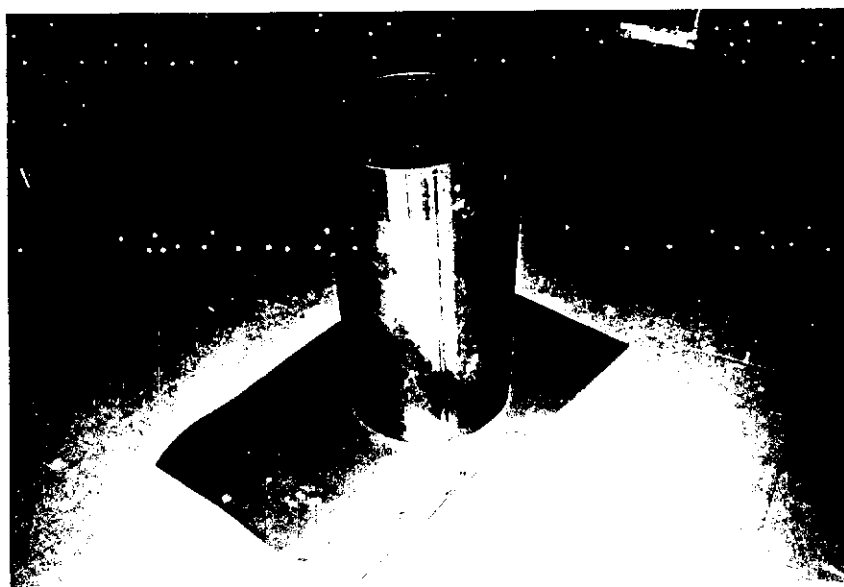
ภาพประกอบ 14 แผ่นใยเซรามิกแบบผืนผ้า

1 1.4 คอนกรีตทนไฟ 16 (C-16) ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,600 องศาเซลเซียสใช้หล่อประกอบผนังด้านนอกของท่ออลูมินาเพื่อให้เป็นร่องกันระหว่างลดความร้อนที่พันรอบท่อ และใช้หล่อเป็นฝาด้านข้างของตัวเตา



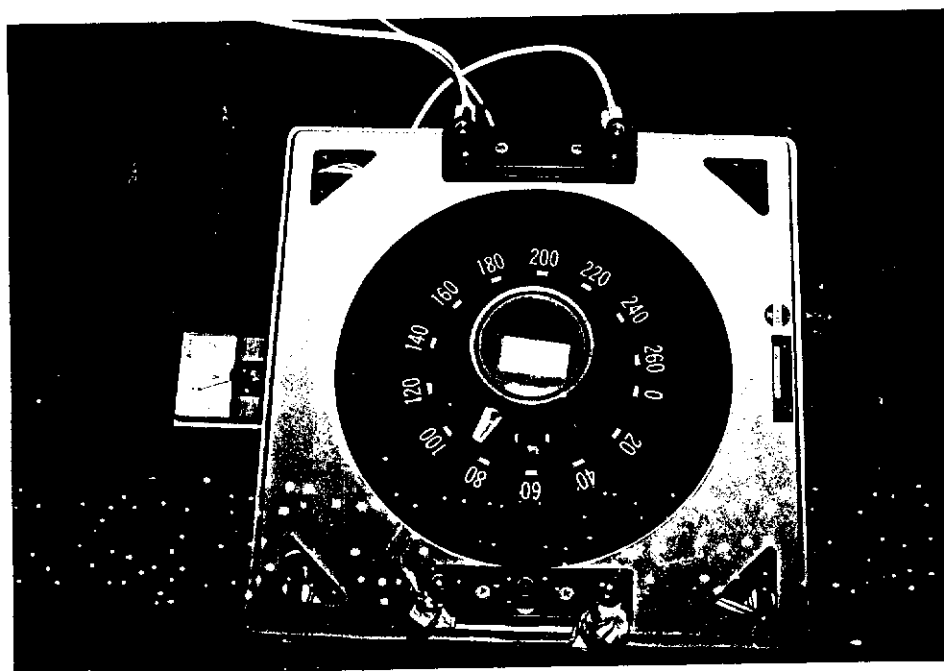
ภาพประกอบ 15 คอนกรีตทนไฟ 16 (C-16)

1 1.5 แผ่นสแตนเลสหนา 1 มิลลิเมตร ใช้เป็นผนังด้านนอกของตัวเตา โดยม้วนให้เป็นท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร



ภาพประกอบ 16 ผนังด้านนอกของเตาทำจากแผ่นสแตนเลส

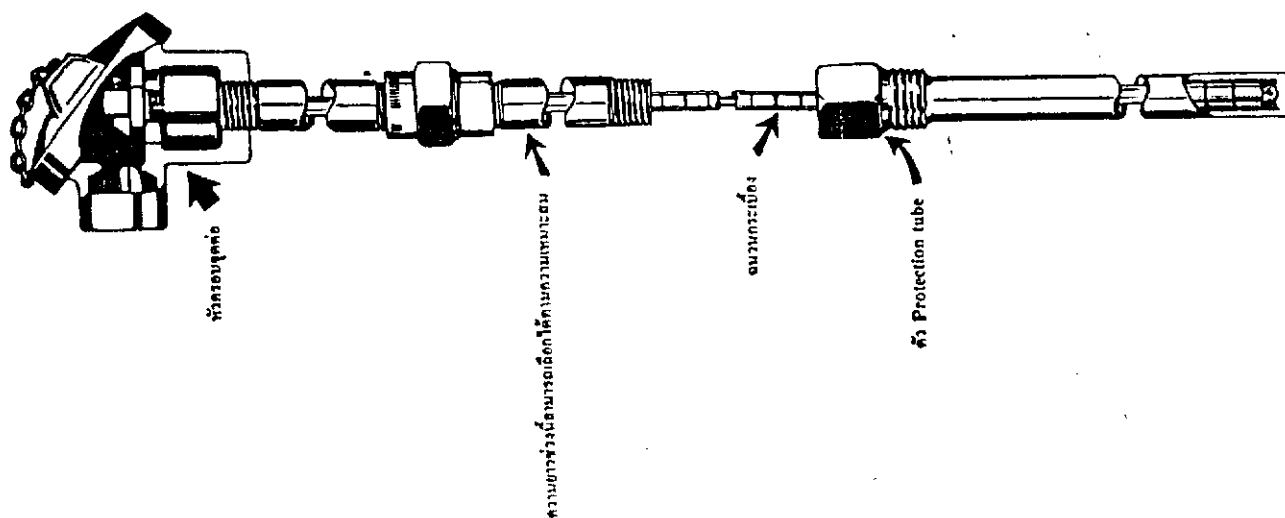
1.1.6 เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Variac) สำหรับปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับ ขดลวดความร้อน โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 5,200 วัตต์ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้า 260 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์ โดยมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เลือกใช้ได้จาก 0 ถึง 260 โวลต์



ภาพประกอบ 17 เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บและรวบรวมข้อมูล

1.2.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type R (Pt13%) สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเตา
 เทอร์โมคัปเปิล แบบ R สายบวกทำจากแพลตินัม สายลบทำจากแพลตินัม 87 % + โรเดียม 13 %
 สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1,768 องศาเซลเซียส อุณหภูมิใช้งาน -50 ถึง 1,738 องศาเซลเซียส
 แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ -2.26 ถึง 21.108 มิลลิโวลต์ เหมาะสมกับการใช้งานในบรรยากาศออกซิเดชัน
 (Oxidation) และบรรยากาศแก๊สเฉื่อย (Inert gas)

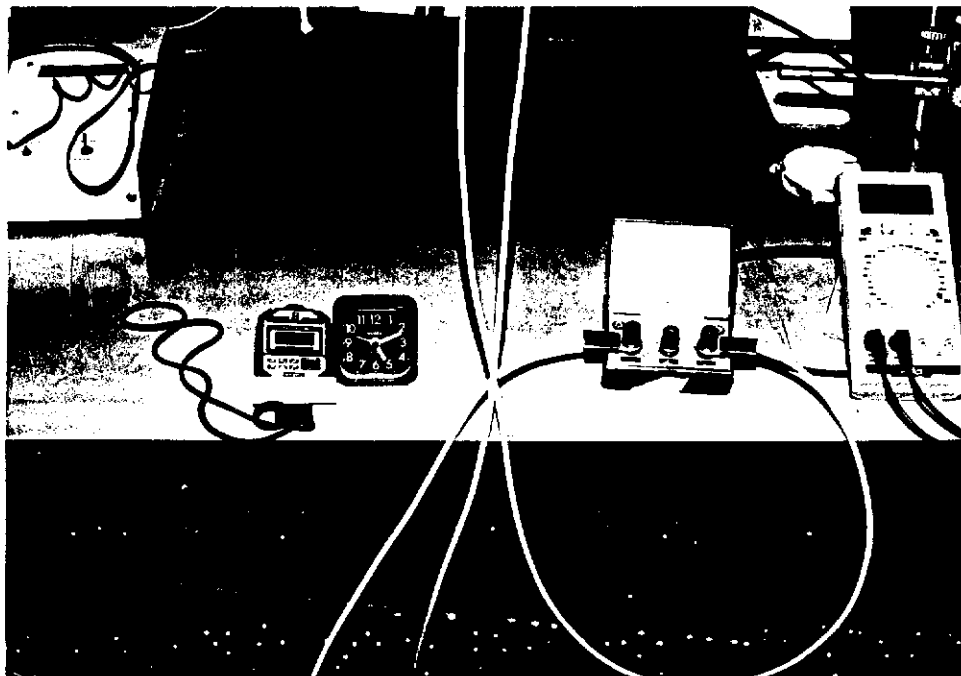


ภาพประกอบ 18 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล

1.2.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ใช้วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากสายของเทอร์โมคัปเปิลในหน่วยมิลลิโวลต์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตารางความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิเพื่อให้อ่านค่าอุณหภูมิได้ถูกต้อง (ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิได้จากภาคผนวก ง)

1.2.3 แอมมิเตอร์กระแสสลับ ชนิด 10 แอมแปร์เพื่อใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดความร้อนของเตาปลุกผลึกโซนเดียว

1.2.4 นาฬิกาจับเวลา เพื่อใช้วัดช่วงเวลาในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและแรงเคลื่อนไฟฟ้า



ภาพประกอบ 19 นาฬิกาจับเวลา แอมมิเตอร์กระแสลับ และดิจิตอลมัลติมิเตอร์

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์

2.1.1 วิเคราะห์ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเตาทั้งลักษณะประเภท และจุดประสงค์การใช้งาน

2.1.2 ออกแบบและสร้างเตาปลุกผลึกโซนเดียวด้วยวิธีการหลอมสารโดย

2.1.2.1 กำหนดอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาที่ต้องการซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการให้เตามีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งาน 1,200 องศาเซลเซียส เพื่อให้ปลุกผลึกสารที่ใช้ส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส

2.1.2.2 กำหนดวัสดุที่ใช้ในการสร้างเตาโดยพิจารณาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ นั้นๆ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 1.1

2.1.2.3 หาความหนาวิกฤติของฉนวนจากคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกใช้เพื่อกำหนดรูปแบบของเตาโดยใช้สมการ (14)

$$r_{o,cm} = k/h$$

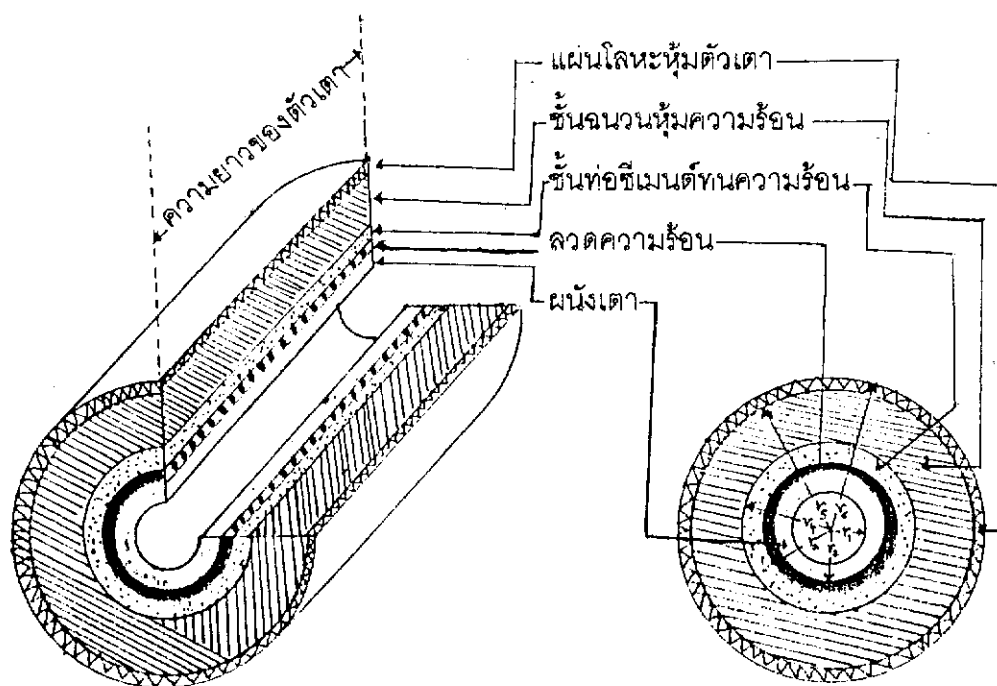
โดยที่ k คือ ค่าสภาพนำความร้อนของฉนวนที่ใช้หุ้มท่อเตา สำหรับแผ่นใยเซรามิกที่เราเลือกใช้มีค่า 0.05 W/mk

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (การพาโดยธรรมชาติเมื่อของไหลเป็นอากาศ)
 $= 6 \text{ W/m}^2 \text{ k}$

เมื่อนำ k และ h ไปแทนค่าจะได้ $r_{o,cm} = 0.0083 \text{ m}$ จากค่า $r_{o,cm}$ ที่คำนวณได้ทำให้ทราบ ว่าถ้าความหนาของแผ่นใยเซรามิกที่เราเลือกใช้เป็นฉนวนกันความร้อนมีค่าเท่ากับรัศมีวิกฤติคือ 0.0083 m ค่าอัตราการสูญเสียความร้อนจะมีค่ามากที่สุด

ดังนั้นในการออกแบบสร้างเตาปลูกผลึก เราจะต้องกำหนดความหนาของฉนวนกันความร้อนให้มีค่ามากกว่า 0.0083 เมตร จะทำให้อัตราการสูญเสียความร้อนมีค่าลดลง ยิ่งค่าความหนาของฉนวนกันความร้อนมีค่ามาก ๆ อัตราการสูญเสียความร้อนก็จะยิ่งลดลงมาก แต่จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมด้านขนาดของเตาและราคาของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนด้วย

2.1.2.4 ออกแบบโครงสร้างของเตาปลูกผลึกโซนเดียวโดยคำนึงถึงสัดส่วนที่เหมาะสมตรงตามจุดประสงค์การใช้งานซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้ผนังเตาทำจากท่ออลูมินาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.3 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ผนังด้วยลวดแคนดัล-เอเอฟแล้วหุ้มด้วยแผ่นใยเซรามิก นำไปบรรจุในโครงเตาทรงกระบอกที่ทำจากสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 30 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 ภาคตัดขวางตัวเตาปลุกผลึกโซเดียมเดียวแสดงชั้นของการวางวัสดุที่ใช้ประกอบเป็นเตา

2.1.2.5 คำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนของเตาโดยใช้สมการ (13)

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_o L h} + \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi K L}}$$

โดยที่ T_i คือ อุณหภูมิที่ผิวท่ออลูมินา = 1,200 องศาเซลเซียส

T_o คือ อุณหภูมิของอากาศที่สัมผัสกับฉนวนกันความร้อน = 30 องศาเซลเซียส

r_o คือ รัศมีของฉนวนนอกฉนวนกันความร้อน = 15 เซนติเมตร

r_i คือ รัศมีภายนอกของท่ออลูมินา = 2.8 เซนติเมตร

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยธรรมชาติเมื่อของไหลเป็นอากาศ = 6 W/m²k

K คือ ค่าการนำความร้อนของแผ่นใยเซรามิก = 0.05 W/mk

L คือ ความยาวของท่อเตา = 60 เซนติเมตร

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (13) จะได้อัตราการสูญเสียความร้อนของตัวเตามีค่าเป็น 126.9 วัตต์ แสดงว่าค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไปในแนวรัศมีของเตาปลุกผลึกมีค่า 126.9 วัตต์ ดังนั้นในการให้พลังงานแก่เตาจะต้องชดเชยความร้อนในส่วนที่สูญเสียไปด้วย

2.1.2.6 คำนวณความยาวของเส้นลวดความร้อนที่เลือกใช้ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่ให้กับลวดความร้อน แล้วทำให้เตามีอุณหภูมิภายในตามที่เรากำหนด (Olsen. 1982 : 243)

ในงานวิจัยนี้เราใช้ลวดความร้อนที่ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,350 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านทานที่ 20 องศาเซลเซียส เป็น 1.78 โอห์มต่อเมตรโดยเส้นผ่านศูนย์กลางลวดมีขนาด 1.0 มิลลิเมตร จาก

$$R_t = R (1 + \alpha T) \quad (15)$$

เมื่อ R_t คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ที่อุณหภูมิ t ใด ๆ

R คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสสำหรับลวด แคนดัล - เอเอฟ มีค่า 1.78 โอห์มต่อเมตร

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของความต้านทาน (Temperature coefficient of resistance)

มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งสำหรับลวดความร้อนแคนดัล- เอเอฟ นี้มีค่า

$$3.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} \text{ ที่ } -20 \text{ ถึง } 1,000 ^\circ\text{C}$$

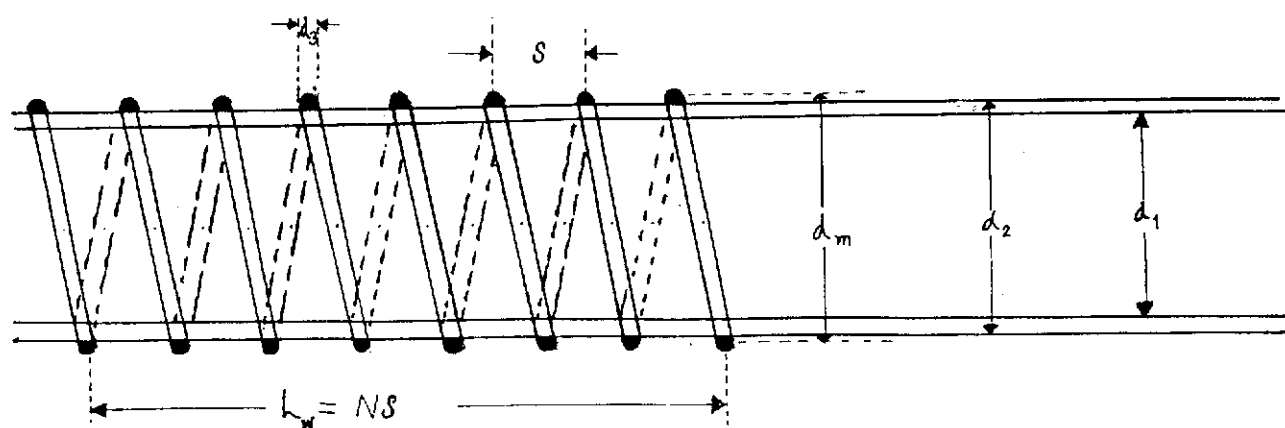
ในงานวิจัยนี้ต้องการปลุกผลึกที่ใช้อุณหภูมิภายในเตา 1,200 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิของเตาควรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ 2 - 10 % นั่นคืออุณหภูมิควรอยู่ในช่วง 1,224 - 1,320 $^\circ\text{C}$ เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้น

$$\text{ดังนั้น } R_{1,320 \text{ } ^\circ\text{C}} = 1.84 \Omega/\text{m}$$

สำหรับแหล่งจ่ายไฟเราใช้เครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 5,200 วัตต์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 20 แอมแปร์

สำหรับงานวิจัยนี้เราต้องการทำให้ลวดความร้อนที่ใช้สามารถรับกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2,000 วัตต์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์ เราต้องใช้กระแสไฟฟ้า = 9.09 แอมแปร์ ซึ่งต้องใช้ลวดความร้อนที่มีความต้านทาน (R) = 24.2 โอห์ม โดยคิดเป็นความยาวลวดความร้อนได้เป็น 13.2 เมตร

2.1.2.7 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดที่พันและรูปแบบการพันลวดความร้อน



ภาพประกอบ 21 การพันลวดความร้อนรอบท่ออลูมินาโดยมีระยะของการพันสม่ำเสมอ

จากภาพประกอบ 21 L_w คือ ความยาวของขดลวดเกลียวมีหน่วยเป็นเมตร

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

S คือ ระยะระหว่างรอบ

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่ออลูมินา

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่ออลูมินา

d_3 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดความร้อน

d_m คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของการพันขดลวด

โดยที่ $d_1 = 0.043 \text{ m}$, $d_2 = 0.056 \text{ m}$, $d_3 = 0.001 \text{ m}$, $L_w = 0.55 \text{ m}$

จะได้ $d_m = d_2 + d_3 = 0.057 \text{ m}$

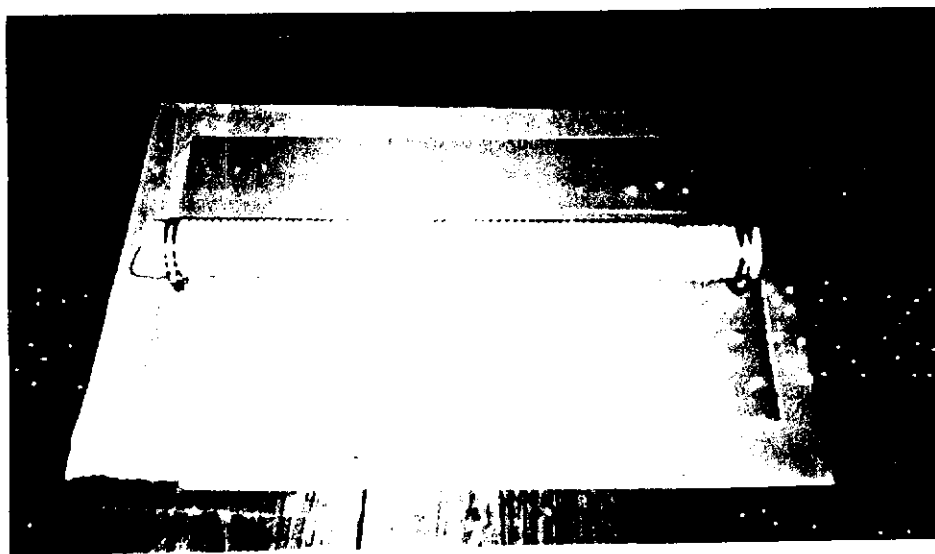
พันลวดความร้อน 1 รอบใช้ลวดยาว $= \pi d_m = 0.179 \text{ m}$

เมื่อความยาวของลวดทั้งหมด (L) $= \pi d_m N$ ได้ $N = 74$ รอบ

และได้ระยะระหว่างรอบของลวด (S) $= 7.4$ มิลลิเมตร

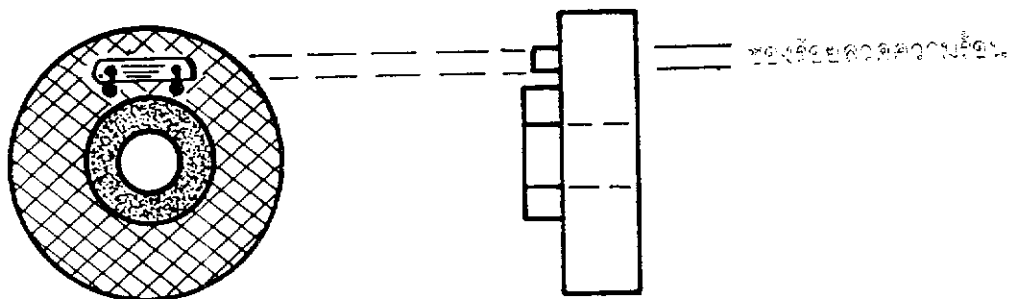
2.1.2.8 ประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามที่ออกแบบไว้ตามลำดับดังนี้

- เตรียมร่องพันลวดความร้อนบนท่ออลูมินา โดยใช้สายไฟที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นลวดความร้อนพันรอบท่อให้เป็นเกลียวสม่ำเสมอตามจำนวนรอบที่คำนวณได้ถึง 74 รอบ แล้วยึดหัว-ท้ายสายไฟให้แน่นด้วยเข็มขัดรัดท่อโดยเว้นระยะหัวและท้ายไว้ข้างละ 2.5 เซนติเมตร และนำคอนกรีตทนไฟเบอร์ 16 ผสมน้ำตามอัตราส่วนมาพอกระหว่างร่องสายไฟให้มีความหนาเสมอสายไฟทั้งไว้ พอกคอนกรีตทนความร้อนเริ่มแห้งให้ค่อยๆดึงสายไฟที่พันเป็นเกลียวออกจะได้ ท่อเตาที่มีร่องตามต้องการ จากนั้นจึงจัดการบ่มและตากให้แห้งตามรายละเอียดในภาคผนวก ก



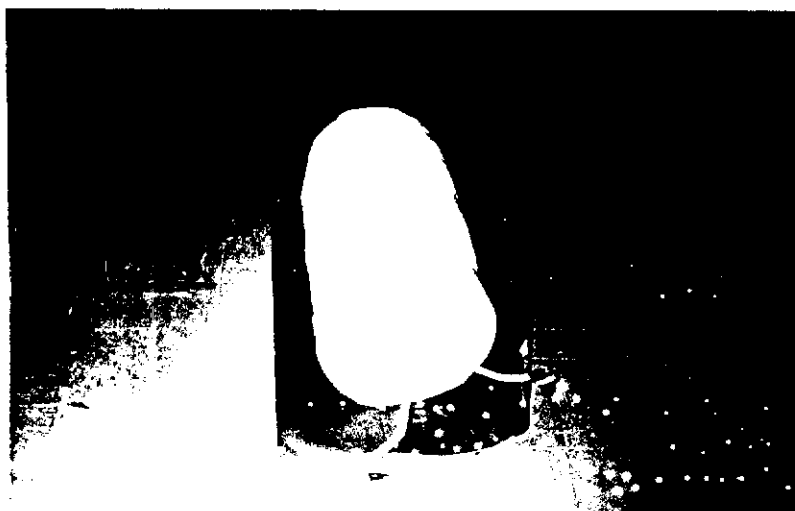
ภาพประกอบ 22 การพันลวดความร้อนบนท่ออลูมินา

- หล่อฝาประกบด้านข้างของเตาทั้งหน้าเตาและหลังเตาดัวคอนกรีตทนไฟเบอร์ 16



ภาพประกอบ 23 ฝาประกบด้านข้างของเตา

- พันลวดความร้อนตามร่องที่หล่อไว้ โดยรัดหัวท้ายให้แน่นด้วยลวดความร้อนที่พันเป็นเกลียว
- ร้อยหัวและท้ายของลวดความร้อนด้วยลูกบิดกระเบื้องทนความร้อน
- ตัดแผ่นใยเซรามิกให้ได้ขนาดตามต้องการแล้วพันรอบผนังท่อเตา โดยพันให้แน่นรัดด้วยลวดความร้อนนำไปบรรจุในโครงสร้างเตาที่ทำจากสแตนเลส

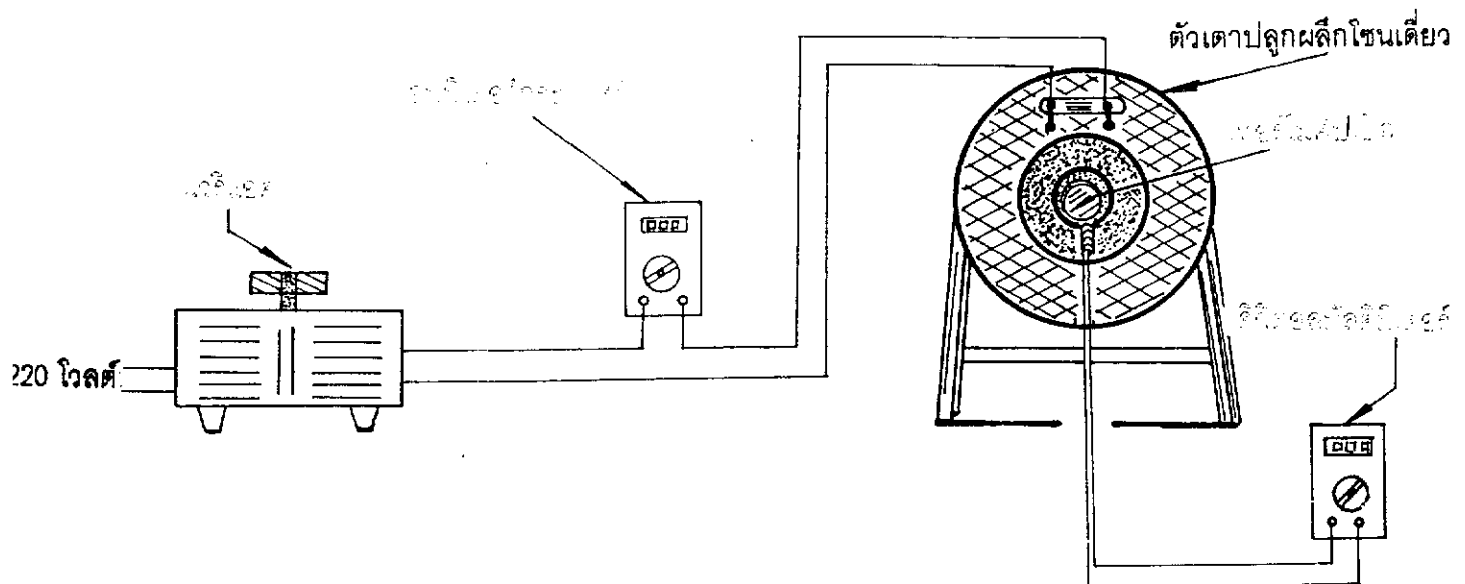


ภาพประกอบ 24 การพันแผ่นใยเซรามิกรอบท่อเตา



ภาพประกอบ 25 การบรรจุท่อเตาที่พันด้วยแผ่นใยเซรามิกลงในท่อนสแตนเลส

- ปิดหัวท้ายของตัวเตาด้วยฝาประกอบที่เตรียมไว้ยึดให้แน่นด้วยน็อต แล้วต่อสายลวดความร้อนทั้งสองปลายกับจุดต่อที่ทำจากกระเบื้องทนความร้อน
- ต่อสายไฟจากเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้ากับตัวเตาแล้วประกอบเครื่องมือวัดเข้ากับตัวเตา ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเตาปลุกผลึกโซนเดียว



ภาพประกอบ 27 เตาปลุกผลึกโซนเดียวที่สร้างเสร็จแล้ว

2.1.3 ขั้นตอนการทดลองวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าในสถานะสมดุลและวัดค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิตามแนวแกนของเตาที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดต่างๆ กัน

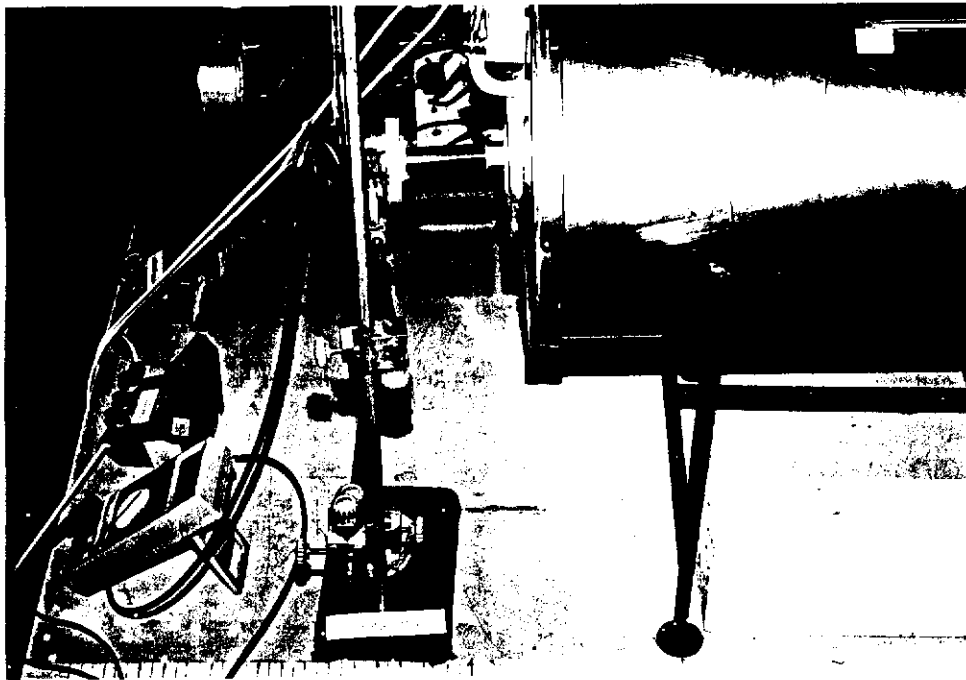
2.1.3.1 การอุ่นเตา ใส์เทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในท่อเตาโดยให้หัววัดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเตาพอดีปรับแวลวเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าโวลต์ต่ำแล้วค่อยอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่ต่อออกมาจากเทอร์โมคัปเปิลนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ไปเปรียบเทียบในตารางความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิ (ดังภาคผนวก ๑) เพื่ออ่านค่าและบันทึกอุณหภูมิ

ในการเปิดเครื่องครั้งแรกจะต้องอุ่นเตาเพื่อไล่ไอน้ำที่อยู่ในท่อเตาออกโดยปรับแวลวแอคเพื่อทำให้อุณหภูมิคงที่ที่ 100 องศาเซลเซียสใช้เวลา 2 ชั่วโมง เพิ่มอุณหภูมิเป็น 250 องศาเซลเซียสและรักษาอุณหภูมิที่ระดับนี้ไว้ 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิในอัตราการเพิ่ม 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการซึ่งในการเพิ่มอุณหภูมิจะใช้วิธีปรับเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

สำหรับการลดอุณหภูมิควรปรับอุณหภูมิให้ลดลงอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้มีผลต่อลวดความร้อนในกรณีที่อุณหภูมิภายในเตาส่ง ๆ (500 °C ขึ้นไป)

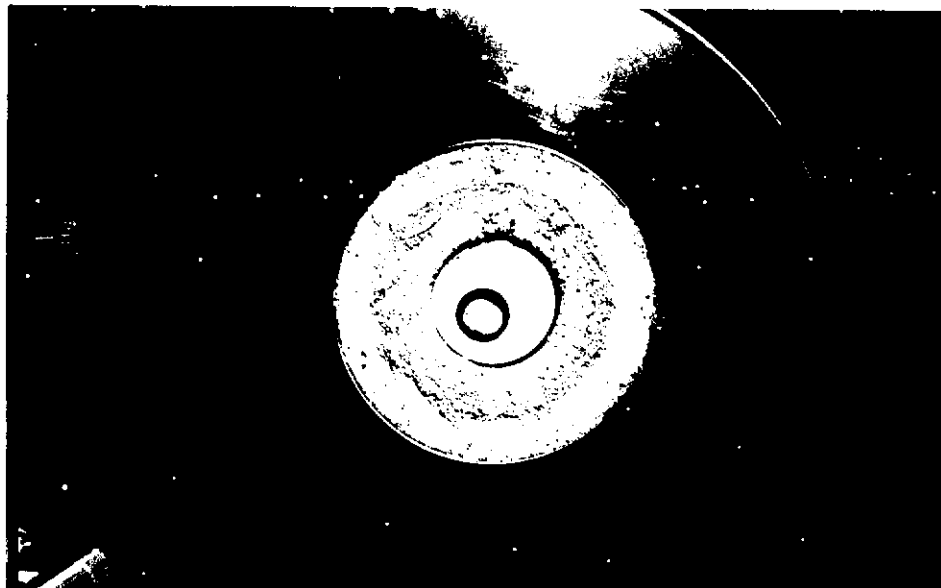
2.1.3.2 วัดค่าอุณหภูมิภายในเตาที่สัมพันธ์กับความต่างศักย์ไฟฟ้าในสถานะสมดุลโดยปรับค่าต่าง ๆ คือ 20, 40 , 60 , 80 และ 100 โวลต์ สังเกตค่าอุณหภูมิที่คงที่ สำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแต่ละค่า บันทึกไว้

2.1.3.3 ปรับให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาตามแนวนอนคงที่ที่ค่าต่างๆ คือ 500, 600 , 700 , 800 , 900 , 1,000 , 1,100 และ 1,200 องศาเซลเซียส แล้วเลื่อนหัววัดของเทอร์โมคัปเปิลมาไว้ที่ตำแหน่งต่างๆห่างจากระยะกึ่งกลางของเตาช่วงละ 2 เซนติเมตรแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆทั้งด้านซ้ายและขวาโดยคิดจากกึ่งกลางเตา



ภาพประกอบ 28 การวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อเตา

2.1.3.4 เมื่ออุณหภูมิของเตาอยู่ที่ค่าใดค่าหนึ่งให้ปิดเตาแล้ว วัดค่าอุณหภูมิที่ลดลงกับเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิเพื่อหาค่าคงตัวเวลาของเตา (Time constant)



ภาพประกอบ 29 ลักษณะภายในท่อเตาขณะที่เตามีอุณหภูมิ $1,100^{\circ}\text{C}$

บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

1 เมื่อปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาปลุกผลึกโซนเดียว โดยเริ่มจาก 10 โวลต์ แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตาเพื่อหาสภาวะสมดุลระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา สำหรับในการเก็บข้อมูลได้ทำการทดลอง 3 ครั้ง โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา 2 ค่า คือ ช่วงที่เพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้าจนถึงสภาวะสมดุลของอุณหภูมิสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่านั้นๆและช่วงที่ลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจนถึงสภาวะสมดุลของอุณหภูมิสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่านั้นๆแล้วนำค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตามาหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังตาราง 3.1 ถึงตาราง 3.4

ตาราง 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 17 มกราคม 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว ประสานมิตร)

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาวัดในช่วงที่เพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาวัดในช่วงที่ลดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	0	28	28	28
10	0.4	4	80	90	85
20	0.8	16	180	200	190
30	1.4	42	320	340	330
40	1.8	72	440	450	445
50	2.4	120	590	600	595
60	2.8	168	700	700	700
70	3.3	231	790	810	800

ตาราง 3.1(ต่อ)

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่เพิ่ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่ลด แรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิที่ กึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
80	3.6	288	910	930	920
90	4.2	378	990	1,000	995
100	4.6	460	1,080	1,120	1,100

ตาราง 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว ประสานมิตร)

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่เพิ่ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่ลด แรงเคลื่อนไฟฟ้า ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิที่ กึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	0	28	28	28
10	0.4	4	70	80	75
20	0.8	16	180	190	185
30	1.4	42	330	350	340
40	1.8	72	450	460	455
50	2.4	120	570	580	575
60	2.8	168	690	710	700
70	3.3	231	780	800	790
80	3.6	288	900	920	910

ตาราง 3.2(ต่อ)

แรงเคลื่อน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (W)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่เพิ่ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า (^o c)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่ลด แรงเคลื่อนไฟฟ้า (^o c)	ค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิที่ กึ่งกลางเตา (^o c)
90	4.2	378	1,000	1,010	1,005
100	4.6	460	1,060	1,080	1,070

ตาราง 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว.ประสานมิตร)

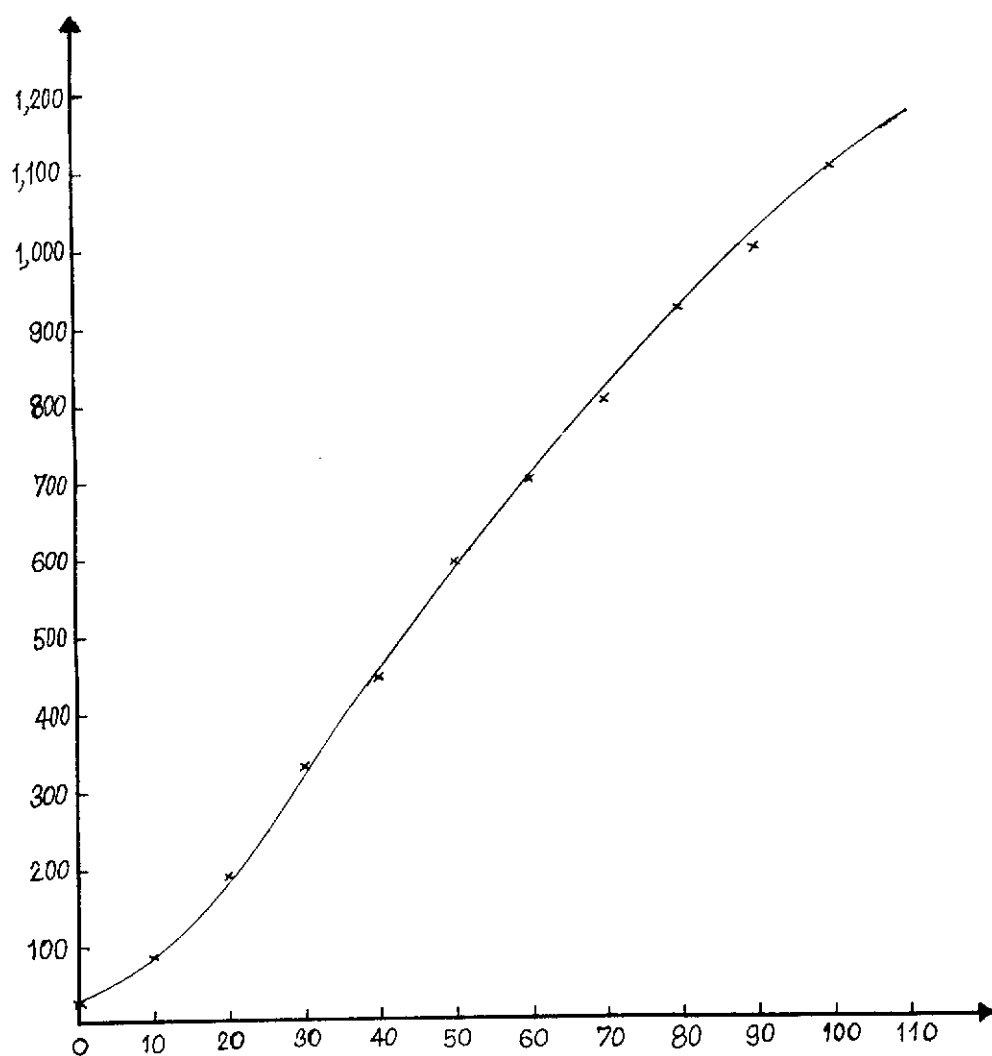
แรงเคลื่อน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (W)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่เพิ่ม แรงเคลื่อนไฟฟ้า (^o c)	อุณหภูมิที่กึ่งกลาง เตาวัดในช่วงที่ลด แรงเคลื่อนไฟฟ้า (^o c)	ค่าเฉลี่ยของ อุณหภูมิที่ กึ่งกลางเตา (^o c)
0	0	0	28	28	28
10	0.4	4	70	90	80
20	0.8	16	190	210	200
30	1.4	42	330	340	335
40	1.8	72	460	460	460
50	2.4	120	570	580	575
60	2.8	168	690	700	695
70	3.3	231	790	800	795
80	3.6	288	890	910	900
90	4.2	378	990	1,010	1,000
100	4.6	460	1,070	1,090	1,080

ตาราง 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา(คิดจากค่าเฉลี่ย
ในการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)

แรงเคลื่อน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลังไฟ ฟ้า (W)	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)			ค่าเฉลี่ยรวม ของอุณหภูมิ ที่กึ่งกลาง เตา($^{\circ}\text{C}$)
			การทดลอง ครั้งที่1	การทดลอง ครั้งที่2	การทดลอง ครั้งที่3	
0	0	0	28	28	28	28
10	0.4	4	85	75	80	80
20	0.8	16	190	185	200	191.7
30	1.4	42	330	340	335	335
40	1.8	72	445	455	460	453.3
50	2.4	120	595	575	575	581.6
60	2.8	168	700	700	695	689.3
70	3.3	231	800	790	795	795
80	3.6	288	920	910	900	910
90	4.2	378	995	1,005	1,000	1,000
100	4.6	460	1,100	1,070	1,080	1,083.3

เมื่อนำข้อมูลจากตาราง 3.1 ถึงตาราง 3.4 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่
ตำแหน่งกึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ให้แกเตาจะได้กราฟดังภาพประกอบ 30 ถึงภาพประกอบ

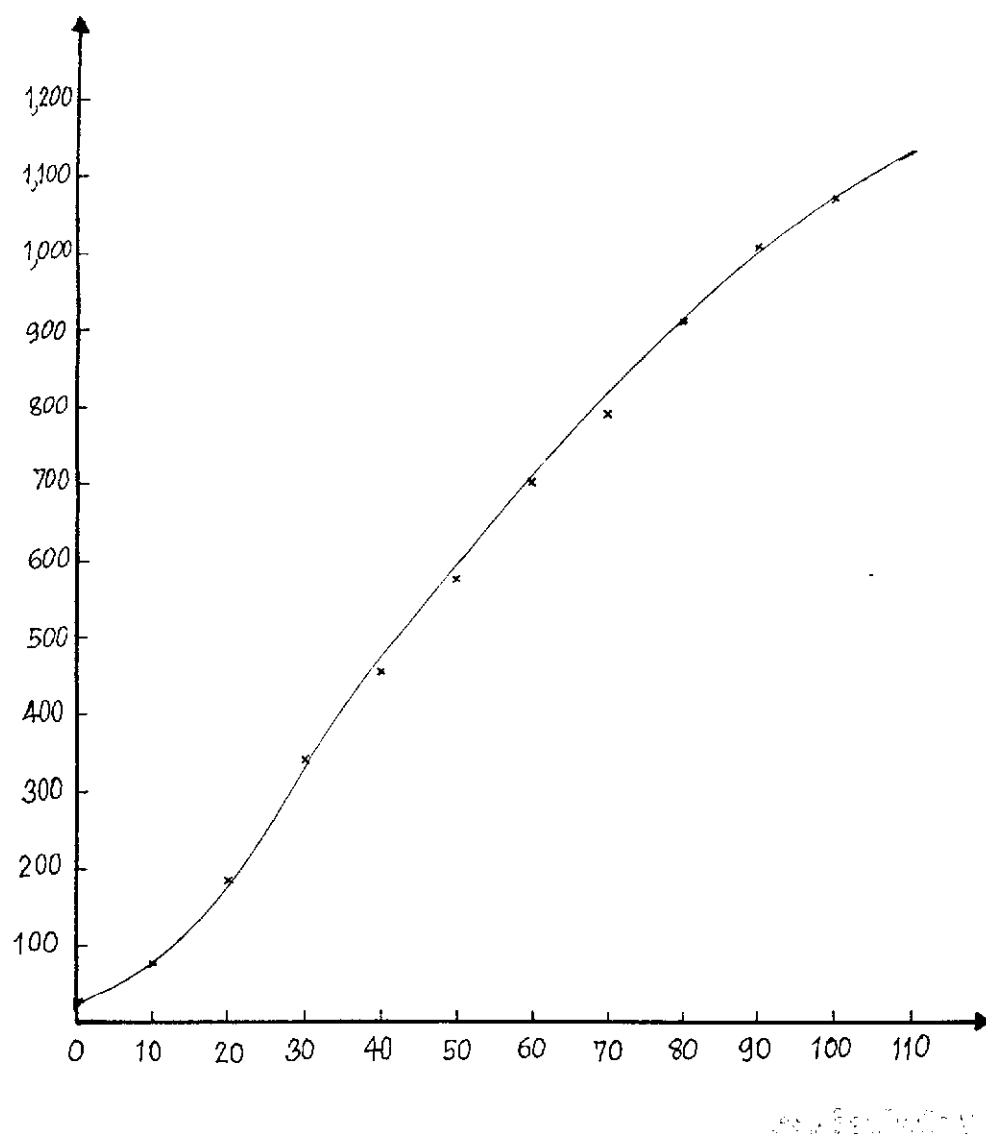
รูปที่ 30 กราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 30 กราฟความสัมพันธ์

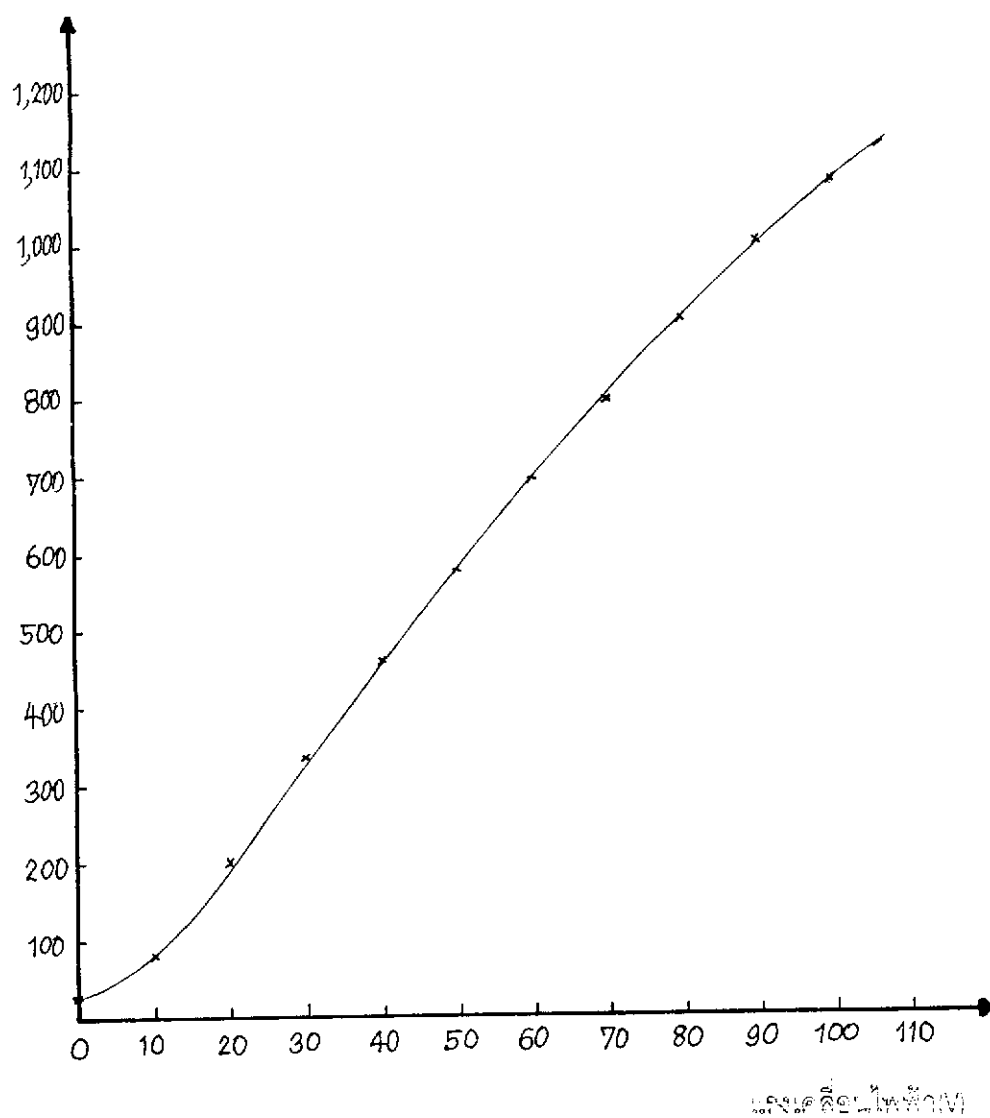
ภาพประกอบ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเซลล์
จากผลการทดลองครั้งที่ 1)

รูปที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)



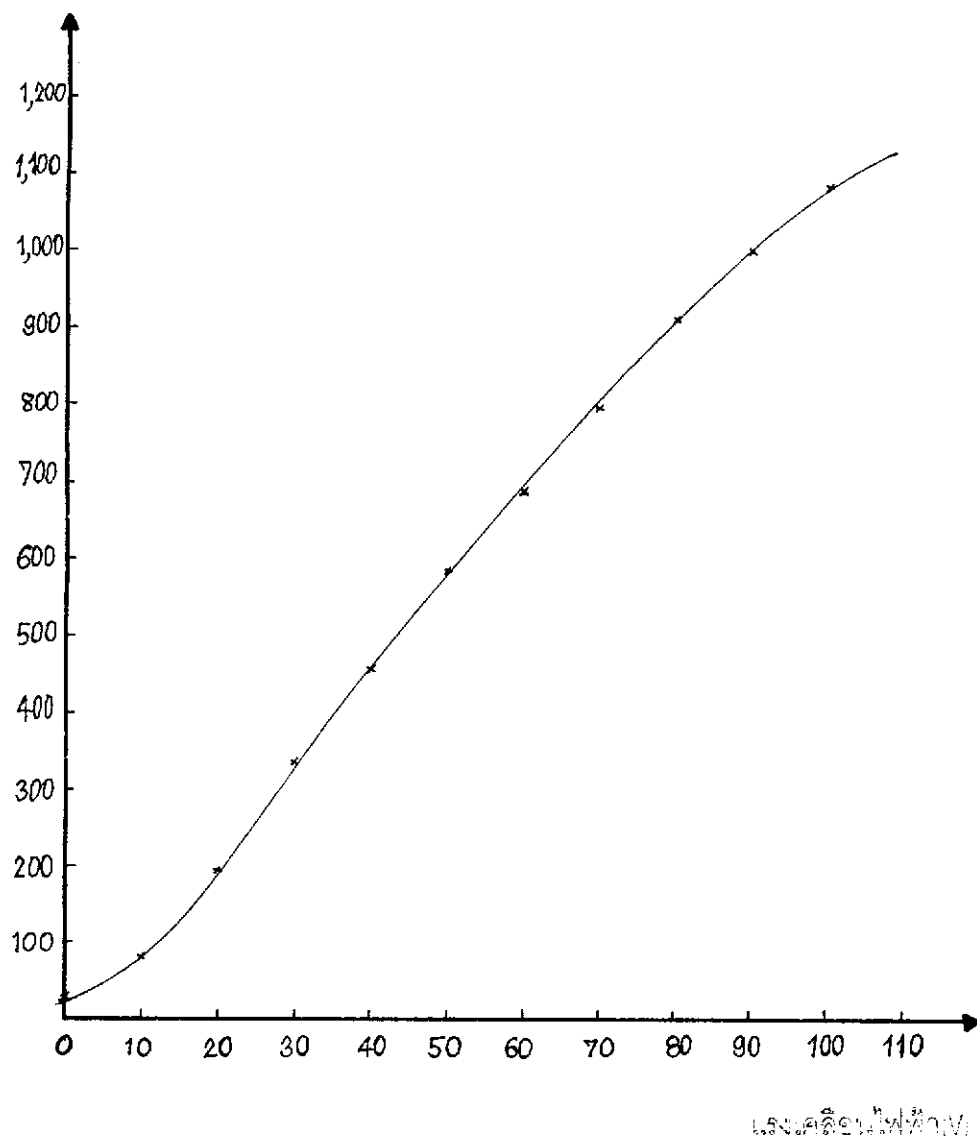
ภาพประกอบ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2)

อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา (°C)



ภาพประกอบ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า(ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3)

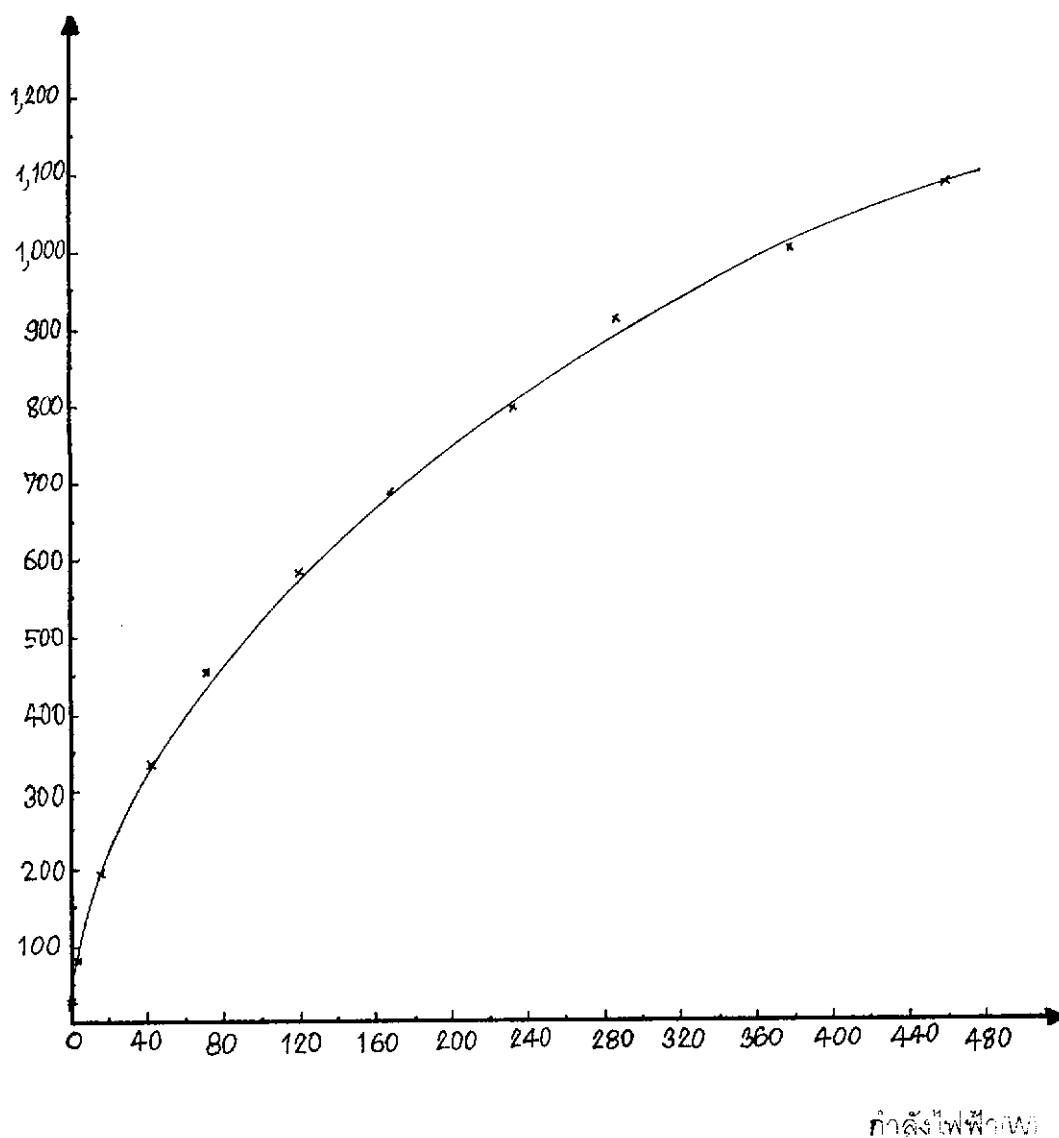
อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา



ภาพประกอบ 33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
(ข้อมูลจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)

และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เตาจะได้ผลดังภาพประกอบ 34

อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตา($^{\circ}\text{C}$)



ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตากับกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เตา(ข้อมูลจากตาราง 3.4)

จากภาพประกอบ 30 ถึงภาพประกอบ 33 จะเห็นได้ว่าสำหรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าหนึ่งๆ ค่าของอุณหภูมิจะมีค่าคงตัว แสดงว่าเตาปลูกผลึกโซนเดียวที่สร้างขึ้นสามารถปรับอุณหภูมิตามต้องการได้โดยการปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจนทำให้เกิดสภาวะสมดุลระหว่างอุณหภูมิกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 34 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าเตาที่สร้างขึ้นนี้ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 480 วัตต์ ก็สามารถให้อุณหภูมิได้ถึง 1,100 วัตต์

2. เมื่อปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจนได้สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตาแล้ว จึงทำการวัดค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆจากจุดกึ่งกลางของเตาทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแนวแกนกลางเตา เมื่ออุณหภูมิสูงสุดตรงกึ่งกลางเตาเป็น 500 , 600 , 700 , 800 , 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตาราง 4.1ก ถึงตาราง 4.4ข

ตาราง 4.1ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้านหน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(°c) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 18 มกราคม 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว.ประสานมิตร)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหน้าเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ(°c)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500 ⁰ c	500	490	480	470	440	430	410	370	340	320	290	250	200	190	150
600 ⁰ c	600	590	580	550	530	510	480	450	430	400	360	330	290	260	220
700 ⁰ c	700	690	680	660	650	610	590	550	530	490	450	420	360	330	290
800 ⁰ c	800	790	780	760	730	710	670	650	600	570	530	490	450	400	360
900 ⁰ c	890	880	870	860	840	810	770	730	710	660	600	560	490	450	410
1,000 ⁰ c	990	990	980	950	930	900	860	810	760	720	660	610	560	500	450
1,100 ⁰ c	1100	1090	1070	1050	1010	1000	970	930	870	830	770	720	660	600	550

ตาราง 4.1ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หลังเตาตามแนวแกนกลางเตา($^{\circ}\text{C}$) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1 วันที่ 18 มกราคม 2539 ณ
ห้อง 10-206 มศว ประสานมิตร)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหลังเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ($^{\circ}\text{C}$)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500°C	490	490	470	460	430	420	390	350	330	300	290	240	200	180	150
600°C	600	580	570	540	530	510	480	450	430	390	360	330	280	250	210
700°C	700	690	660	640	620	590	540	520	490	440	420	370	330	290	260
800°C	800	790	780	750	730	720	670	650	610	560	530	480	440	390	350
900°C	900	890	870	860	840	820	780	740	700	650	590	560	490	430	400
$1,000^{\circ}\text{C}$	990	990	980	950	920	890	850	820	770	710	660	600	550	500	460
$1,100^{\circ}\text{C}$	1090	1080	1060	1040	1020	1000	960	930	860	820	760	710	650	590	540

ตาราง 4.2ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา($^{\circ}\text{C}$) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2539)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหน้าเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ($^{\circ}\text{C}$)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500°C	500	490	480	470	450	430	400	360	340	310	290	240	200	180	150
600°C	600	590	580	550	530	510	480	440	420	400	360	330	280	240	210
700°C	700	690	680	650	640	610	580	540	520	490	450	420	360	330	280
800°C	790	780	770	750	730	710	670	650	600	560	530	470	440	390	350
900°C	900	890	880	860	840	820	780	730	700	650	590	560	500	450	400
$1,000^{\circ}\text{C}$	990	990	980	950	930	890	860	800	760	720	660	590	550	500	450
$1,100^{\circ}\text{C}$	1090	1080	1070	1040	1010	1000	960	930	870	830	770	710	660	660	540

ตาราง 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หลังเตาตามแนวแกนกลางเตา(°c) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2 วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2539)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหลังเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ(°c)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500°c	490	490	470	460	430	420	390	350	330	300	290	240	200	180	150
600°c	600	590	580	550	530	510	480	440	420	400	360	330	280	240	210
700°c	700	690	680	660	640	610	580	540	520	490	450	420	360	330	280
800°c	800	790	780	750	730	720	670	650	610	560	530	480	440	390	350
900°c	900	890	870	860	840	820	780	740	700	650	590	560	490	430	400
1,000°c	990	990	980	940	920	890	860	810	770	720	660	600	550	500	460
1,100°c	1,100	1,090	1,080	1,060	1,010	1,000	990	960	940	850	710	660	600	550	520

ตาราง 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(°c) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2539 ณ
ห้อง 10-206 มศว.ประสานมิตร)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหน้าเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ(°c)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500°c	490	490	480	470	460	450	440	430	420	400	380	360	300	260	180
600°c	600	590	580	570	560	550	540	530	520	500	480	440	400	360	240
700°c	700	690	680	670	660	650	640	630	610	580	550	500	450	400	340
800°c	800	790	780	770	760	750	740	720	700	680	650	610	580	540	400
900°c	900	890	880	870	860	850	840	820	800	780	730	690	640	600	490
1,000°c	990	980	970	960	950	940	930	900	890	860	810	750	680	620	520
1,100°c	1,100	1,090	1,080	1,020	1,010	1,000	990	980	970	940	900	850	770	700	570

ตาราง 4.3ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หลังเตาตามแนวแกนกลางเตา(°c) (ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3 วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2539 ณ
ห้อง 10-206 มศว ประสานมิตร)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหลังเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ(°c)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500 ⁰ c	500	490	480	470	450	430	400	360	340	310	290	240	200	180	150
600 ⁰ c	600	590	580	550	530	510	480	440	420	400	360	330	280	240	210
700 ⁰ c	700	690	680	650	640	610	580	540	520	490	450	420	360	330	280
800 ⁰ c	800	790	780	760	730	710	670	650	600	570	530	490	450	400	360
900 ⁰ c	900	890	880	860	840	820	780	730	760	650	590	560	500	450	400
1,000 ⁰ c	990	980	970	950	930	890	860	800	760	720	660	590	550	500	450
1,100 ⁰ c	1080	1080	1070	1040	1010	960	930	870	830	770	710	660	600	540	520

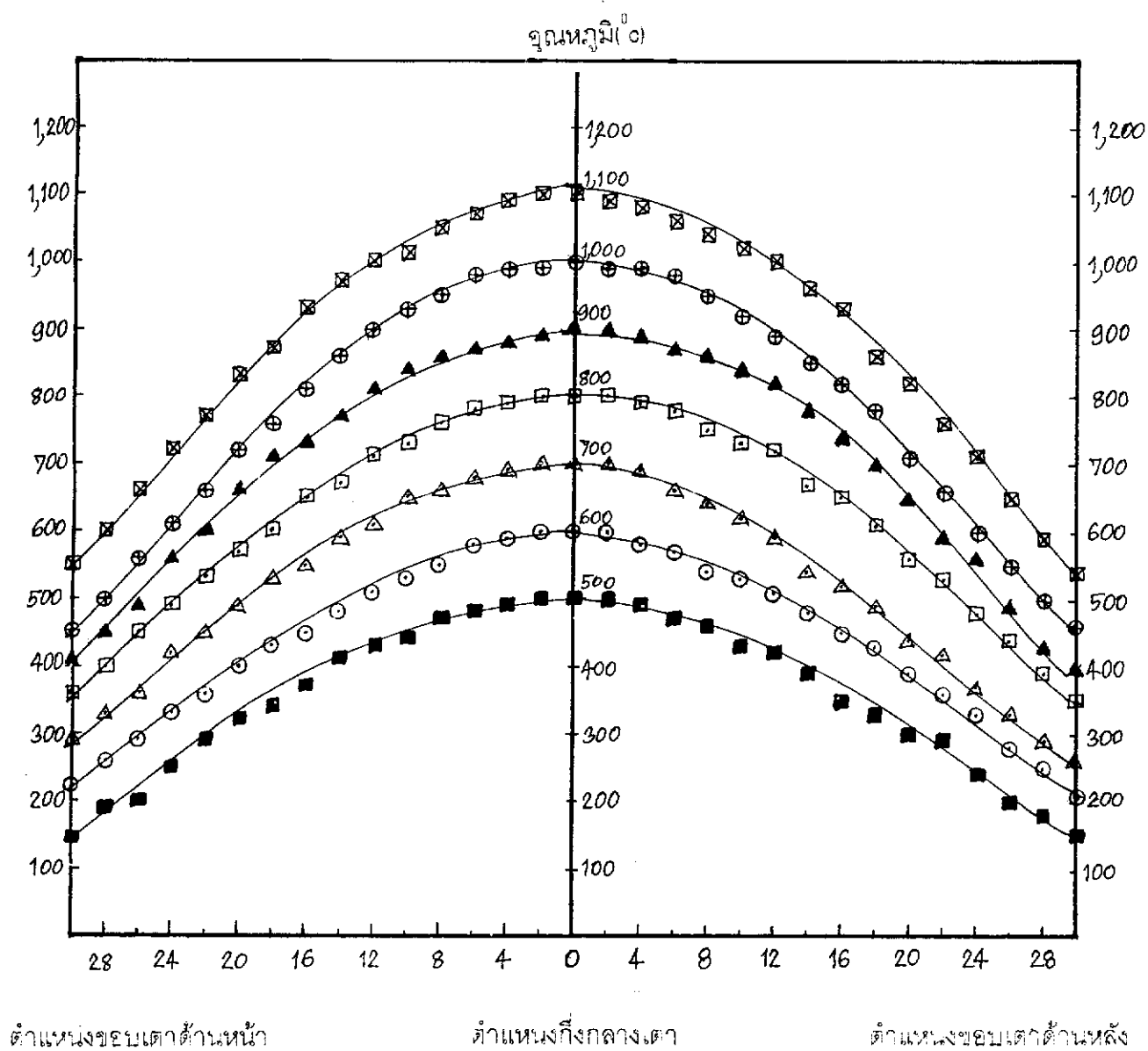
ตาราง 4.4ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หน้าเตาตามแนวแกนกลางเตา(°c) (ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)

อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหน้าเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ(°c)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500 ⁰ c	497	490	477	467	440	427	400	360	337	330	290	243	200	163	150
600 ⁰ c	600	587	577	547	530	510	480	457	427	397	360	330	283	250	213
700 ⁰ c	700	690	683	657	643	613	587	543	523	490	447	420	363	330	283
800 ⁰ c	797	787	777	753	730	713	670	650	603	563	530	480	443	393	353
900 ⁰ c	897	887	873	860	840	817	767	733	703	653	593	560	493	443	403
1,000 ⁰ c	990	990	980	950	927	893	857	810	763	717	660	600	553	500	453
1,100 ⁰ c	1093	1083	1067	1043	1020	1006	963	930	867	827	767	713	657	597	543

ตาราง 4.4ข ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งต่างๆที่ระยะจากจุดกึ่งกลางเตาไปทางด้าน
หลังเตาตามแนวแกนกลางเตา($^{\circ}\text{C}$) (ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)

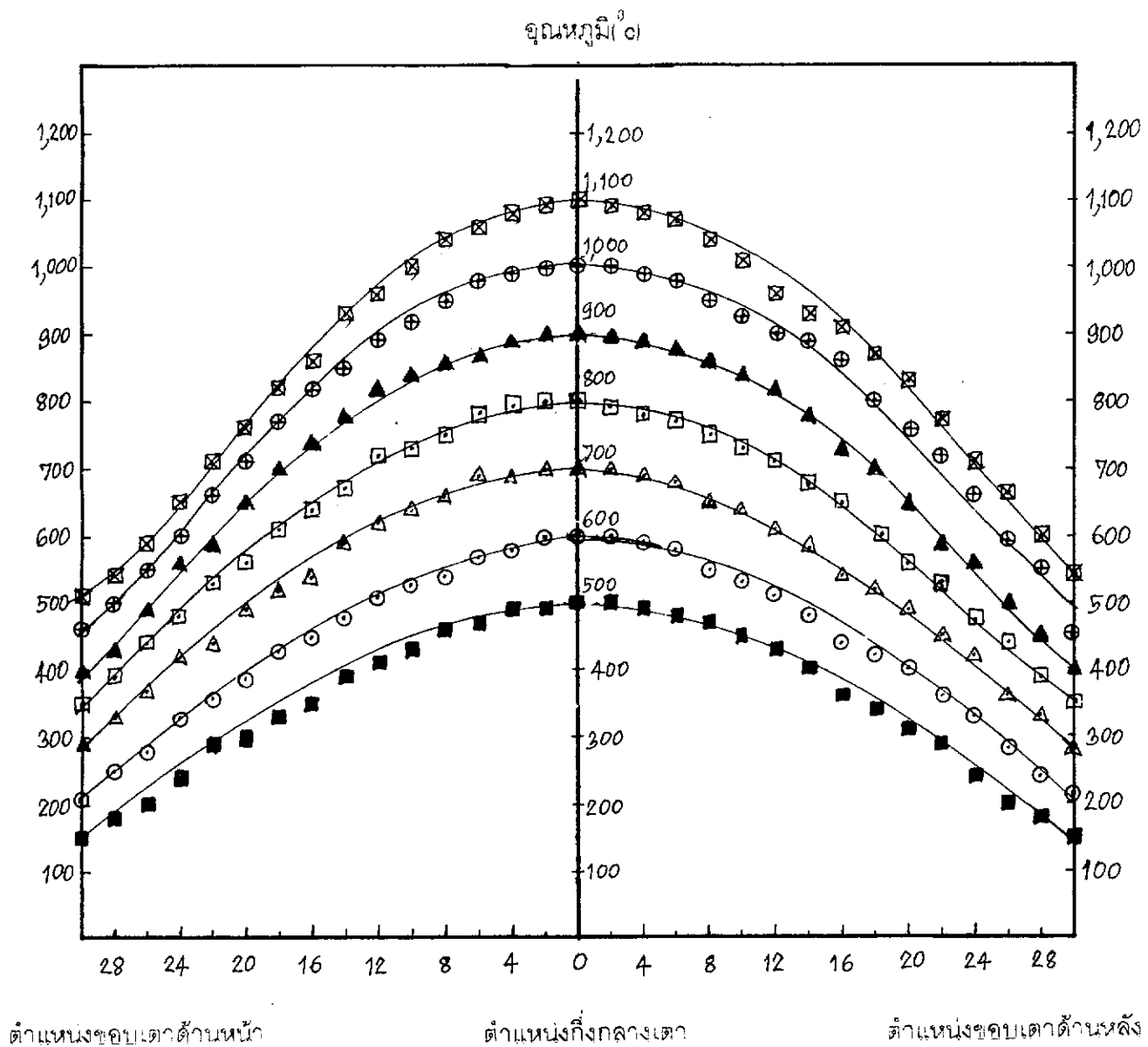
อุณหภูมิสูงสุด ที่กึ่งกลางเตา	ระยะจากกึ่งกลางเตาไปทางด้านหลังเตา(cm)/อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ($^{\circ}\text{C}$)														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
500°C	500	490	478	470	440	430	400	360	340	300	290	240	200	180	150
600°C	600	590	580	550	530	510	480	460	430	397	360	330	290	250	214
700°C	700	690	680	660	640	614	590	540	520	490	447	420	360	330	280
800°C	800	790	780	750	730	713	670	650	600	563	530	480	440	393	353
900°C	890	887	870	860	840	817	767	733	700	653	593	560	493	443	403
$1,000^{\circ}\text{C}$	990	980	950	927	890	860	810	763	717	660	600	550	500	450	420
$1,100^{\circ}\text{C}$	1090	1070	1040	1020	1000	960	930	870	830	770	660	600	540	520	500

เมื่อนำตาราง 4.1ก ถึงตาราง 4.4ข มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะ
ตามแนวแกนกลางเตาจะได้กราฟดังภาพประกอบ 35 ถึงภาพประกอบ 38



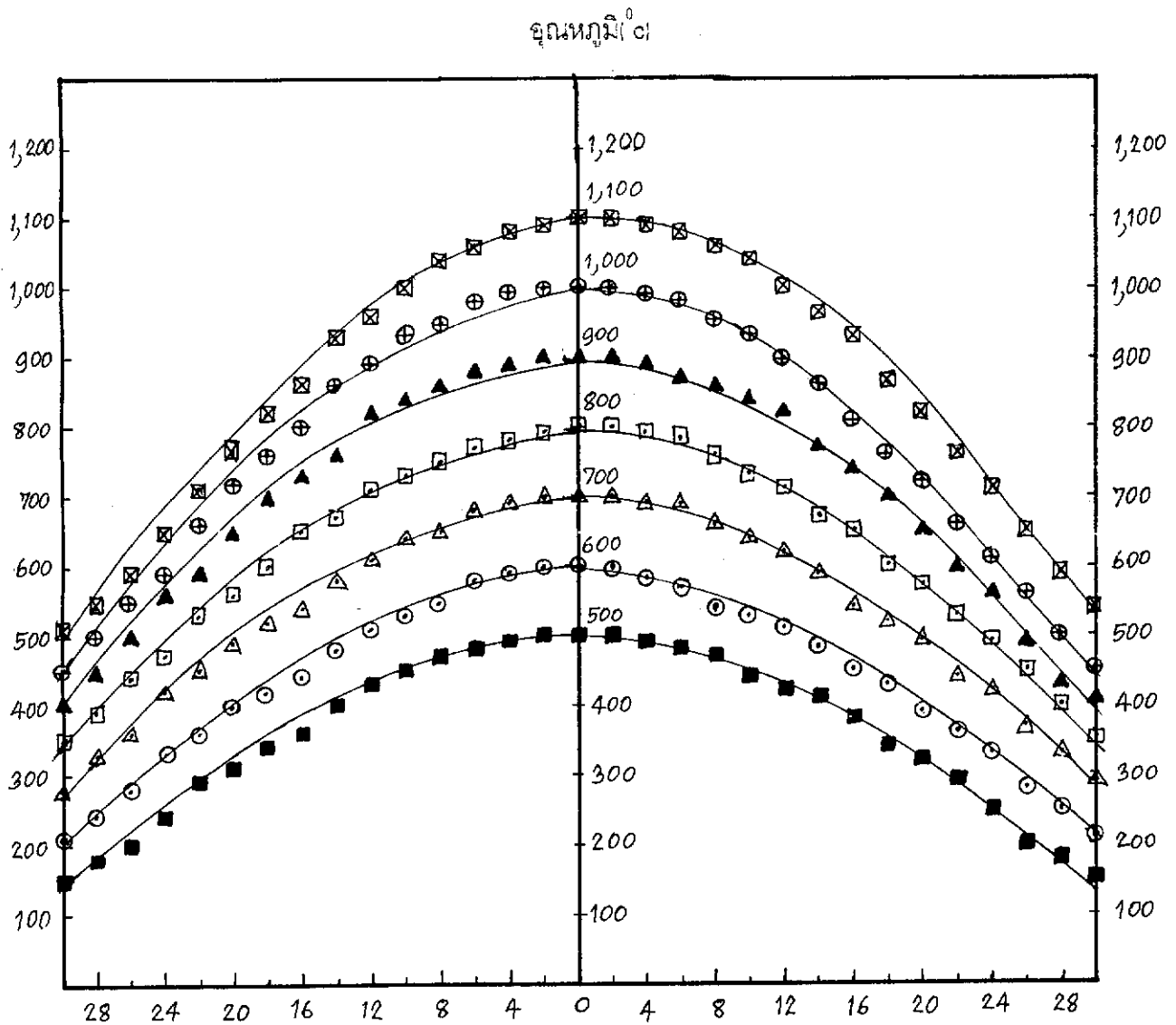
ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา

(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 1)



ภาพประกอบ 36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา

(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 2)



ตำแหน่งขอบเตาด้านหน้า

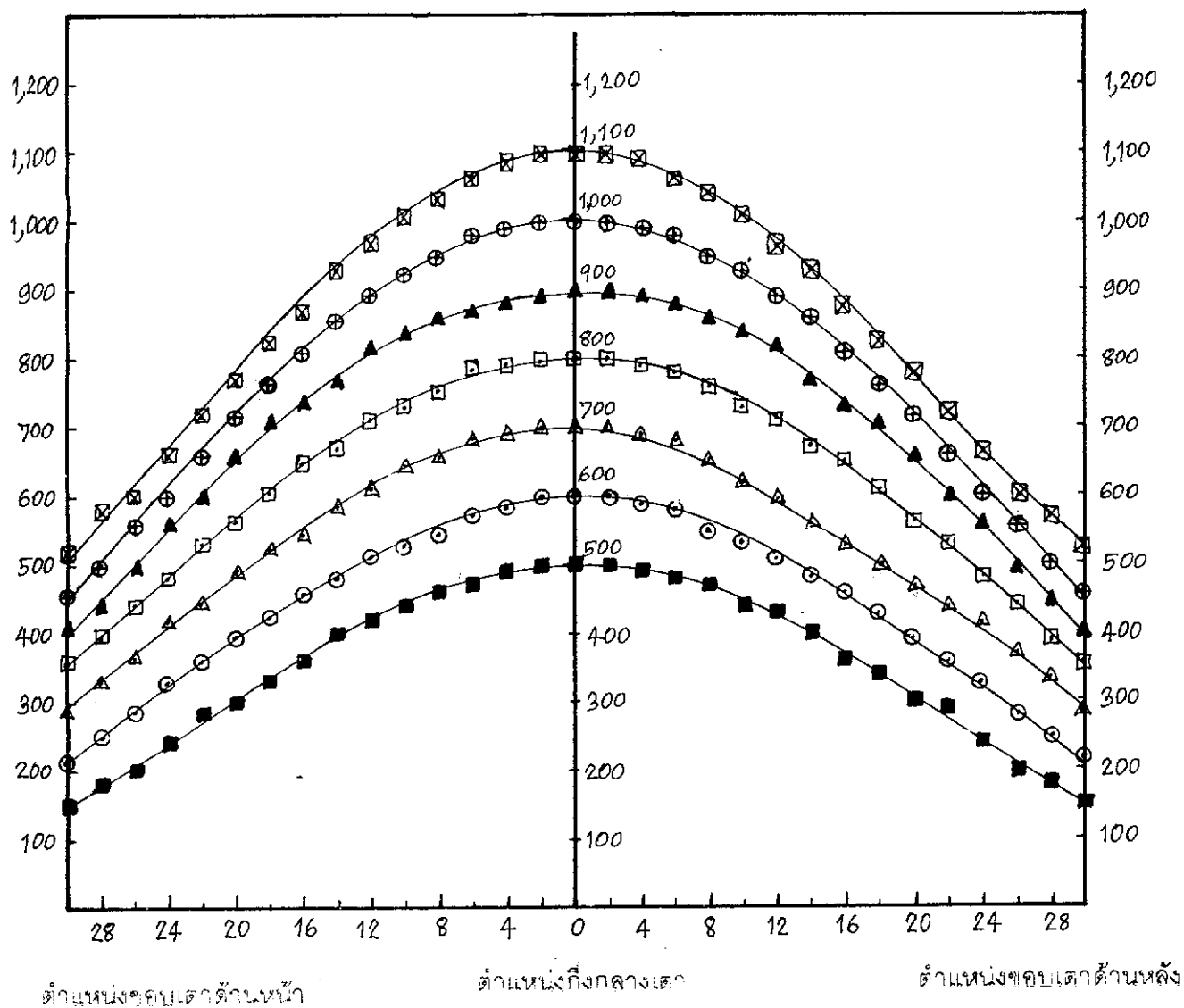
ตำแหน่งกึ่งกลางเตา

ตำแหน่งขอบเตาด้านหลัง

ภาพประกอบ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา

(ข้อมูลจากผลการทดลองครั้งที่ 3)

อุณหภูมิ(°C)



ภาพประกอบ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกับระยะตามแนวแกนกลางเตา
(ข้อมูลจากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง)

จากภาพประกอบ 35 ถึงภาพประกอบ 38 แสดงให้เห็นเกรเดียนท์อุณหภูมิตามแนวกึ่งกลางเตาเมื่ออุณหภูมิสูงสุดตรงกลางเตามีค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเห็นว่าเตาที่สร้างขึ้นนี้อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา และอุณหภูมิจะค่อยลดลงเรื่อยๆ ที่ระยะห่างจากกึ่งกลางเตาไปทางหน้าเตาและหลังเตาโดยอุณหภูมิจะต่ำสุดที่บริเวณปลายท่อเตาทั้งสองด้าน

3. การหาค่าคงตัวเวลาสำหรับเตาปลูกผลึกโซนเดียวที่สร้างขึ้น ทำโดยปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพื่อให้ได้อุณหภูมิสูงสุดที่ 1,100 องศาเซลเซียส แล้วปิดเครื่อง บันทึกช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ดังตาราง 5.1 ถึง 5.3

ตาราง 5.1 ค่าเวลาในการลดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิสูงสุด 1,100 °c (เก็บข้อมูลวันที่ 20 มกราคม 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว.ประสานมิตร)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (°c)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
03.40 น.	1,100	0
03.45 น.	1,040	5
03.50 น.	1,000	10
03.55 น.	960	15
04.00 น.	930	20
04.05 น.	900	25
04.10 น.	880	30
04.15 น.	860	35
04.20 น.	830	40
04.25 น.	810	45
04.30 น.	790	50
04.35 น.	770	55
04.40 น.	750	60

ตาราง 5.1(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
04.45 น.	740	65
04.50 น.	730	70
04.55 น.	710	75
05.00 น.	700	80
05.05 น.	690	85
05.10 น.	670	90
05.15 น.	660	95
05.20 น.	650	100
05.25 น.	630	105
05.30 น.	620	110
05.35 น.	610	115
05.40 น.	600	120
05.45 น.	590	125
05.50 น.	580	130
05.55 น.	570	135
06.00 น.	560	140
06.05 น.	550	145
06.10 น.	540	150
06.15 น.	530	155
06.20 น.	520	160
06.25 น.	510	165
06.30 น.	500	170
06.35 น.	490	175

ตาราง 5.1(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
06.40 น.	480	180
06.45 น.	470	185
06.50 น.	460	190
06.55 น.	450	195
07.00 น.	440	200
07.05 น.	430	205
07.10 น.	420	210
07.15 น.	410	215
07.20 น.	410	220
07.25 น.	400	225
07.30 น.	400	230
07.35 น.	390	235
07.40 น.	390	240
07.45 น.	380	245
07.50 น.	380	250
07.55 น.	370	255
08.00 น.	370	260
08.05 น.	360	265
08.10 น.	360	270
08.15 น.	350	275
08.20 น.	350	280
08.25 น.	340	285
08.30 น.	340	290

ตาราง 5.1(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
08.35 น.	340	295
08.40 น.	330	300
08.45 น.	330	305
08.50 น.	330	310

ตาราง 5.2 ค่าเวลาในการลดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิสูงสุด $1,100^{\circ}\text{C}$ (เก็บข้อมูลวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2539 ณ ห้อง 10-206 มศว.ประสานมิตร)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
03.40 น.	1,100	0
03.45 น.	1,050	5
03.50 น.	1,000	10
03.55 น.	970	15
04.00 น.	930	20
04.05 น.	890	25
04.10 น.	870	30
04.15 น.	850	35
04.20 น.	840	40
04.25 น.	820	45
04.30 น.	790	50
04.35 น.	760	55
04.40 น.	740	60
04.45 น.	740	65

ตาราง 5.2(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
04.50 น.	730	70
04.55 น.	730	75
05.00 น.	710	80
05.05 น.	700	85
05.10 น.	680	90
05.15 น.	660	95
05.20 น.	650	100
05.25 น.	620	105
05.30 น.	610	110
05.35 น.	610	115
05.40 น.	590	120
05.45 น.	590	125
05.50 น.	580	130
05.55 น.	580	135
06.00 น.	570	140
06.05 น.	560	145
06.10 น.	540	150
06.15 น.	530	155
06.20 น.	530	160
06.25 น.	520	165
06.30 น.	510	170
06.35 น.	500	175
06.40 น.	490	180

ตาราง 5.2(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)
06.45 น.	470	185
06.50 น.	460	190
06.55 น.	460	195
07.00 น.	440	200
07.05 น.	440	205
07.10 น.	430	210
07.15 น.	410	215
07.20 น.	410	220
07.25 น.	400	225
07.30 น.	400	230
07.35 น.	400	235
07.40 น.	390	240
07.45 น.	390	245
07.50 น.	380	250
07.55 น.	380	255
08.00 น.	370	260
08.05 น.	360	265
08.10 น.	360	270
08.15 น.	350	275
08.20 น.	350	280
08.25 น.	350	285
08.30 น.	340	290
08.35 น.	340	295
08.40 น.	340	300

ตาราง 5.2(ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาสะสมที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(min)
08.45 น.	330	305
08.50 น.	330	310

ตาราง 5.3 ค่าเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาสูงสุด 1,100 องศาเซลเซียส(ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2)

เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(min)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)		ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	
0	1,100	1,100	1,100
5	1,040	1,050	1,045
10	1,000	1,000	1,000
15	960	970	965
20	930	930	930
25	900	890	895
30	880	870	875
35	860	850	855
40	830	840	835
45	810	820	815
50	790	790	790
55	770	760	765
60	750	740	745
65	740	740	740
70	730	730	730

ตาราง 5.3(ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)		ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	
75	710	730	720
80	700	710	705
85	690	700	695
90	670	680	675
95	660	660	660
100	650	650	650
105	630	620	625
110	620	610	615
115	610	610	610
120	600	590	595
125	590	590	590
130	580	580	580
135	570	580	575
140	560	570	565
145	550	560	555
150	540	540	540
155	530	530	530
160	520	530	525
165	510	520	515
170	500	510	505
175	490	500	495
180	480	490	485
185	470	470	470

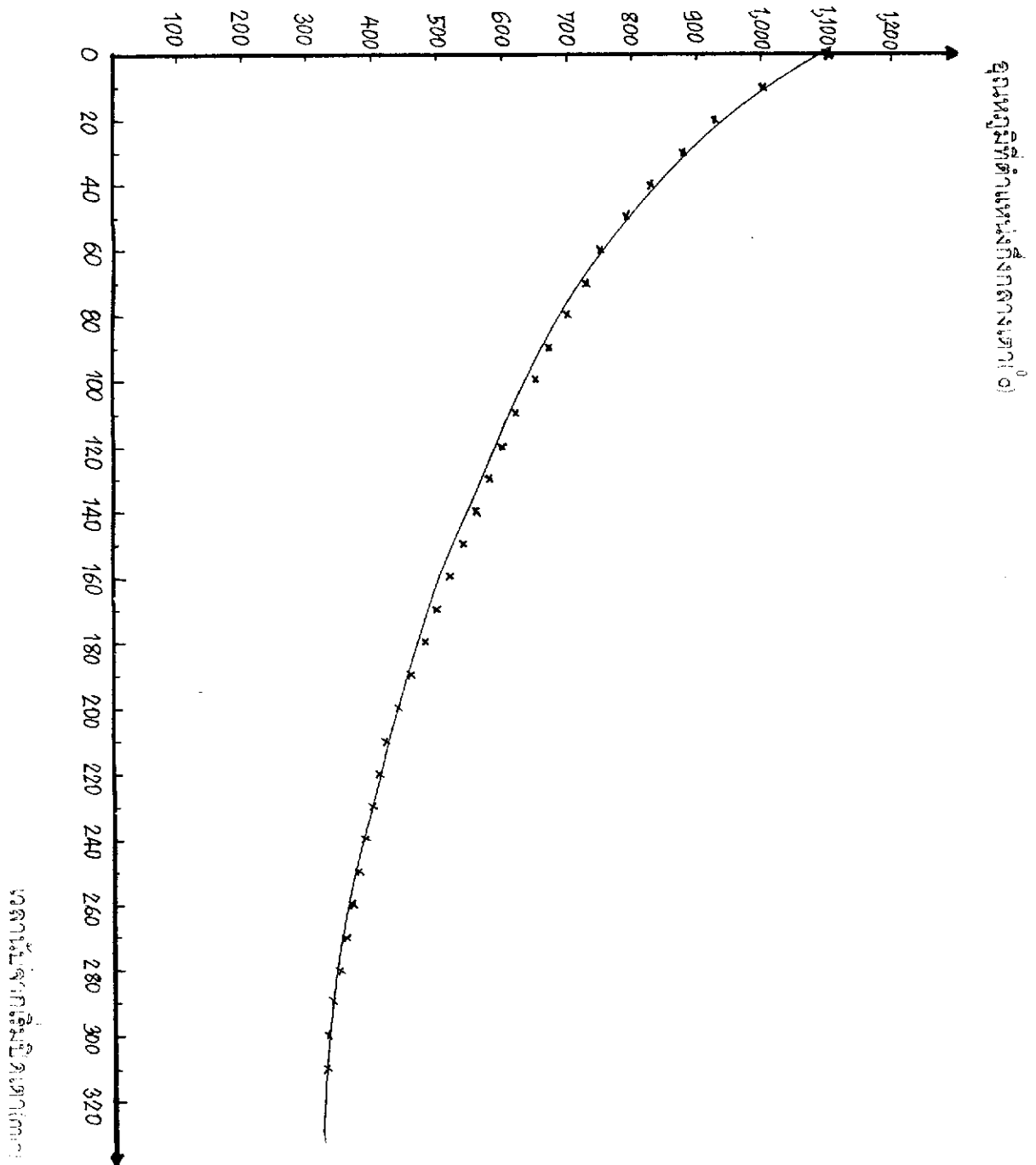
ตาราง 5.3(ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยน แปลงอุณหภูมิ(min)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)		ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	
190	460	460	460
195	450	460	455
200	440	450	445
205	430	440	435
210	420	430	425
215	410	410	410
220	410	410	410
225	400	400	400
230	400	400	400
235	390	400	395
240	390	390	390
245	380	390	385
250	380	380	380
255	370	380	375
260	370	370	370
265	360	360	360
270	360	360	360
275	350	350	350
280	350	350	350
285	340	350	345
290	340	340	340
295	340	340	340

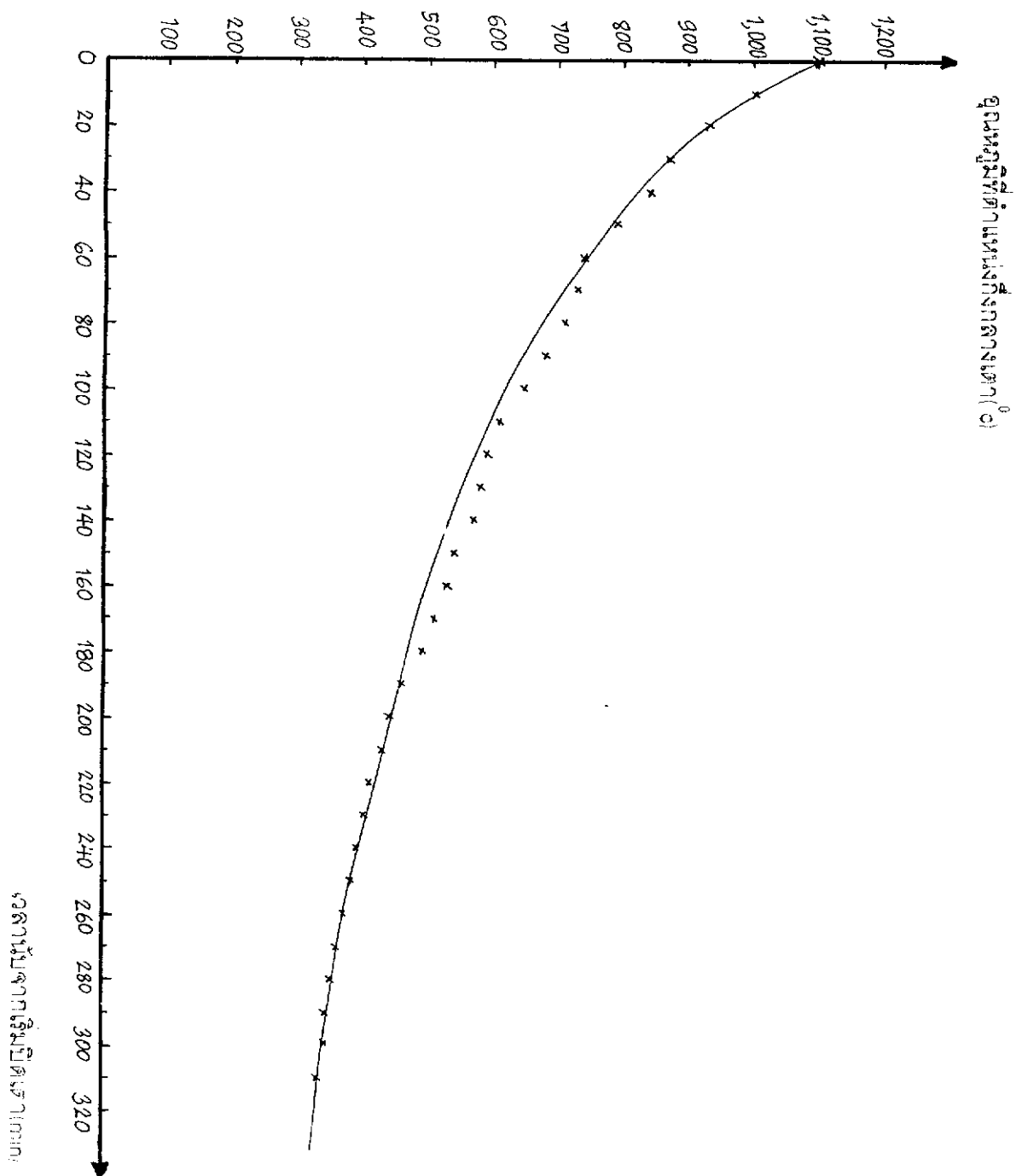
ตาราง 5.3(ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(min)	อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)		ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ($^{\circ}\text{C}$)
	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	
300	330	340	335
305	330	330	330
310	330	330	330

จากตาราง 5.1 ถึง 5.3 เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป กับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะได้กราฟดังภาพประกอบ 39 ถึงภาพประกอบ 41

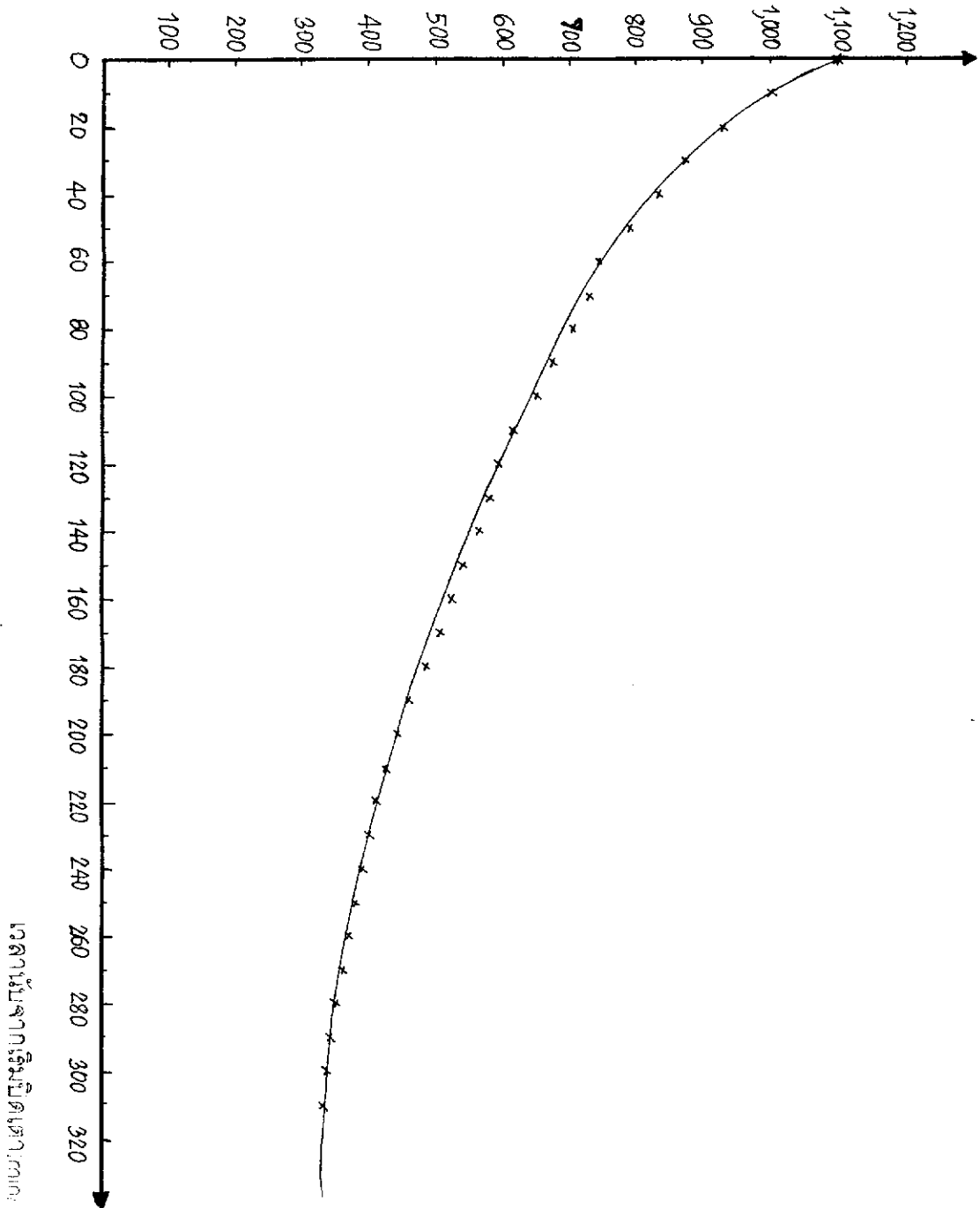


ภาพประกอบ 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(ผลการทดลองครั้งที่ 1)



ภาพประกอบ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(ผลการทดลองครั้งที่ 2)

อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา (๖)



ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากกราฟในภาพประกอบ 39 ถึงภาพประกอบที่ 41 แสดงให้เห็นว่าการลดอุณหภูมิของเตาปลูกผลึกโซนเดียวจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential curve) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการคายประจุของตัวเก็บประจุ ดังนั้นเราสามารถจะนำหลักการหาค่า คงที่ของเวลาของตัวเก็บประจุมาใช้ในการหาค่าคงที่ของเวลาของเตาปลูกผลึกโซนเดียวที่เราสร้างขึ้นได้ เมื่อเราปิดฝาเตาทั้งสองข้างให้สนิท

การหาค่าคงที่ของเวลา ของการลดลงของอุณหภูมิจะได้มาจากการหาค่าคงที่ของเวลา ของการคายประจุของตัวเก็บประจุ (ธงชัย ดิลกศิริ. 2535 : 130-133) ดังสมการต่อไปนี้

$$T_f = (T_{\max} - T_r) e^{-t/c} + T_r$$

- โดยที่ T_f คือ อุณหภูมิของเตาปลูกผลึกที่เวลา t ใดๆ ในหน่วยองศาเซลเซียส
 $T_{\max}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดของเตาปลูกผลึกที่เวลา t ใดๆ ในหน่วยองศาเซลเซียส
 T_r คือ อุณหภูมิห้อง ในหน่วยองศาเซลเซียส
 t คือ เวลาที่เตาปลูกผลึกใช้ในการลดอุณหภูมิ ในหน่วยนาที
 c คือ ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ในหน่วยนาที
 เมื่อ $t = c$ จะได้

$$\begin{aligned} T_f - T_r &= (T_{\max} - T_r) / e \\ &= 0.368 (T_{\max} - T_r) \end{aligned}$$

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้เตาปลูกผลึกโซลเดียวชนิดความต้านทานที่ให้ความร้อนโดยอ้อมซึ่งสามารถปรับระดับอุณหภูมิได้ และศึกษาสมบัติเฉพาะของเตาปลูกผลึก ได้แก่ เกรเดียนต์อุณหภูมิตามแนวแกนของเตา ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับอุณหภูมิภายในเตาในสภาวะสมดุล และหาค่าคงตัวเวลาของเตาปลูกผลึกได้ ผลงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกโซลเดียวชนิดความต้านทานที่ให้ความร้อนโดยอ้อม และสามารถปรับระดับอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกโซลเดียวโดยคำนึงถึง

1.1 ความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอนรวมทั้งการลดและเพิ่มอุณหภูมิ สามารถทำได้ง่ายโดยใช้แอมป์แอคควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดความร้อน

1.2 อุณหภูมิมีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพสูง ตลอดจนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องได้ดี

1.3 ป้องกันการเจือปนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่าย และไม่มีมลภาวะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองหรือใช้งาน

1.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกผลึกสารตามวิธีการปลูกผลึกแบบต่างๆได้เป็นอย่างดี

2. การวัดเกรเดียนต์อุณหภูมิตามแนวแกนของเตา โดยในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกนกลางของเตา เมื่อเตาวางตัวในแนวระดับ โดยการปรับอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางแกนเตาเป็น 500, 600, 700, 800, 900, 1,000, 1,100 และ 1,200 องศาเซลเซียสตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟ ระหว่างตำแหน่งตามแนวแกนกลางเตากับอุณหภูมิ ผลเป็นดังภาพประกอบ 35-38

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของเตาจะสูงสุดที่ตำแหน่งตรงกลางของแนวแกนเตา ส่วนอุณหภูมิที่ตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลางของแกนเตาตามแนวนอนทั้งสองด้าน

โดยอุณหภูมิบริเวณตอนปลายเตาทั้งสองข้าง จะต่ำกว่าบริเวณที่อื่นของเตา และจากการที่เราออกแบบสร้างเตา โดยคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนให้น้อย ทำให้เห็นได้จากผลการวิจัยว่าที่ระยะห่างจากกึ่งกลางเตาในช่วงประมาณ 8 เซนติเมตร ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของจุดกึ่งกลางเตา เกรเดียนท์อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก แสดงให้เห็นว่า เตาที่สร้างขึ้นมีความสามารถ ในการรักษาอุณหภูมิภายในแกนกลางเตา ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอที่ระยะ 8 เซนติเมตร ทั้งด้านซ้ายและขวาของกึ่งกลางเตา

3. หาค่าคงที่ของเวลาของเตาปลุกผลึก จากภาพประกอบ 39 ถึงภาพประกอบ 41 และการวิเคราะห์ผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าเตาปลุกผลึกที่สร้างขึ้นมีค่าคงตัวเวลาสูงซึ่งแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บความร้อนได้ดีนั่นคือมีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมไม่มากนัก

ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบและสร้างเตาปลุกผลึกชิ้นเดียวของงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาสมบัติเฉพาะของเตาปลุกผลึก ในส่วนที่เกี่ยวกับอุณหภูมิตามแนวแกนกลางเตา และค่าคงที่ของเวลา แต่ยังไม่ได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเตา

2. เตาที่สร้างขึ้นมาสำหรับงานวิจัยนี้ ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของเตาปลุกผลึก ควรจะมีการทดลองปลุกผลึกสารตัวอย่างที่มีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวไม่เกิน 1,200 องศาเซลเซียส

3. ในการวัดค่าต่าง ๆ ของเตาปลุกผลึกที่สร้างขึ้นนี้ เราวัดในกรณีที่เตาว่างตัวในแนวนอน ในงานวิจัยต่อไป ควรศึกษาเกรเดียนท์อุณหภูมิ ตามแนวแกนเตา เมื่อเตาว่างตัวทำมุมต่าง ๆ กับแนวระดับ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ธงชัย ดิลกศิริและคณะ. การทดลองการปลูกผลึกโซเดียมคลอไรด์. วิทยานิพนธ์.วท.บ. กรุงเทพฯ :

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี , 2535. จัดสำเนา.

ธิดินัย แก้วแดง. การศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์. วิทยานิพนธ์

วท.ม. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2530. จัดสำเนา.

พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณและคณะ. เตาเผาพลอย. งานวิจัย . กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระเกล้า

ธนบุรี , 2533 . จัดสำเนา .

อารีย์ วิเชียรฉาย สุวรรณ คูสำราญ และวิจิต ศิริโชติ . การสร้างเตาอุณหภูมิสูงเพื่อการ

ศึกษาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ . งานวิจัย . กรุงเทพฯ : สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง , 2535 . จัดสำเนา.

American Society for Testing and Materials. Manual on The Use of Thermocouple in

Temperature Measurement. Philadelphia : Baltimore , Md. ,1981.

Chapman , A J. Heat Transfer. 3rd ed . New York : Macmillan Publishing Co.,Inc.,1974.

Drubyrgh , P.M . ,B. Cockayne, and K.G. Barraclough.Advanced Crystal Growth.London :

Prentice Hall International (UK) Ltd., 1987.

Gilchrist , J.D. Fuels,Furnaces and Refractories. Oxford : Pergamon Press, 1977.

incropera , F.P. and D.P. Dewitt , Introduction to Heat Transfer. New York : John Wiley &

Sons , 1985.

Jakob , M. Heat Transfer. Volume I . New York : John Wiley & Sons , Inc., 1949.

Kreith , F. Principle of Heat Transfer . 3 rd ed. New York : Intext Educational Publishers , 1973 .

Olsen , F.L. The Kiln Book. 2 nd ed . Pennsylvania : Chilton Book Company ,1982.

Pitts , D.R. and L.E.Sissom ,. Schaum's Solved Problems Series 1000 Solved Problems in Heat Transfer. New York : McGraw-Hill , Inc., 1991.

Simonson , J.R. An Introduction to Engineering Heat Transfer. London : McGraw- Hill Publishing Company Limited , 1967.

The American Foundrymen's Society. Refractories Manual. Illinois , 1963.

Paschkis ,V. Industrial Electric Furnaces and Appliances. Volume I .New York : Interscience Publishers , Inc. , 1945.

Weity , J.R. Enginerring Heat Transfer. Toronto : John Wiley & Sons , 1974.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง 6 แสดงวัสดุที่ใช้ทำลวดความร้อน

ชนิด	ค่าความต้านทาน	จุดหลอมเหลว(° C)	การทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
นิโครม	สูง	~1,500	ได้ดีถึง 1,100°c
แคนดัล	สูง	~1,500	ได้ดีถึง 1,250
คาร์บอน	ต่ำ	—	ไม่เกิด, ช่วยสร้าง สุญญากาศ
ซิลิกอน คาร์ไบด์	ต่ำ	—	ได้ดีถึง 1,550° c
โมลิบดินัม ซิลิโคไซด์	ต่ำ	—	ได้ดีถึง 1,700
โมลิบดินัม	ต่ำ	2,600	ไม่เกิด, ใช้ใน บรรยากาศไฮโดรเจน หรือระบบสุญญากาศ
ทังสเตน	ต่ำ	3,400	
แทนทาลัม	ต่ำ	2,850	
พลาตินัมและโลหะผสมพลาตินัม	ต่ำ	1,775	ทนได้ดี
Salt Mixures	กลาง	250	ทนได้ดีแต่โครงสร้าง ธาตุจะเปลี่ยนรูป

โดยทั่วไปตามโรงงานมักเลือกชนิดที่มีความต้านทานต่ำเพื่อให้สามารถใช้แรงดันค่าต่ำๆแต่จ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้าได้มาก

ภาคผนวก ข

ตาราง 7 แสดงตัวอย่างวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

วัสดุ	อุณหภูมิสูงสุด (° C)	ค่าการนำความร้อน(W/m.K)
Glass fiber	600	0.03
Silica fiber	1,000	0.1
Rock wool	1,200	0.05
Firebrick ,insulating	1,200 -1,500	0.03
Fiberfrax	1,650	0.07
Alumina ,bubble	1,800	0.6
Magnesia. powder	2,200	0.3
Magnesia. solid	2,300	1.7
Carbon or graphite, powder	3,000	0.05
Radiation shields,molybdenum	2,100	0.4

(Gilchrist. 1977 : 301)

เทคนิคการใช้คอนกรีตทนไฟ

ก่อนที่จะนำคอนกรีตทนไฟไปใช้งานจะต้องเลือกชั้นคุณภาพของคอนกรีตให้เหมาะสมกับงานเสียก่อน สิ่งที่เราควรนำมาพิจารณาในเบื้องต้นคืออุณหภูมิและความทนทานต่อการขีดกร่อน ตัวเลขอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถนำไปใช้งานดังได้ระบุไว้ในตารางแสดงคุณสมบัติคอนกรีตทนไฟจะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิใช้งานจริงเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกคอนกรีตทนไฟ แต่ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมภายในเตาหรือบริเวณที่ใช้งานด้วย สำหรับงานซึ่งต้องการความต้านทานต่อการขีดกร่อนสูงควรเลือกคอนกรีตชนิดที่มีความต้านทานต่อแรงบดเมื่อเย็นสูง

ในการนำผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ไปใช้งานมีเทคนิคอยู่หลายอย่างซึ่งควรจะต้องทราบและปฏิบัติ เนื่องจากคอนกรีตทนไฟเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับ คอนกรีตธรรมดา ดังนั้นแต่ละขั้นตอนในการนำไปใช้งานจึงควรปฏิบัติโดยรอบคอบ เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

การผสม

เครื่องผสม เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพ สามารถใช้น้ำใน

ปริมาณน้อย ไม่เกิน 12% ต้องใช้เครื่องผสมชนิด

PAN MIXER

น้ำ

น้ำที่ใช้ผสมต้องเป็นน้ำสะอาดอุณหภูมิของน้ำ ควรอยู่ประมาณ 20-30 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำที่ผสมโดยประมาณให้ใช้ตามที่กำหนดไว้ข้างล่าง ถ้าใช้

น้ำมาก หรือน้อยเกินไปจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตทนไฟด้อยลงไป วิธีการทดสอบความชื้นเหลวของ

คอนกรีต สามารถทำได้โดยการปั้นส่วนผสม

คอนกรีตเป็นก้อนกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5

เซนติเมตร โยนขึ้นไปสูงประมาณ 30 เซนติเมตร

แล้วใช้มือรับ ความชื้นเหลว แสดงให้เห็นตามรูป

VIBRATOR การใช้ VIBRATOR ขนาด หรือเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว

ความถี่ 8,000-15,000 VPM จะทำให้คอนกรีตทนไฟ

มีคุณภาพดี จะได้เนื้อคอนกรีตทนไฟที่แน่น

ในการนำคอนกรีตทนไฟไปใช้งาน แนะนำให้หล่อ

โดยใช้ VIBRATOR เสมอ

การหล่อ

คอนกรีตที่ดีควรหล่อโดยใช้เครื่องเขย่า ทั้งนี้เพื่อให้ได้เนื้อคอนกรีตที่แน่นโดยใช้ปริมาณน้ำต่ำ การเขย่าต้องใช้ระยะเวลาที่พอดีไม่มากเกินไปจนทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดการแยกเป็นชั้นระหว่างเม็ดหยาบและเม็ดละเอียด การเขย่าโดยใช้เวลาสั้นเกินไปก็เกิดผลเสีย กล่าวคือ จะได้เนื้อคอนกรีตที่ไม่แน่น ระยะเวลาที่พอดี คือ เขย่าจนสังเกตเห็นน้ำเข้มข้นมาบนผิวคอนกรีต และเนื่องจากก่อนนำคอนกรีตทนไฟไปใช้งานจะต้องผ่านขั้นตอนการอุ่น (Initial heat up) เพื่อไล่ไอน้ำที่เหลืออยู่ในแท่งคอนกรีตออกให้หมดเสียก่อน ดังนั้นผิวหน้าของคอนกรีตจึงไม่ควรตกแต่งให้เรียบ ทั้งนี้เพื่อให้การไล่ไอน้ำออกไปได้อย่างสะดวก



ลักษณะความชื้นเหลวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำน้อยไป



ลักษณะความชื้นเหลวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำพอเหมาะ



ลักษณะความชื้นเหลวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป

การบ่ม

การบ่มคอนกรีตทนไฟก็เช่นเดียวกับการบ่มคอนกรีตธรรมดา การบ่มควรเริ่มทำหลังจากการหล่อ โดยใช้แผ่นพลาสติกหรือกระสอบชื้น ๆ คลุมผิวหน้าคอนกรีต

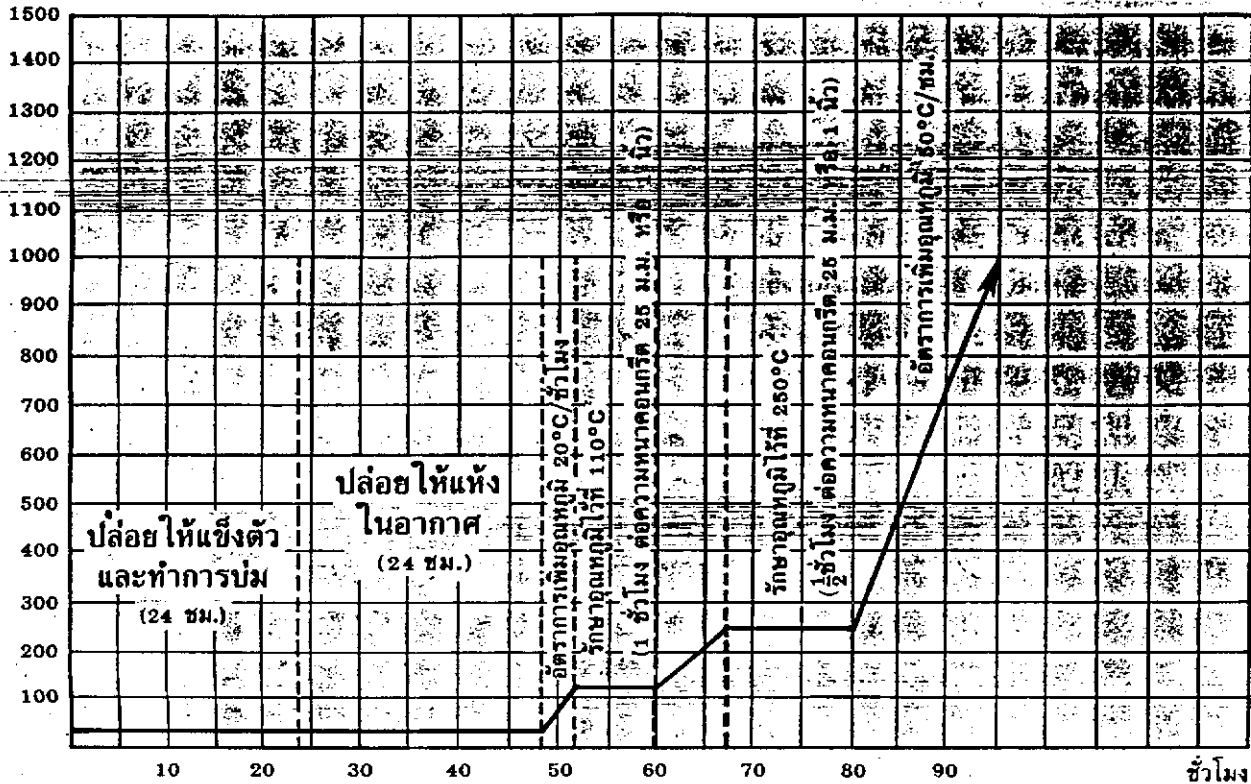
คอนกรีตทนไฟสามารถให้ความแข็งแรงได้เร็วกว่าคอนกรีตธรรมดา กล่าวคือ จะให้ความแข็งแรงใกล้เคียงสุดภายหลังการหล่อ 24 ชั่วโมง โดยปกติหลังจากหล่อเสร็จ 8 ชั่วโมงก็สามารถถอดแบบออกได้ แต่การบ่มคอนกรีตควรทำติดต่อกันไปจนครบ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้แห้งในอากาศเป็นเวลาอีก 12-24 ชั่วโมง

การจุดไฟอุ่นคอนกรีตทนไฟ

คอนกรีตทนไฟที่หล่อและบ่มแล้ว จะยังคงมีน้ำหลงเหลืออยู่ตามรูพรุนในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะระเหยออกเมื่ออุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส นอกจากน้ำในรูพรุนแล้วยังมี water of hydration ซึ่งจะระเหยออกที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อไล่น้ำจะต้องนานเพียงพอ ถ้าคอนกรีตมีความหนามากจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในระยะเวลานั้น จะทำให้น้ำระเหยออกไม่ทันซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันจนทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

ตาราง 8 อุณหภูมิคอนกรีตทนไฟ (HEATING SCHEDULE)

องศาเซลเซียส



ผลิตภัณฑ์คอนกรีตทนไฟของโรงงานผลิตวัสดุทนไฟท่าหลวง

TA LUANG CASTABLE REFRACTORIES

PROPERTIES	CASTABLE-17-LW	CASTABLE-14-CG	CASTABLE-13-ES	CASTABLE-16	CASTABLE-15-ES	CASTABLE-16	CASTABLE-17-CG	CASTABLE-18	CASTABLE-18-LW
MAX. SERVICE TEMPERATURE, °C	1100	1300	1300	1500	1500	1500	1700	1800	1800
MAX. GRAIN SIZE OF AGGREGATES (mm)	-	12	5	5	5	5	12	6	-
APPROX. WEIGHT REQUIRED FOR CASTING, kg/m ³	880	2110	2010	2000	2150	2150	2560	2720	1440
APPROX. AMOUNT OF WATER REQUIRED FOR CASTING, %	40-50	14.5	13.0	10.0	10.5	10	9.5	9	15-20
BULK DENSITY, kg/m ³ after Drying at 110°C	1020-1030	2155	2115	2250	2270	2240	2640	2830	1600-1750
MODULUS OF RUPTURE, kg/cm ² after Drying at 110°C	5-10	50-70	60-80	50-100	60-110	60-80	70-90	100-140	25-50
COLD CRUSHING STRENGTH, kg/cm ² after Drying at 110°C	40-60	250-350	350-500	250-380	400-500	300-450	300-400	550-800	100-200
PERMANENT LINEAR CHANGE, % after Heating	at 1040°C 0.0 to -1.0	at 1280°C -0.1 to -1.0	at 1280°C -0.5 to -1.1	at 1480°C +0.2 to +1.0	at 1480°C -0.5 to -1.0	at 1595°C 0.0 to -0.5	at 1705°C -0.5 to -1.5	at 1760°C -0.2 to -0.8	at 1760°C 0.0 to -0.7
THERMAL CONDUCTIVITY, Kcal/hr.m. °C at	0.152 400°C 0.171 600°C 0.188 800°C 0.211 1000°C	-	-	-	-	-	-	-	0.707 0.855 0.625 0.625
CHEMICAL ANALYSIS, % APPROX.									
SILICA (SiO ₂)	37.2	51.9	46.6	45.1	40.0	33.2	5.0	0.2	0.3
ALUMINA (Al ₂ O ₃)	49.0	32.4	32.8	48.0	53.0	58.6	87.8	93.8	94.4
IRON OXIDE (Fe ₂ O ₃)	0.2	5.8	8.2	0.9	0.9	1.4	1.2	0.3	2.1
CLASSIFICATION: ASTM Designation	C 401-77 CLASS-O	C 401-70 CLASS-B	C 401-77 CLASS-E	C 401-77 CLASS-D	C 401-77 CLASS-O	C 401-70 CLASS-E	C 401-70 CLASS-F	HIGH PURITY HIGH ALUMINA C 401-70 CLASS-G	C 401-70 CLASS-V

All data based on vibration free specimens. ASTM procedures. Where applicable, used for determination of data.
All data subject to reasonable deviation and, therefore, should not be used for specification purposes.

ภาคผนวก ง

ตาราง 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล type R

Standard Thermal EMF of R

Temp.°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	Temp.°C
0	0.000 54	0.647 76	1.468 89	2.400 98	3.407 104	4.471 109	5.582 114	6.741 119	7.949 123	9.203 128	10.503 133	11.846 137	13.224 139	14.624 141	16.035 141	17.445 140	18.842 139	20.215 135	0
10	0.054 57	0.723 77	1.557 90	2.498 98	3.511 105	4.580 109	5.696 114	6.860 119	8.072 124	9.331 129	10.636 132	11.983 136	13.363 139	14.765 141	16.176 141	17.585 141	18.981 138	20.350 133	10
20	0.111 60	0.800 79	1.647 91	2.596 99	3.616 105	4.689 110	5.810 115	6.979 119	8.196 124	9.460 129	10.768 134	12.119 138	13.502 140	14.906 141	16.317 141	17.726 140	19.119 138	20.483 133	20
30	0.171 61	0.879 80	1.738 92	2.695 100	3.721 105	4.793 111	5.925 115	7.098 120	8.320 125	9.589 129	10.902 133	12.257 137	13.642 140	15.047 141	16.458 141	17.866 140	19.257 138	20.616 132	30
40	0.232 64	0.959 82	1.830 93	2.795 101	3.826 107	4.910 111	6.040 115	7.218 121	8.445 125	9.718 130	11.035 135	12.394 138	13.782 140	15.188 141	16.599 142	18.006 140	19.395 138	20.748 130	40
50	0.296 67	1.041 83	1.923 94	2.896 101	3.933 106	5.021 111	6.155 117	7.339 121	8.570 126	9.848 130	11.170 134	12.532 137	13.922 140	15.329 141	16.741 141	18.145 140	19.533 137	20.878 128	50
60	0.363 68	1.124 84	2.017 94	2.997 102	4.039 107	5.132 112	6.272 116	7.460 122	8.696 126	9.978 131	11.304 135	12.669 139	14.062 140	15.470 141	16.882 140	18.286 139	19.670 137	21.006 128	60
70	0.431 70	1.208 86	2.111 96	3.099 102	4.146 108	5.244 112	6.388 117	7.582 121	8.822 127	10.109 131	11.439 135	12.808 138	14.202 141	15.611 141	17.022 141	18.425 139	19.807 137	—	70
80	0.501 72	1.294 86	2.207 96	3.201 103	4.254 108	5.356 113	6.505 118	7.703 123	8.949 127	10.240 131	11.574 136	12.946 139	14.343 140	15.752 141	17.163 141	18.564 139	19.944 136	—	80
90	0.573 74	1.380 88	2.303 97	3.304 103	4.362 109	5.469 113	6.623 118	7.826 123	9.076 127	10.371 132	11.710 136	13.085 139	14.483 141	15.893 142	17.304 141	18.703 139	20.080 135	—	90
100	0.647	1.468	2.400	3.407	4.471	5.582	6.741	7.949	9.203	10.503	11.846	13.224	14.624	16.035	17.445	18.842	20.215	—	100
Temp.°C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	Temp.°C

NOTE 1. The above-mentioned thermal EMF are denoted in absolute mV, and the temperature at reference junction is 0°C.
 2. When the temperature at reference junction is set at 20°C, each of the above-mentioned values must be deducted by 0.111mV.

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นายโกวิทย์ นุณยะกาญจน

เกิดวันที่ 16 เดือนพฤษภาคม พุทธศักราช 2503

สถานที่เกิด อำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 11 หมู่ 5 ตำบลบ้านจั่ว อำเภอสามโคก
จังหวัดปทุมธานี 12160

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน อาจารย์ 1

สถานที่ทำงานปัจจุบัน โรงเรียนปทุมธานี “นันทมนิบารุง” อำเภอเมือง
จังหวัดปทุมธานี 12000 หมายเลขโทรศัพท์ 5815571

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2522 มัธยมศึกษาตอนปลาย (แผนกวิทยาศาสตร์) จากโรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย

พ.ศ.2524 ป.กศ. สูง (วิทยาศาสตร์) จากวิทยาลัยครูพระนครศรีอยุธยา

พ.ศ.2528 กศ.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน

พ.ศ.2539 วท.ม. (วิชาเอกฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

การออกแบบและสร้างเตาปลูกผลิกโซนเดี่ยว

บทคัดย่อ

ของ

โกวิท บุญยะกาญจน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์

มีนาคม 2539

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างเตาปลูกผลึกโซนเดี่ยวรูปทรงกระบอกตาม
แนวนอนประเภทความดันทานที่ให้ความร้อนโดยอ้อมด้วยพลังงานไฟฟ้าโดยใช้หลอดความร้อนที่ให้
อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ผนังเตาใช้ท่ออลูมินาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
5.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.3 เซนติเมตร ความยาวท่อเตา 60 เซนติเมตร ปริมาตร
ของช่องว่างภายในเตา 871.32 ลูกบาศก์เซนติเมตร การให้ความร้อนโดยการพันหลอดความร้อน
แคนดัล เอ เอฟ ที่มีความดันทาน 1.78 โอห์มต่อเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ใช้กระแสสูงสุด
9.09 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 โวลต์กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,000 วัตต์ ผนังเตาถูกหุ้มด้วย
แผ่นใยเซรามิก ซึ่งทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,600 องศาเซลเซียส สำหรับผนังด้านนอกของเตาทำจากแผ่น
สแตนเลสหนา 1.0 มิลลิเมตร หุ้มรอบตัวเตา เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ฝาปิดหัวท้ายเตา
หล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ C-16 ที่ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 1,600 องศาเซลเซียส ประกบติดกับฝา
สแตนเลส

ในการทำงานของเตาจะใช้แบริแอคเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิภายในเตา โดยสามารถปรับค่า
แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 260 โวลต์ มีเทอร์โมคัปเปิล Type R เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ โดยจะวัด
อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวนอนของเตา

จากผลการวิจัยพบว่าเตาที่สร้างขึ้นสามารถให้ความร้อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเตาประมาณ
1,200 องศาเซลเซียส และเมื่อวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวนอนของท่อเตา พบว่าอุณหภูมิจะ
มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเตา ส่วนที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวนอนของท่อเตาระดับอุณหภูมิจะ
ค่อยๆลดลงจากกึ่งกลางเตาจนถึงตำแหน่งปลายท่อเตาทั้งสองข้าง และเมื่อปิดเตาที่อุณหภูมิสูงสุด
ตรงตำแหน่งกึ่งกลางเตาค่าหนึ่งๆอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อเตาจะค่อยๆลดลงในลักษณะคล้ายกับ
การคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF SINGLE ZONE FURNACE

AN ABSTRACT

BY

KOWITYA BOONYAKANCHANA

Presented in partial fulfillment of the requirements for the

Master of Science degree in Physics

at Srinakharinwirot University

March 1996

The purpose of this research is to design and construct a horizontal cylindrical single zone-furnace which heated by electric energy passing through resistance wire with maximum temperature about 1,200 degree celcius. The wall of the furnace is made of Alumina pipe with 5.6 centimeters outer diameter and 4.3 centimeters inner diameter. The length of the pipe is 60 centimeters and its volumn is 874.32 cubic centimeters. Canthal A.F. heating wire has 1.78 ohm/meter resistance at 20 degree celcius ,using maximum current at 9.09 amperes at 220 volts, producing maximum power of 2,000 watts. The inner wall of the furnace was wrapped by ceramic fibers which stand up to 1,600 degree celcius . The diameter of the outer surface is 30 centimeters. The surface is surrounded by stanless-steel with the thickness of 0.1 centimeter.

Variac was used for controlling and changing the temperature in the furnace the electromotive force can be varied from 0 to 260 volts. Temperatures along horizontal positions of the furnace were measured by type R thermocouple.

According to this research, it was found that the temperature at the middle position of the furnace is higher than other positions and its maximum is 1,200 degree celcius. The temperature in the furnace decrease along the axis from the center. After turning energy off,the temperture at the middle got cooler and cooler in the same way as a capacitor releases the electric charge.