

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองชุดที่ 1

##### 4.1.1 การเปลี่ยนแปลงของชุดสารตัวอย่างชุดที่ 1 เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง

สำหรับชุดสารตัวอย่าง A และ B ที่มีองค์ประกอบในอัตราส่วนเดียวกัน เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสารตัวอย่างหลอมเหลว และทำการวัดความต้านทานของชุดสารตัวอย่างไปพร้อมกันด้วย จากนั้นจึงลดอุณหภูมิ เพื่อให้แข็งตัวเป็นกลาส โดยกำหนดอัตราการลดอุณหภูมิของชุดสารตัวอย่าง A เป็น 15 องศาเซลเซียส/นาที และชุดสารตัวอย่าง B เป็น 0.8 องศาเซลเซียส/นาทีที่มีผลการทดลองดังตาราง 4.1 และเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างความต้านทาน ( $R$ ) กับอุณหภูมิ ( $T$ ) จะเป็นดังรูป 4.1

จากกราฟรูป 4.1 จะเห็นได้ว่าชุดสารตัวอย่าง A และ B ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกันมีกราฟระหว่าง ความต้านทานกับอุณหภูมิ ในลักษณะเดียวกัน โดยสามารถแบ่งลักษณะกราฟได้เป็น 3 ช่วง โดยในช่วงแรกความต้านทานจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และจะลดต่ำสุดที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะเริ่มลดลงอีกครั้งในช่วงที่ 2 โดยความต้านทานจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีลักษณะค่อนข้างชันมาก โดยความต้านทานลดต่ำสุดที่อุณหภูมิประมาณ 660-720 องศาเซลเซียส จากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานโดยมีการเพิ่มขึ้น ลดลง ซ้ำไปมา ซึ่งจัดอยู่ในช่วงที่ 3

เมื่อนำชุดสารตัวอย่าง A มาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสซ้ำอีก 2 ครั้ง จะได้ผลการทดลองดังตาราง 4.2 และเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่างความต้านทาน ( $R$ ) กับอุณหภูมิ ( $T$ ) จะได้กราฟดังรูป 4.2

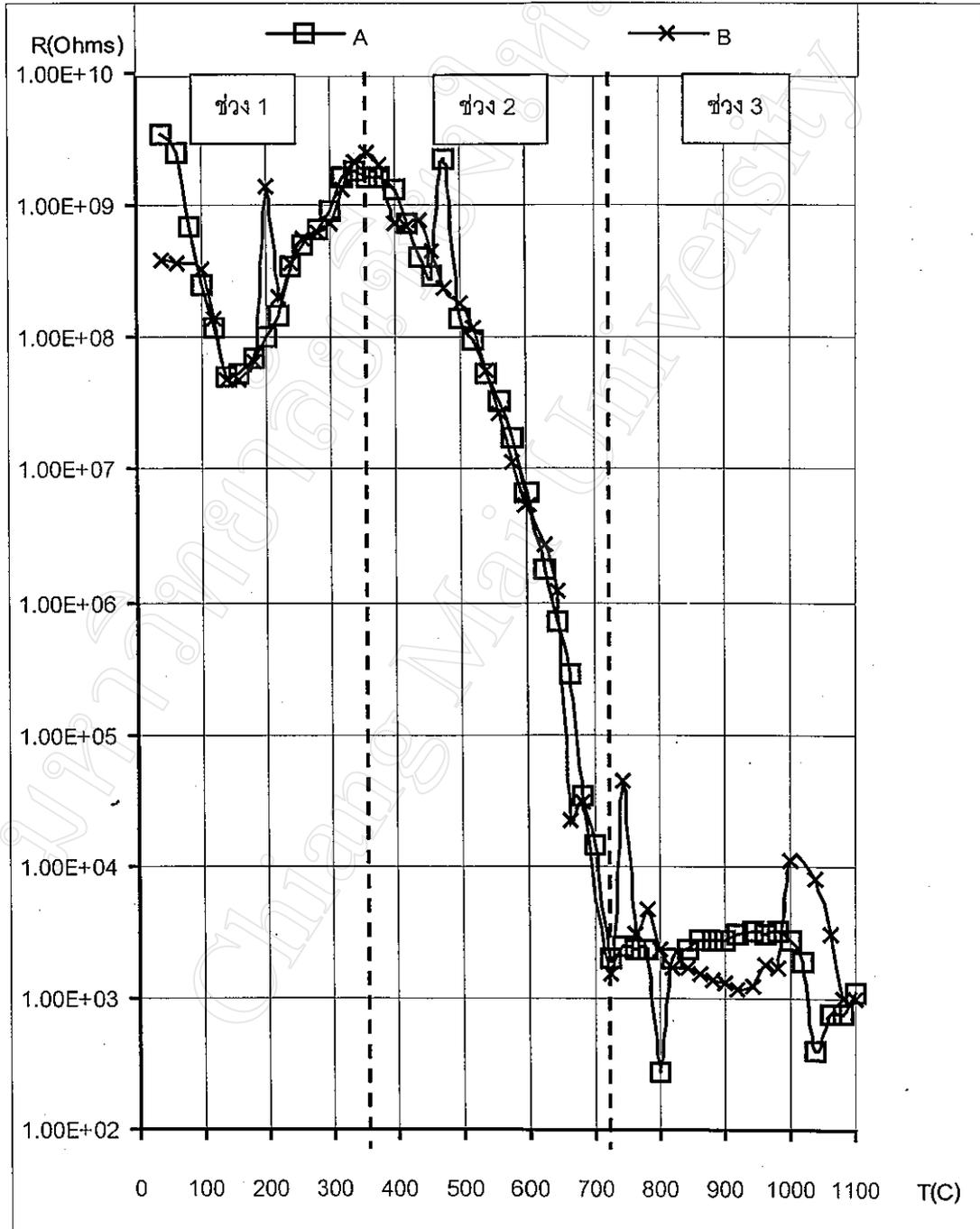
จากกราฟจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงที่ 1 ของกราฟไม่มีการลดลงของความต้านทานอย่างชัดเจนเหมือนครั้งแรก และในช่วงที่ 2 และ 3 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับครั้งแรกมาก

เมื่อการสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงของชุดสารตัวอย่างขณะให้ความร้อน พบว่าเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างจะเริ่มหดตัว และการหดตัวจะมีอย่างต่อเนื่อง และจะหดตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส จากนั้นสารตัวอย่างจะเริ่มขยายตัวเต็มถ้วยเซรามิกส์ และเริ่มมีการหลอมรวมกัน และเมื่อให้ความร้อนต่อเนื่องไปอีก ชุดสารตัวอย่างจะหลอมฟู จากนั้นจะยุบตัวลงโดยมีการหลอมรวมกันมากยิ่งขึ้น และมีความหนืดลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชุดสารตัวอย่างที่สังเกตได้ เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนอุณหภูมิถึง 1100 องศาเซลเซียส เป็นไปดังตาราง 4.3

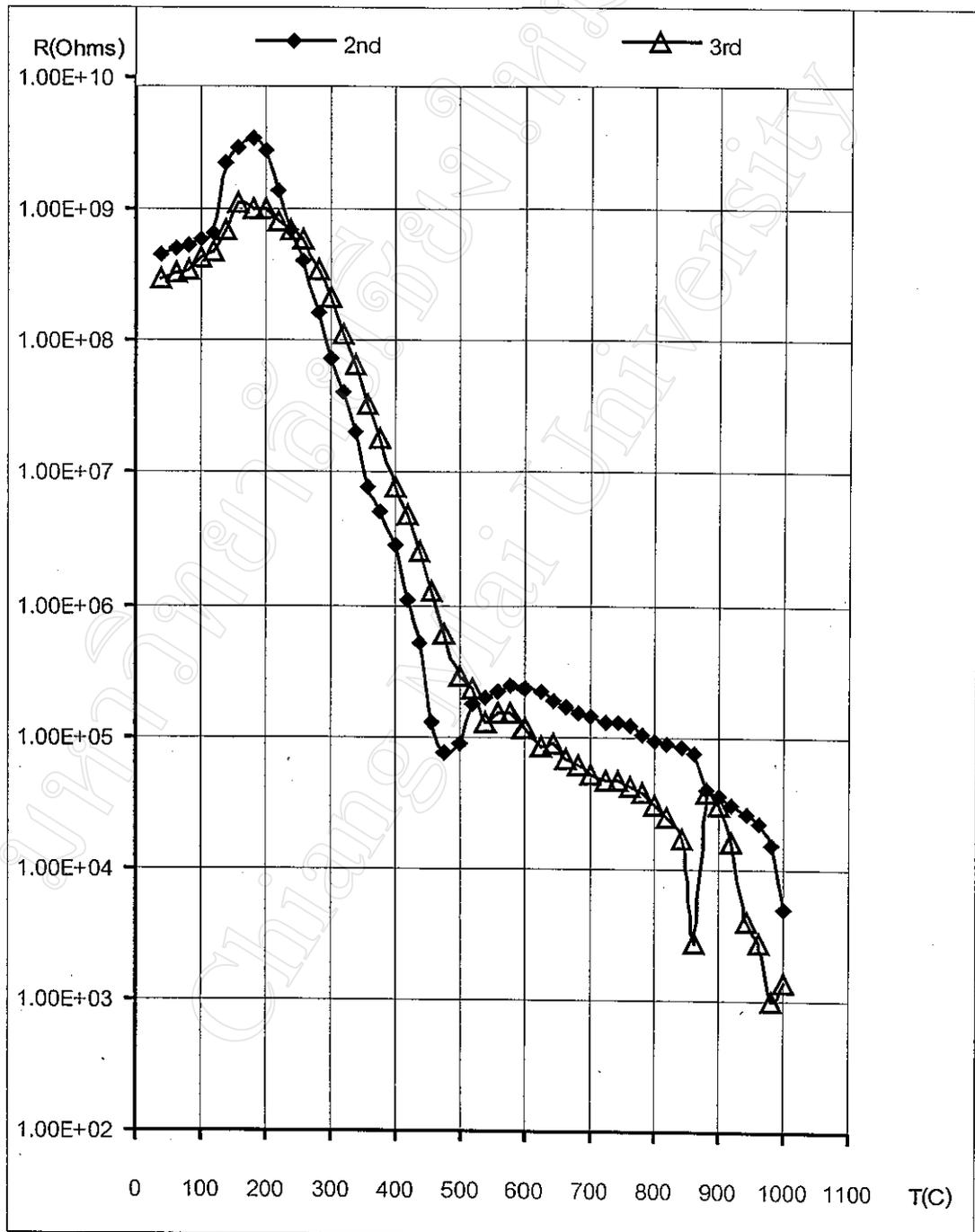
เมื่อนำชุดสารตัวอย่าง ตรวจสอบด้วยวิธีวิเคราะห์ทางความร้อน (differential thermal analysis / thermo gravimetry ; DTA/TG) จะได้ผลดังรูป 4.3

จากรูป 4.3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ DTA/TG โดยพบว่าสำหรับกราฟ DTA มีการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 143.6 องศาเซลเซียส จากนั้นก็จะมีการคายความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 665.8 องศาเซลเซียส

สำหรับกราฟ TG พบว่ามีน้ำหนักของสารลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักลดลง 5.1% จากนั้นน้ำหนักจะคงที่ และจะเริ่มลดลงอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส โดยลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 840 องศาเซลเซียส น้ำหนักจึงเริ่มคงที่ โดยรวมแล้วมีน้ำหนักลดลง 11%

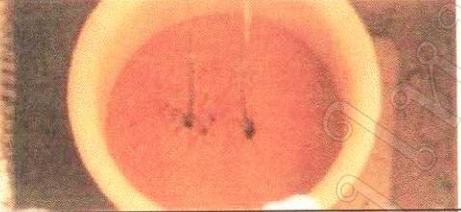
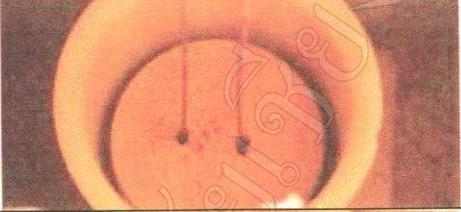
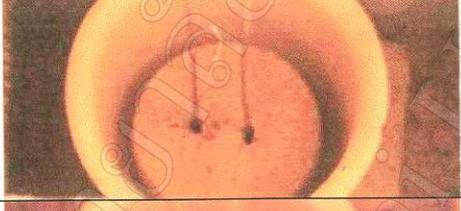
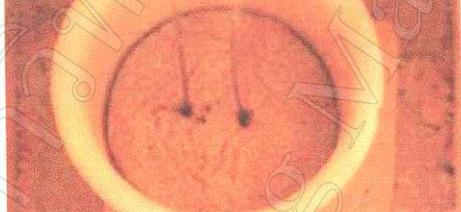
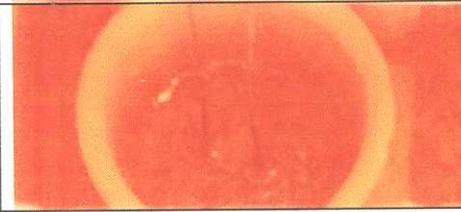


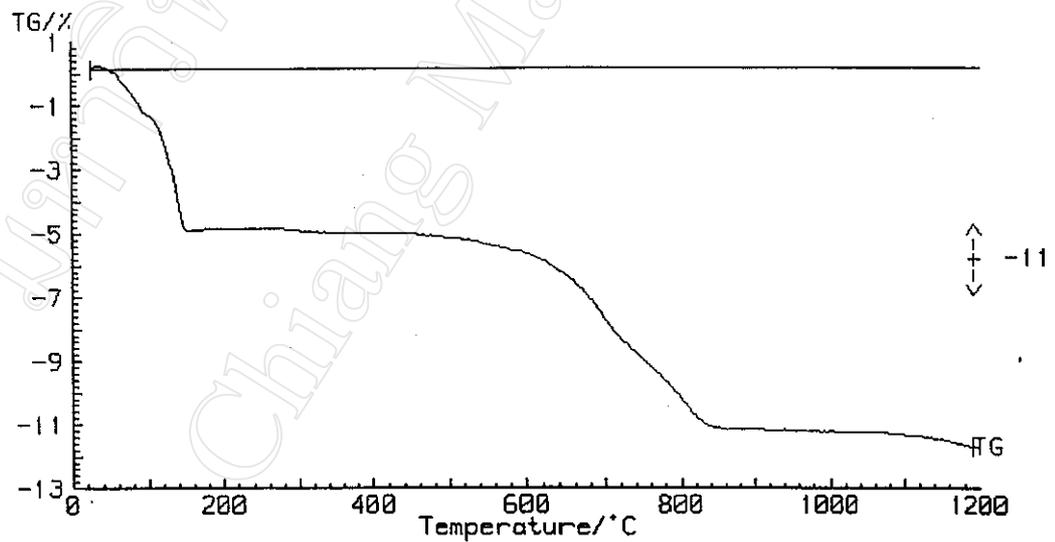
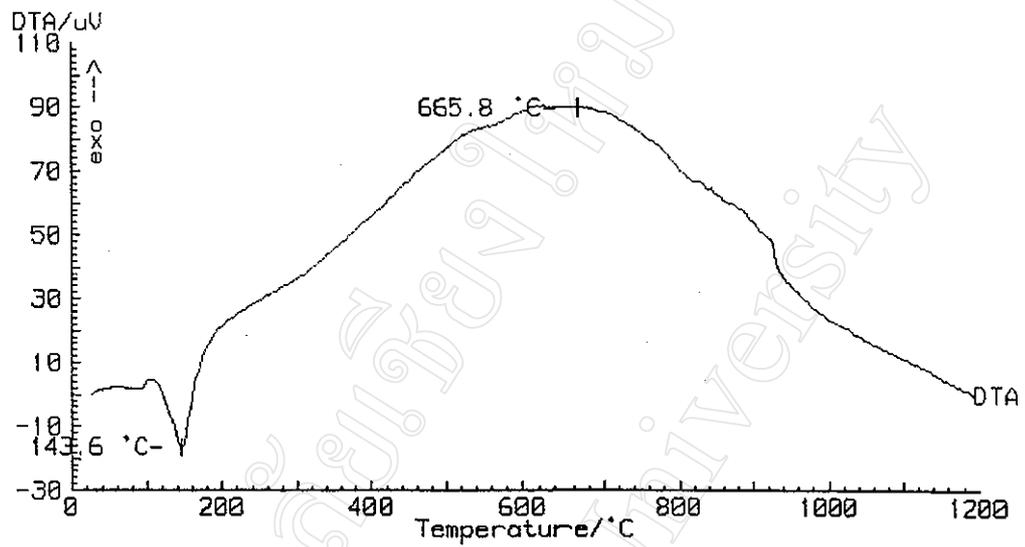
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟระหว่างความต้านทานของชุดสารตัวอย่าง A และ B กับอุณหภูมิ  
หมายเหตุ :  $1.00E+02 = 1 \times 10^2$



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟระหว่างความต้านทานวัดครั้งที่ 2 และ 3 ของชุดสารตัวอย่าง A กับอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชุดสารตัวอย่างเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง

อุณหภูมิ(°C)	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชุดสารตัวอย่าง	
25		ชุดสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
580		ชุดสารตัวอย่างเริ่มมีการหดตัวออกจากขอบถ้วยเซรามิกส์
660		ชุดสารตัวอย่างมีการหดตัวมากที่สุด
780		หลังจากที่ชุดสารตัวอย่าง มีการหดตัวเล็กที่สุด หลังจากนั้นจะมีการขยายตัวเต็มถ้วยเซรามิกส์ และเริ่มมีการหลอมเกิดขึ้น
840		ชุดสารตัวอย่างมีการหลอมฟู
880		ชุดสารตัวอย่างหลอมรวมกันมากขึ้น
920		เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ชุดสารตัวอย่างจะหลอมรวมกันยิ่งขึ้น และความหนืดลดลง



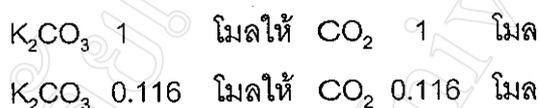
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ DTA/TG ของชุดสารตัวอย่างชุดที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น  $\text{SiO}_2$  45.5 %  $\text{PbO}$  38.5 % และ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  16 % โดยน้ำหนัก

### การวิเคราะห์ผลในช่วงที่ 1

สำหรับกราฟ DTA/TG พบว่ามีน้ำหนักของสารลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส และมีการดูดความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ โดยน้ำหนักที่หายไปเป็น 5.1% ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าเป็นน้ำหนักของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยคำนวณจาก



โดยโปตัสเซียมคาร์บอเนต (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) มีมวลโมเลกุลเป็น 138.19 กรัมและในชุดสารตัวอย่างนี้ใช้โปตัสเซียมคาร์บอเนต 16% โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงคิดเป็น  $\frac{16}{138.19} = 0.116$  โมล



โดย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีมวลโมเลกุลเป็น 44.01 กรัม

ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ 0.116 โมล จึงมีน้ำหนักเป็น  $0.116 \times 44.01 = 5.10$  กรัม

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็น\% ได้จาก } (\text{น้ำหนักของ CO}_2 / \text{น้ำหนักรวม}) \times 100 &= \left( \frac{5.10}{38.5 + 16 + 45.5} \right) \times 100 \\ &= 5.1\% \end{aligned}$$

โดยผลการวิเคราะห์ DTA/TG พบว่าชุดสารตัวอย่างมีการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 143.6 องศาเซลเซียส โดยมีการดูดความร้อนเข้าไปเพื่อช่วยในการสลายพันธะ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความต้านทาน ซึ่งพบว่าการลดลงของความต้านทานอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นความต้านทานจึงเพิ่มขึ้น โดยเมื่อให้ความร้อนแก่ชุดสารตัวอย่างเดิมซ้ำอีก 2 ครั้ง พบว่าไม่มีการลดลงของความต้านทานเหมือนครั้งแรก ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า ความต้านทานที่ลดต่ำลงที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสนั้น เป็นการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเกิดเฉพาะครั้งแรกที่เป็นการหลอมสารตัวอย่างเท่านั้น

ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิที่ความต้านทานลดลงต่ำสุดในช่วงนี้ เป็นอุณหภูมิที่มีการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

### การวิเคราะห์ผลในช่วงที่ 2

สำหรับในช่วงที่ 2 พบว่าชุดสารตัวอย่างเริ่มมีการหดตัว และหดตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการที่ความต้านทานมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีความชันมาก โดยที่ความต้านทานต่ำสุดของช่วงนี้ ก่อนมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 660-720 องศาเซลเซียส และสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ DTA/TG ซึ่งพบว่ามี การคายความร้อนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 665.8 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักของสารในช่วงแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจะเริ่มเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิ 600 – 665 องศาเซลเซียส จะมีการลดลงของน้ำหนักสารเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิที่ความต้านทานลดลงต่ำสุดในช่วงนี้ เป็นอุณหภูมิที่ชุดสารตัวอย่างเริ่มหลอมรวมกัน

### การวิเคราะห์ผลในช่วงที่ 3

สำหรับช่วงที่ 3 พบว่า เมื่อสารตัวอย่างหดตัวจนมีขนาดเล็กสุดแล้ว ก็เริ่มขยายตัวเต็มถ้วยเซรามิกส์ และเริ่มหลอมรวมกัน โดยมีการหลอมฟูของสารตัวอย่าง จากนั้นจะยุบตัวลง โดยมีการหลอมรวมกันมากขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับความต้านทานของชุดสารตัวอย่าง โดยเมื่อเริ่มมีการขยายตัวเต็มถ้วยเซรามิกส์ความต้านทานก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อมีการหลอมรวมกัน ความต้านทานจะลดลงและจะเพิ่มขึ้นเข้าไปมา โดยเฉพาะถ้ามีการหลอมฟู จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอย่างรวดเร็วมาก โดยมีการเพิ่มและลดความต้านทานอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ DTA/TG ซึ่งพบว่าตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นต้นไปจนถึง 840 องศาเซลเซียส สารตัวอย่างมีน้ำหนักลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจเกิดจาก การหลอมรวมกันของสารตัวอย่าง

ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าความต้านทานที่มีการลดลงและเพิ่มขึ้นเข้าไปมานี้ เป็นตัวบ่งชี้ว่าสารตัวอย่างมีการหลอมรวมกัน

โดยลักษณะของชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนแล้วให้เย็นตัวลงในอุณหภูมิต่างๆเป็นดังรูป 4.4

สำหรับ (ก) ชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส โดยชุดสารตัวอย่างมีการหดตัวขนาดเล็กสุด

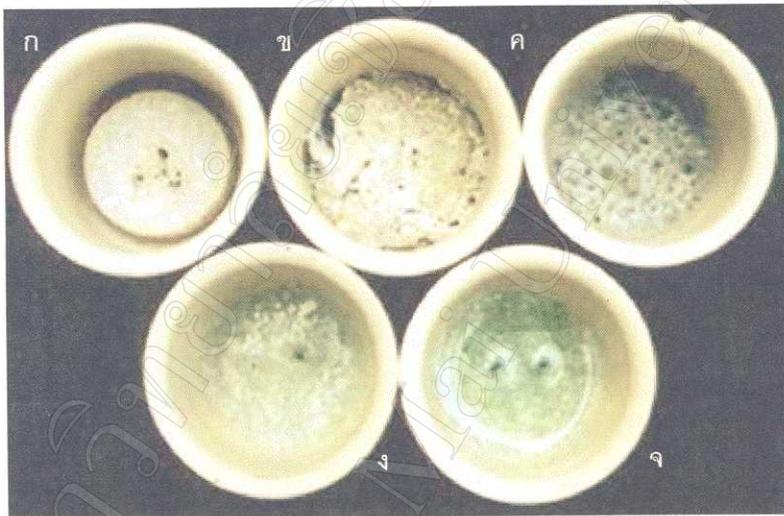
สำหรับ (ข) ชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยชุดสารตัวอย่างมี

สีขาวขุ่นปนเหลือง และมีการขยายตัวเต็มถ้วยเซรามิกส์รวมถึงมีการหลอมเกิดขึ้น

สำหรับ (ค) ชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 860 องศาเซลเซียส โดยชุดสารตัวอย่างมีสีเทา แข็ง และมีฟองอากาศเกิดขึ้นอย่างมากและมีการหลอมรวมกันมากขึ้น

สำหรับ (ง) ชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 960 องศาเซลเซียส โดยชุดสารตัวอย่างมีสีเขียวอ่อน ไม่แวววาว ยังคงมีฟองอากาศอยู่และมีการหลอมรวมกันมากขึ้น

สำหรับ (จ) ชุดสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยชุดสารตัวอย่างมีสีเขียวอ่อน ใส แวววาว มีฟองอากาศและมีรอยแตกในเนื้อกลาง

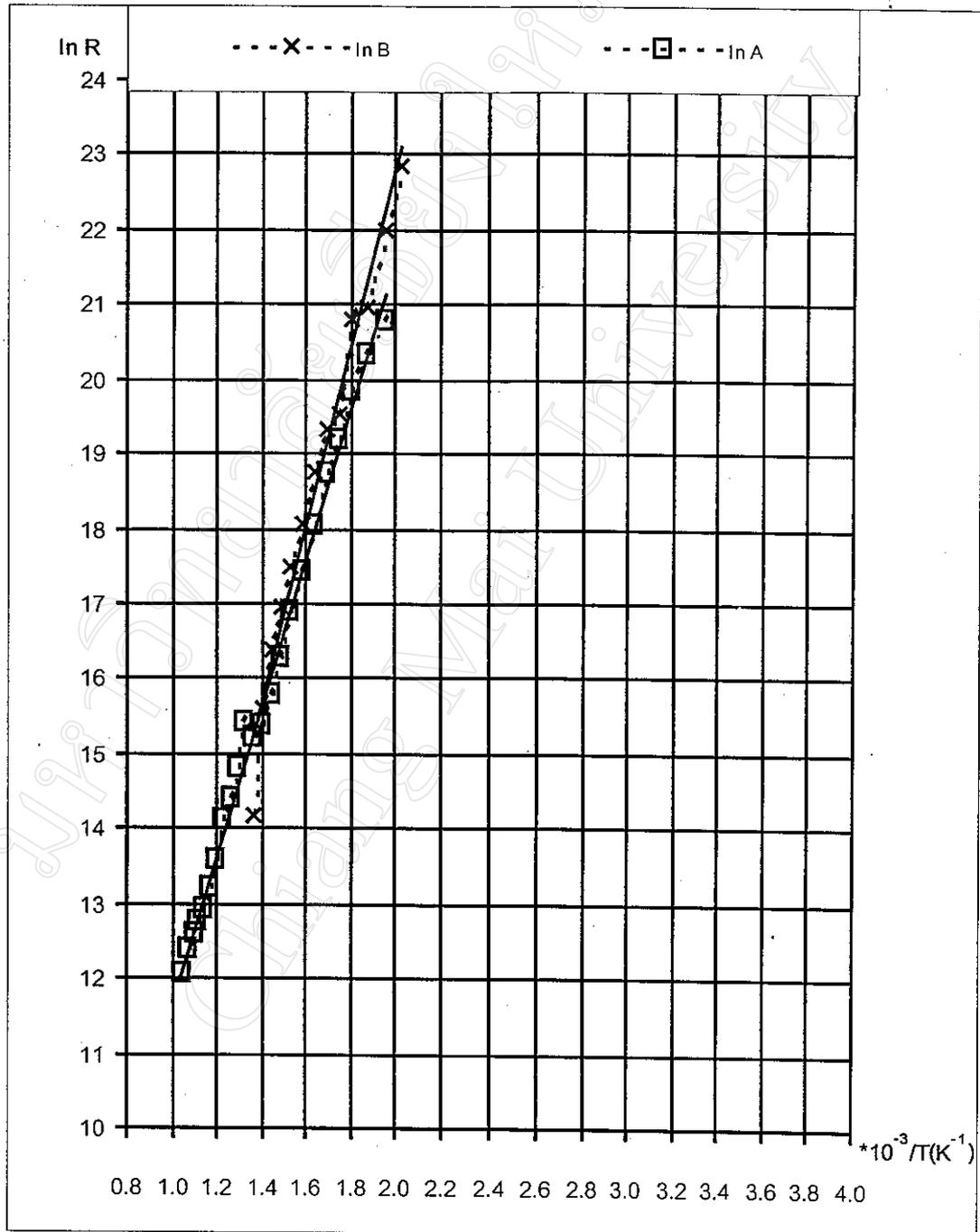


รูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  
(ก) 660 °C (ข) 700 °C (ค) 860 °C (ง) 960 °C (จ) 1100 °C

#### 4.1.2 การหาค่าพลังงานกระตุ้น

สำหรับชุดสารตัวอย่าง A และ B เมื่อทำการหลอม จากนั้นกำหนดให้เย็นตัวโดยมีอัตราการเย็นตัวต่างกัน โดยสารตัวอย่าง A มีอัตราการเย็นตัวเป็น 15 องศาเซลเซียส /นาทึ่และสารตัวอย่าง B เป็น 0.8 องศาเซลเซียส /นาทึ่ เมื่อสารตัวอย่างทั้งสองชุด เย็นตัวเป็นกลางแล้ว นำกลาง A และ B มาให้ความร้อน โดยวัดค่าความต้านทานไปพร้อมกันด้วย เพื่อที่จะหาพลังงานกระตุ้น โดยมีผลการทดลองดังตาราง 4.4

เมื่อพิจารณาเฉพาะอัตราของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เป็นเส้นตรง และเขียนกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  เพื่อหาพลังงานกระตุ้น จะได้กราฟดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  ของกลาส A และ B

จากรูป 4.5 สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้จาก

$$\begin{aligned} \text{พลังงานกระตุ้น} &= \text{ความชัน} \times h \\ &= \text{ความชัน} \times 8.6287 \times 10^{-5} \text{ eV} \end{aligned}$$

สำหรับกลาส A มีความชันเท่ากับ  $9.957 \times 10^3$  ดังนั้นจึงมีพลังงานกระตุ้นเป็น 0.86 eV

สำหรับกลาส B มีความชันเท่ากับ  $11.808 \times 10^3$  ดังนั้นจึงมีพลังงานกระตุ้นเป็น 1.02 eV

ซึ่งนำมาเขียนได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงพลังงานกระตุ้นของกลาส A และ B

กลาส	อัตราการเย็นตัว °C/นาท	ความชัน	พลังงานกระตุ้น (eV)
A	15	$9.957 \times 10^3$	0.86
B	0.8	$11.808 \times 10^3$	1.02

#### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับกลาส A และ B ที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน อัตราส่วนเดียวกัน แต่กำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวต่างกัน โดยกลาส A มีอัตราการเย็นตัว 15 องศาเซลเซียส /นาท มีค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 0.86 eV และสำหรับกลาส B มีอัตราการเย็นตัว 0.8 องศาเซลเซียส /นาท ซึ่งช้ากว่ากลาส A มีค่าพลังงานกระตุ้นเป็น 1.02 eV

จากค่าพลังงานกระตุ้น สามารถบอกได้ว่า กลาส B ต้องใช้พลังงานกระตุ้นให้แคทไอออนเคลื่อนที่เพื่อนำไฟฟ้ามากกว่า กลาส A ซึ่งน่าจะเกิดจาก กลาส B ซึ่งกำหนดให้เกิด อัตราการเย็นตัวช้า จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวของไอออนได้เป็นระเบียบกว่า มีโครงสร้างแน่น ทำให้แคทไอออนเคลื่อนที่ได้ยาก จึงต้องใช้พลังงานมากเพื่อให้ไอออนเคลื่อนที่ ซึ่งต่างจากกลาส A ที่กำหนดให้เกิดอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไอออนจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีโครงสร้างเปิด ส่งผลทำให้แคทไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกกว่า ดังนั้นเมื่อให้พลังงานกระตุ้นเพียงนิดเดียว ก็ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น

## 4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองชุดที่ 2

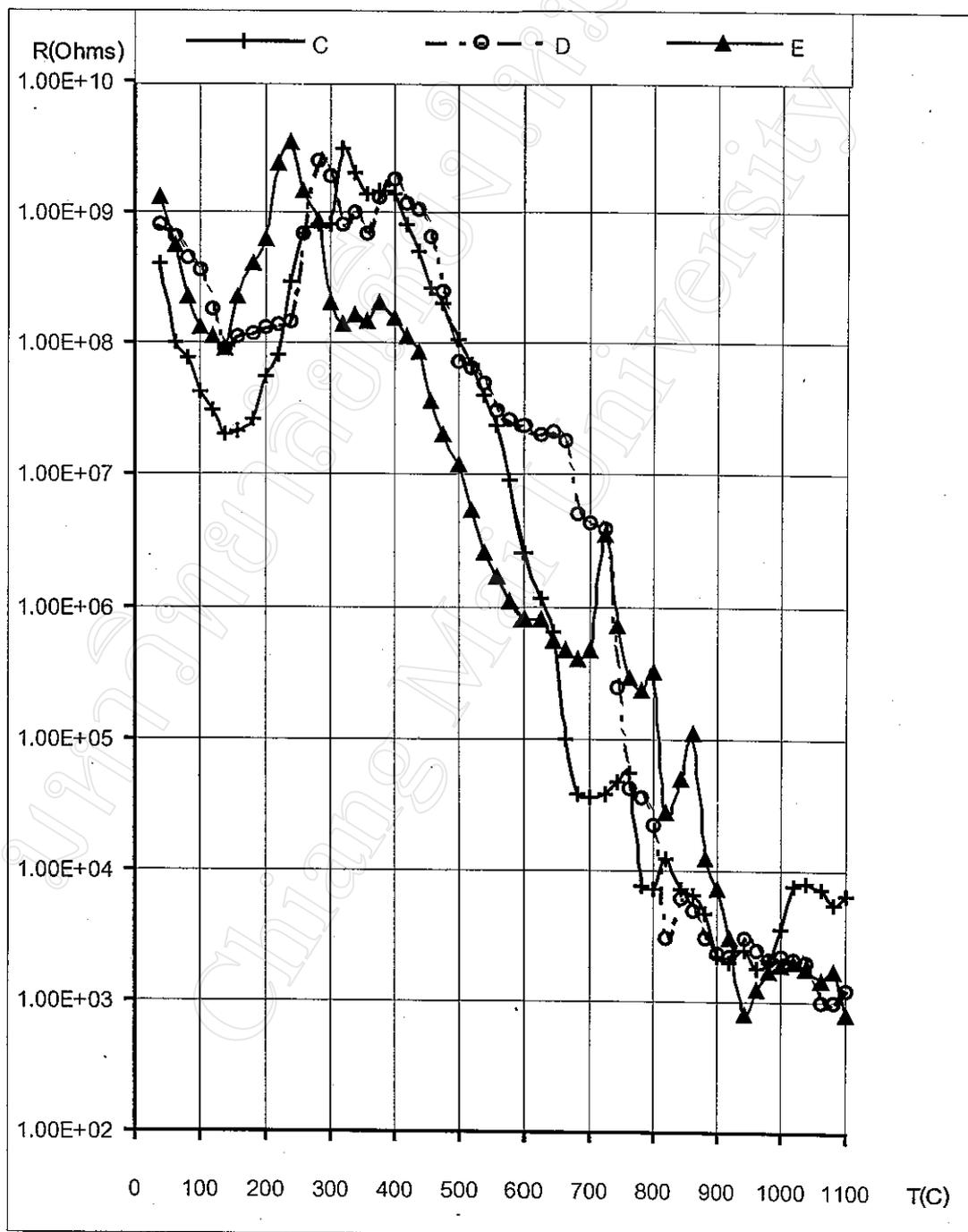
### 4.2.1 การเปลี่ยนแปลงของชุดสารตัวอย่างชุดที่ 2 เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง

สำหรับชุดสารตัวอย่าง C D E F G H ที่มีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน มีความต้านทานเปลี่ยนไปเมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ดังตาราง 4.6 เมื่อนำผลการทดลองของชุดสารตัวอย่าง C D E มาเขียนกราฟระหว่างความต้านทาน ( $R$ ) กับ อุณหภูมิ ( $T$ ) จะได้กราฟดังรูป 4.6

#### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับชุดสารตัวอย่าง C D E ซึ่งมีองค์ประกอบของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ในอัตราส่วนเดียวกัน คือ 45.5% และ 16% โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่มีเลดออกไซด์ ( $\text{PbO}$ ) ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 28.5% 8.5% และ 0% โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าในช่วงแรก ชุดสารตัวอย่างทั้งสาม มีการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) อย่างต่อเนื่อง จนถึงอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยดูจากความต้านทานที่ลดลง เทียบกับผลการทดลองในชุดที่ 1

จากนั้นชุดสารตัวอย่างทั้งสาม จะมีความต้านทานลดลงอย่างต่อเนื่องอีกครั้ง โดยมีความต้านทานลดลงต่ำสุดก่อนที่จะมีการเปลี่ยนความต้านทาน เป็น 800 820 และ 940 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการทดลองชุดที่ 1 ของสารตัวอย่าง A และ B สามารถบอกได้ว่าชุดสารตัวอย่าง C D E มีการหดตัวลงเรื่อยๆ ความต้านทานขณะนี้จึงลดต่ำลง จนกระทั่งสารตัวอย่างหดตัวเล็กที่สุด ความต้านทานจะลดลงต่ำสุด ซึ่งเมื่อสารตัวอย่างเริ่มขยายตัว และเริ่มเกิดการหลอม ความต้านทานจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถคาดคะเนได้ว่าชุดสารตัวอย่าง C D E เริ่มมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 800 820 และ 940 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นสารตัวอย่างทั้งสาม จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานโดยมีการเพิ่มขึ้นและลดลงซ้ำไปมา โดยสามารถคาดคะเนได้ว่าชุดสารตัวอย่างกำลังหลอมเหลว



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟระหว่างความต้านทานของชุดสารตัวอย่าง CDE กับอุณหภูมิ

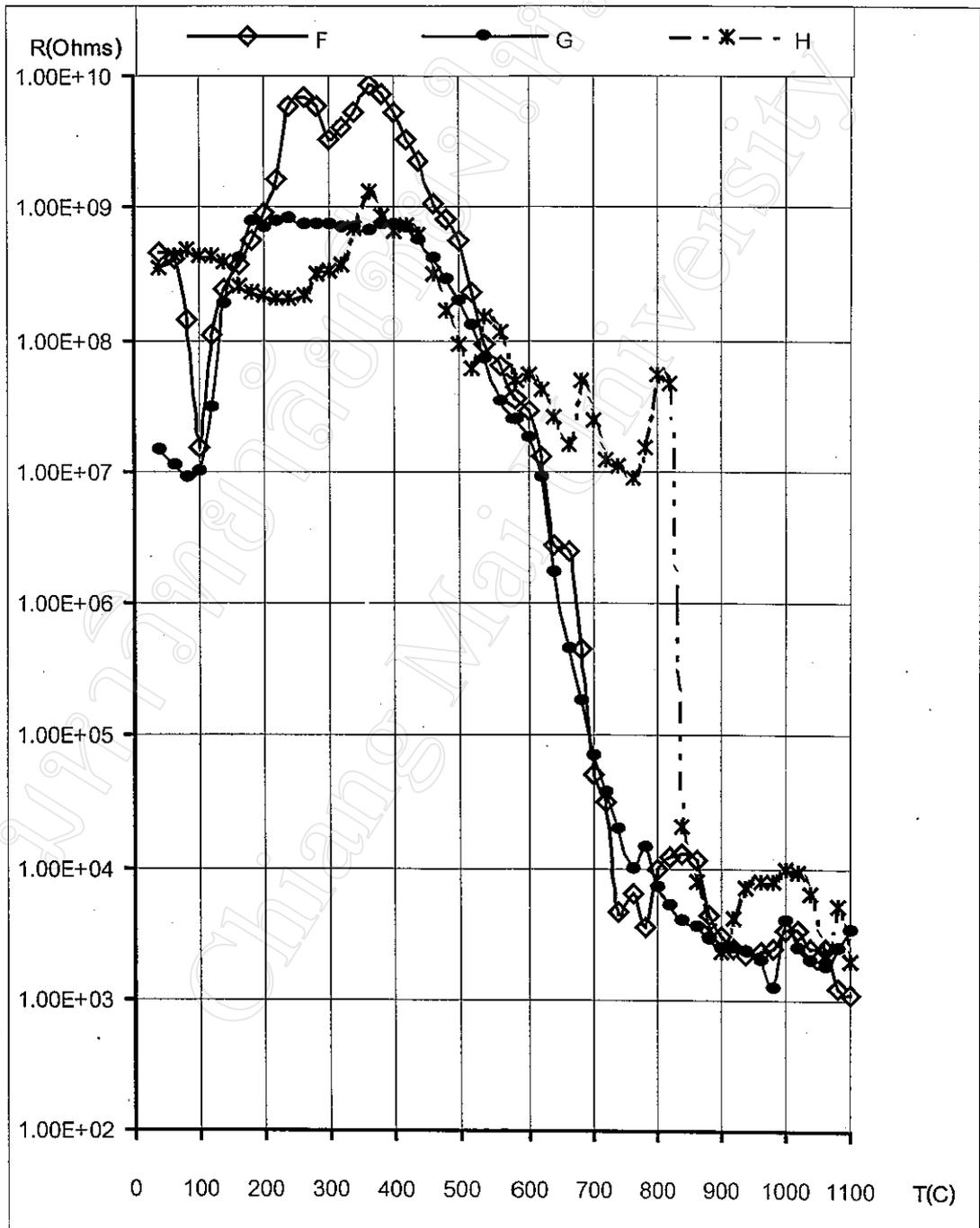
เมื่อนำผลการทดลองของชุดสารตัวอย่าง F G H มาเขียนกราฟระหว่างความต้านทาน ( $R$ ) กับอุณหภูมิ ( $T$ ) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7

#### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟรูป 4.7 แสดงความต้านทานที่เปลี่ยนไปของชุดสารตัวอย่าง F G H ซึ่งมีองค์ประกอบของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ เลดออกไซด์ ( $\text{PbO}$ ) ในอัตราส่วนเดียวกันคือ 45.5% และ 38.5% โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่มี โปตัสเซียมคาร์บอเนต ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 6% 2% และ 0% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งพบว่าในช่วงแรกชุดสารตัวอย่าง F และ G มีความต้านทานลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิ 100 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่สำหรับชุดสารตัวอย่าง H ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอย่างชัดเจนเหมือนในชุดสารตัวอย่าง F และ G ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของโปตัสเซียมคาร์บอเนต ในแต่ละชุดสารตัวอย่าง

โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองชุดที่ 1 ของสารตัวอย่าง A และ B สามารถบอกได้ว่า ชุดสารตัวอย่าง F และ G มีการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่อุณหภูมิ 100 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่สำหรับชุดสารตัวอย่าง H ไม่มีโปตัสเซียมคาร์บอเนตในองค์ประกอบ จึงไม่มีการสลายคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอย่างชัดเจนเหมือนชุดสารตัวอย่าง F และ G

สำหรับในช่วงที่ 2 ชุดสารตัวอย่าง F G และ H มีความต้านทานลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีค่าต่ำสุดก่อนที่จะเปลี่ยนแปลงเป็น 740 760 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการทดลองชุดที่ 1 สามารถคาดคะเนได้ว่า ชุดสารตัวอย่าง F G และ H เริ่มหลอมที่อุณหภูมิ 740 760 และ 900 องศาเซลเซียส จากนั้นชุดสารตัวอย่างจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้น และลดลงซ้ำไปมาในช่วงที่ 3 โดยคาดคะเนได้ว่าชุดสารตัวอย่างกำลังหลอมเหลว



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟระหว่างความต้านทานของชุดสารตัวอย่าง F G H กับอุณหภูมิ

#### 4.2.2 การหาค่าพลังงานกระตุ้น

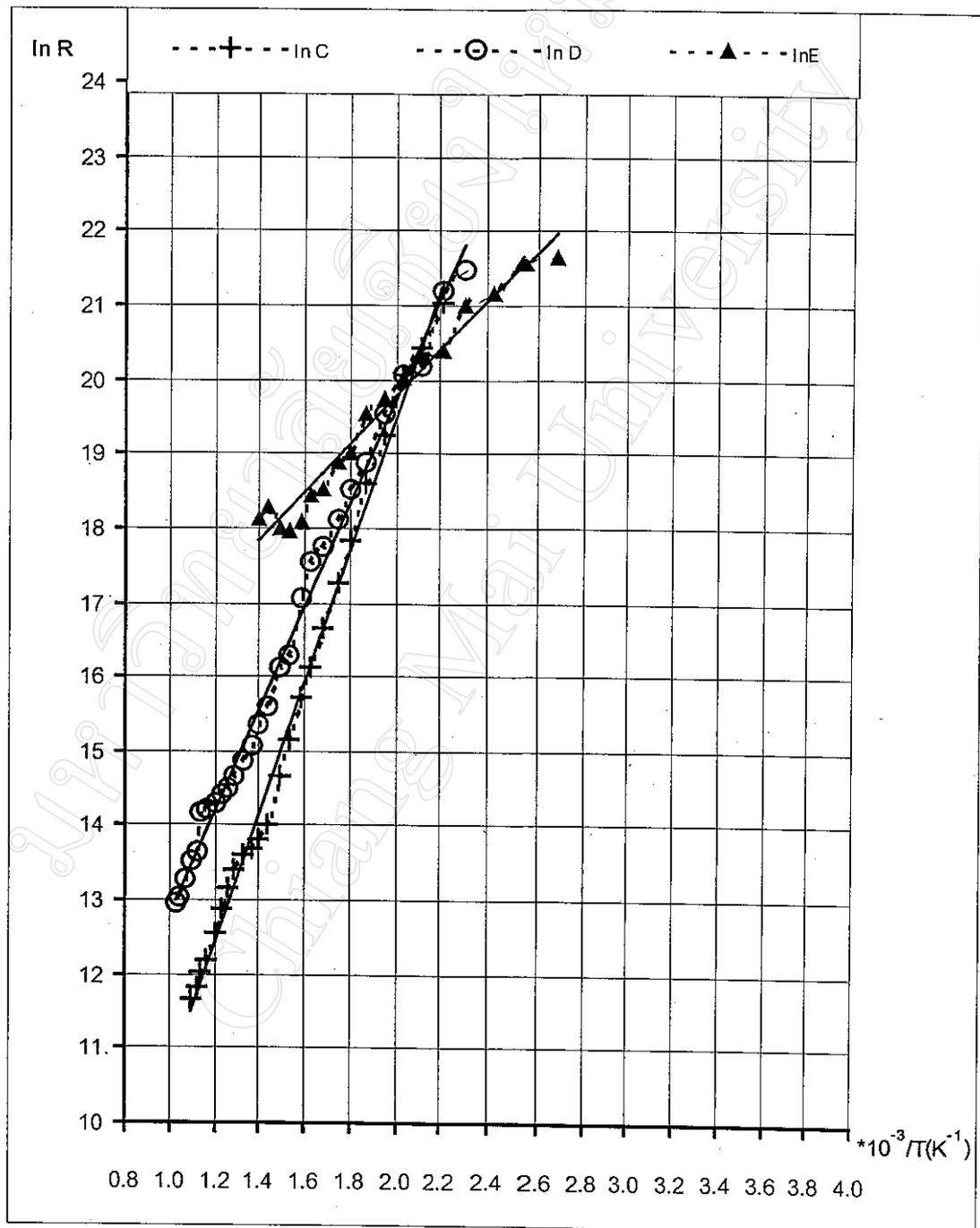
สำหรับชุดสารตัวอย่างชุดที่ 2 ซึ่งมีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน เมื่อทำการหลอมเหลวและปล่อยให้เย็นตัวเป็นแก้ว โดยกำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวเท่ากันคือ 15 องศาเซลเซียส/นาที จากนั้นนำแก้วที่ได้มาให้ความร้อน แล้ววัดค่าความต้านทานเพื่อที่จะหาพลังงานกระตุ้น โดยมีผลการทดลองดังตาราง 4.7

เมื่อพิจารณาเฉพาะอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เป็นเส้นตรง และเขียนกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  เพื่อหาพลังงานกระตุ้น จะได้ดังรูป 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

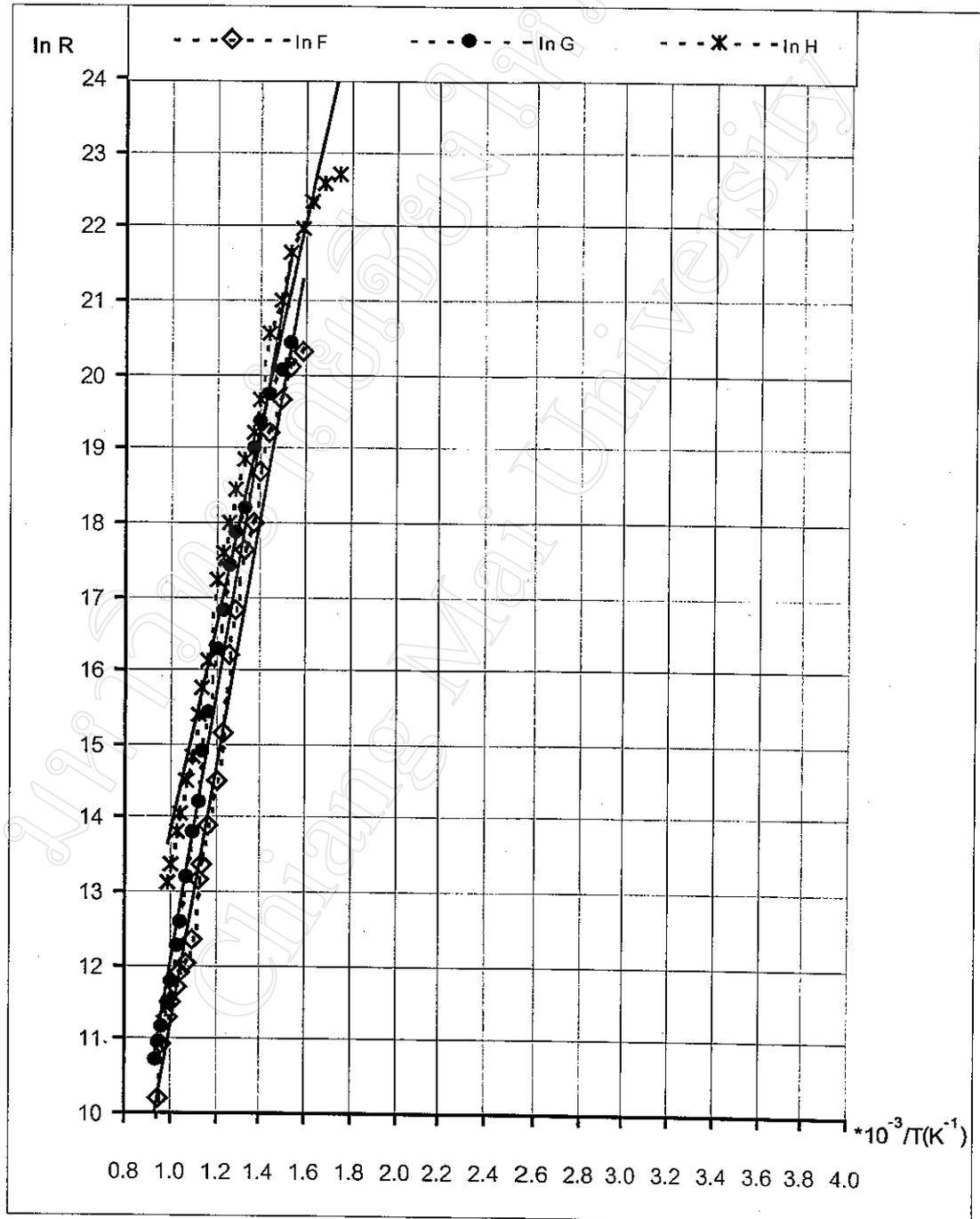
จากรูปกราฟ 4.8 และ 4.9 สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นของแก้ว C D E F G และ H ได้ดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นในแก้ว C D E F G และ H ซึ่งมีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน

แก้ว	องค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)			ความชื้น	พลังงานกระตุ้น(eV)
	SiO <sub>2</sub>	PbO	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		
C	45.5	28.5	16	$8.776 \times 10^3$	0.76
D	45.5	8.5	16	$6.870 \times 10^3$	0.59
E	45.5	0	16	$3.249 \times 10^3$	0.28
F	45.5	38.5	6	$17.358 \times 10^3$	1.49
G	45.5	38.5	2	$17.886 \times 10^3$	1.54
H	45.5	38.5	0	$13.810 \times 10^3$	1.19



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  ของกลาด C D E



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  ของกลาส FGH

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับกลาส C D E F G H ที่มีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน พบว่าจะมีค่าพลังงานกระตุ้นต่างกัน โดยสำหรับกลาสชุด C D E ซึ่งมีองค์ประกอบอื่นในอัตราส่วนเท่ากัน แต่มีเลดออกไซด์ (PbO) ในอัตราส่วนต่างกัน พบว่ากลาสที่มีองค์ประกอบของเลดออกไซด์ปริมาณมาก จะมีค่าพลังงานกระตุ้นมากกว่ากลาสที่มีองค์ประกอบของเลดออกไซด์น้อย ซึ่งหมายความว่ากลาสที่มีองค์ประกอบของเลดออกไซด์มากต้องใช้พลังงานมากเพื่อให้แคทไอออนเคลื่อนที่ เนื่องจากเลดไอออนมีขนาดใหญ่ จึงไปบังโฮล ทำให้แคทไอออนเคลื่อนที่ได้ยาก ซึ่งถ้ามีเลดไอออนจำนวนมาก จะทำให้แคทไอออนเคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น สำหรับกลาส E ที่ไม่มีเลดออกไซด์ เป็นองค์ประกอบเลย พบว่ามีพลังงานกระตุ้น 0.28 eV ซึ่งใช้พลังงานเพียง 0.28 eV ก็สามารถทำให้แคทไอออนเคลื่อนที่เพื่อนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากไม่มีเลดไอออนมากีดขวางการเคลื่อนที่ของแคทไอออน

สำหรับกลาสชุด F G H ซึ่งมีองค์ประกอบอื่นในอัตราส่วนเท่ากัน แต่มีโปตัสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) ในอัตราส่วนต่างกัน พบว่า กลาสที่มีองค์ประกอบของโปตัสเซียมคาร์บอเนตมากจะมีค่าพลังงานกระตุ้นน้อยกว่ากลาสที่มีองค์ประกอบของโปตัสเซียมคาร์บอเนตน้อย เนื่องจากกลาสที่มีองค์ประกอบของโปตัสเซียมคาร์บอเนตมาก จะมีปริมาณของแคทไอออนมาก จึงต้องการพลังงานน้อย เพื่อให้แคทไอออนเคลื่อนที่

สำหรับกลาส H ซึ่งไม่มีโปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ พบว่ามีความต้านทานลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงมีการนำไฟฟ้า โดยกระบวนการนำไฟฟ้านี้ไม่ได้เกิดจากการเคลื่อนที่ของโปตัสเซียมไอออน ซึ่งเป็นแคทไอออนอิสระ และพบว่าต้องใช้พลังงานกระตุ้นถึง 1.19 eV จึงสามารถนำไฟฟ้า

### 4.3 เปรียบเทียบผลการทดลอง

#### 4.3.1 เปรียบเทียบผลการทดลองของสารตัวอย่างทั้ง 2 ชุด

จากผลการทดลองของชุดสารตัวอย่างทั้ง 2 ชุด ซึ่งมีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน โดยให้ความร้อนจนกระทั่งหลอมเหลวและกำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวเท่ากัน ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารตัวอย่างที่มีต่ออุณหภูมิ มีความแตกต่างกันอยู่ 2 ประการคือ

1. ความต้านทานของสารตัวอย่างลดลงในช่วงแรก สำหรับสารตัวอย่างที่มีโปตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ โดยสามารถประมาณได้ว่าเป็นการสลายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์

2. อุณหภูมิที่ความต้านทานของสารตัวอย่างลดลงต่ำสุดในช่วงที่ 2 โดยสามารถประมาณได้ว่าเป็นอุณหภูมิเริ่มหลอมเหลว โดยมีความแตกต่างกันขึ้นกับองค์ประกอบของสารตัวอย่างนั้น ซึ่งสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ดังตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานที่ลดต่ำของชุดสารตัวอย่าง ทั้ง 2 ช่วง

ชุดสาร ตัวอย่าง	องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)			อุณหภูมิที่มีการสลายตัว ของ CO <sub>2</sub> (°C)	อุณหภูมิที่เริ่มมีการ หลอมเหลว (°C)
	SiO <sub>2</sub>	PbO	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		
A	45.5	38.5	16	140	720
C	45.5	28.5	16	140	800
D	45.5	8.5	16	140	820
E	45.5	0	16	140	940
F	45.5	38.5	6	100	740
G	45.5	38.5	2	80	760
H	45.5	38.5	0	-	900

#### 4.3.2 เปรียบเทียบลักษณะของกลาสตัวอย่างทั้ง 2 ชุด

เมื่อให้ความร้อนกับชุดสารตัวอย่างจนกระทั่งหลอมเหลว และให้เย็นตัวเพื่อกลายเป็นกลาส จะได้กลาสที่มีสีและลักษณะ ดังตาราง 4.10

จากตาราง 4.10 จะเห็นได้ว่า สี และลักษณะของเลด ซิลิเกต กลาส ที่มีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกันจะมีลักษณะต่างกัน ดังนั้นองค์ประกอบจึงมีอิทธิพลต่อสี และลักษณะทางกายภาพของกลาส

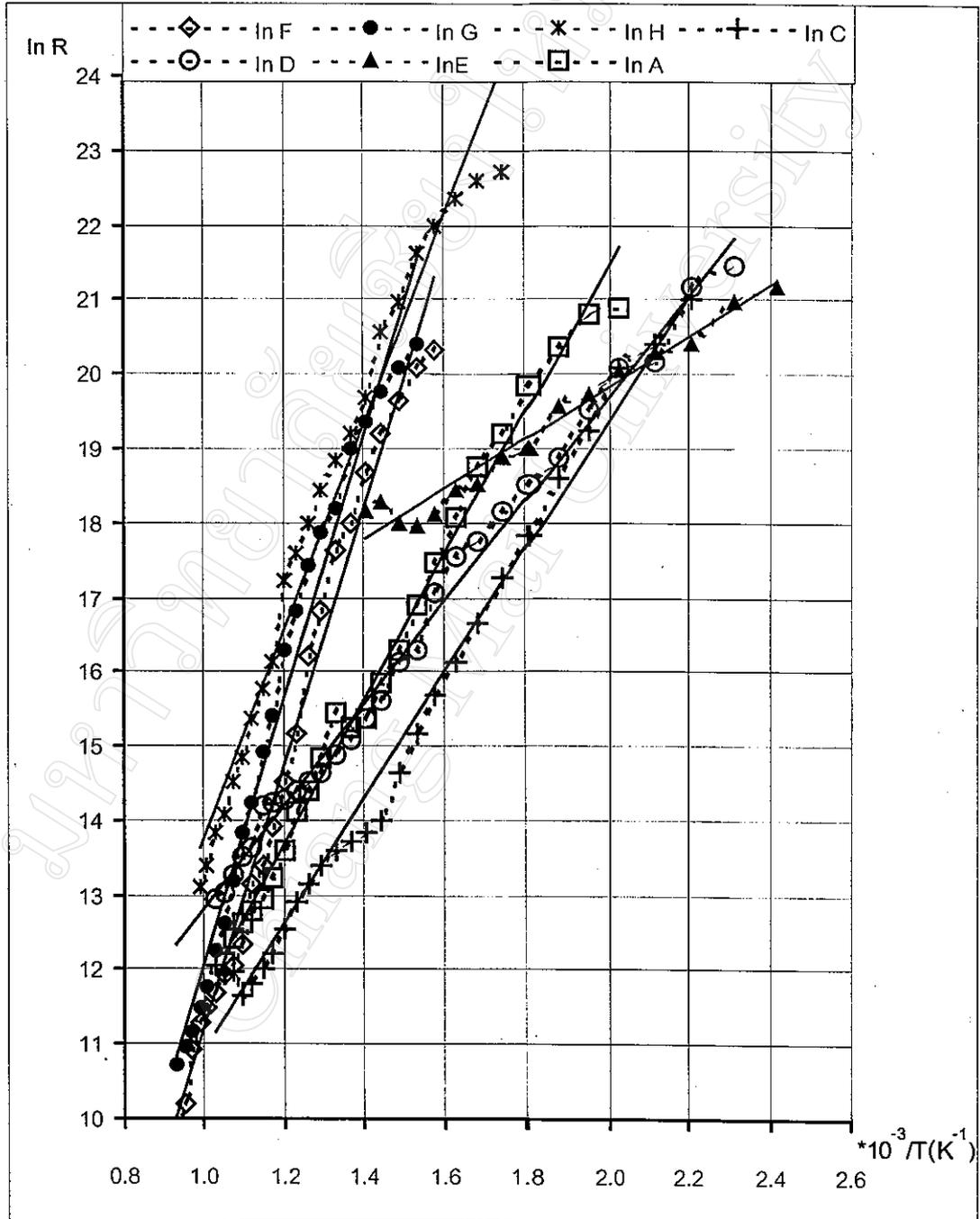
#### 4.3.3 เปรียบเทียบกราฟระหว่าง $\ln R$ กับ $1/T$ ของกลาสตัวอย่างทั้ง 2 ชุด

สำหรับกลาส A C D E F G และ H ที่มีองค์ประกอบต่างกัน จะมีความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิต่างกันดังรูปที่ 4.10

จากกราฟรูป 4.10 จะเห็นได้ว่า องค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกันของ เลด ซิลิเกต กลาส จะมีผลต่อความต้านทาน โดยความต้านทานนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนแคทไอออนที่สามารถเคลื่อนที่ในโครงสร้างเครือข่ายของซิลิกาได้ ซึ่งพบว่ากลาสที่มีแคทไอออนในปริมาณมากจะมีความต้านทานน้อยกว่ากลาสที่มีแคทไอออนปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของกลาส ซึ่งมีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน

ชุดสาร ตัวอย่าง	องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)			ลักษณะกลาส
	SiO <sub>2</sub>	PbO	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
A	45.5	38.5	16	 สีเขียว ใส แวววาว
C	45.5	28.5	16	 สีขาวเจือ เขียว ใส แวววาว
D	45.5	8.5	16	 สีขาว ใส แวววาว
E	45.5	0	16	 สีขาวขุ่น เจือเทา ฟู่ เปราะ
F	45.5	38.5	6	 สีเขียว แวววาว
G	45.5	38.5	2	 สีขาวขุ่น แข็ง
H	45.5	38.5	0	 สีเหลือง หกลมไม่ หมด แข็ง



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟระหว่าง  $\ln R$  กับ  $1/T$  ของกลาสในอัตราส่วนต่างๆ

#### 4.3.4 เปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นของกลาสตัวอย่างทั้ง 2 ชุด

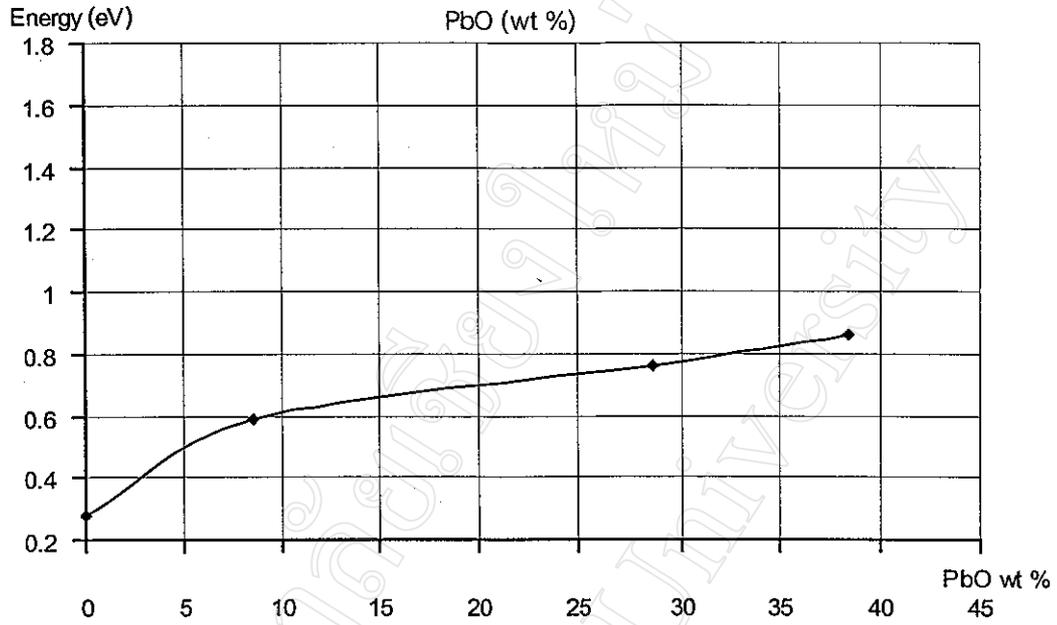
พลังงานกระตุ้นของกลาสจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนองค์ประกอบในกลาส ดังตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานกระตุ้นในกลาส ที่มีองค์ประกอบในอัตราส่วนต่างกัน

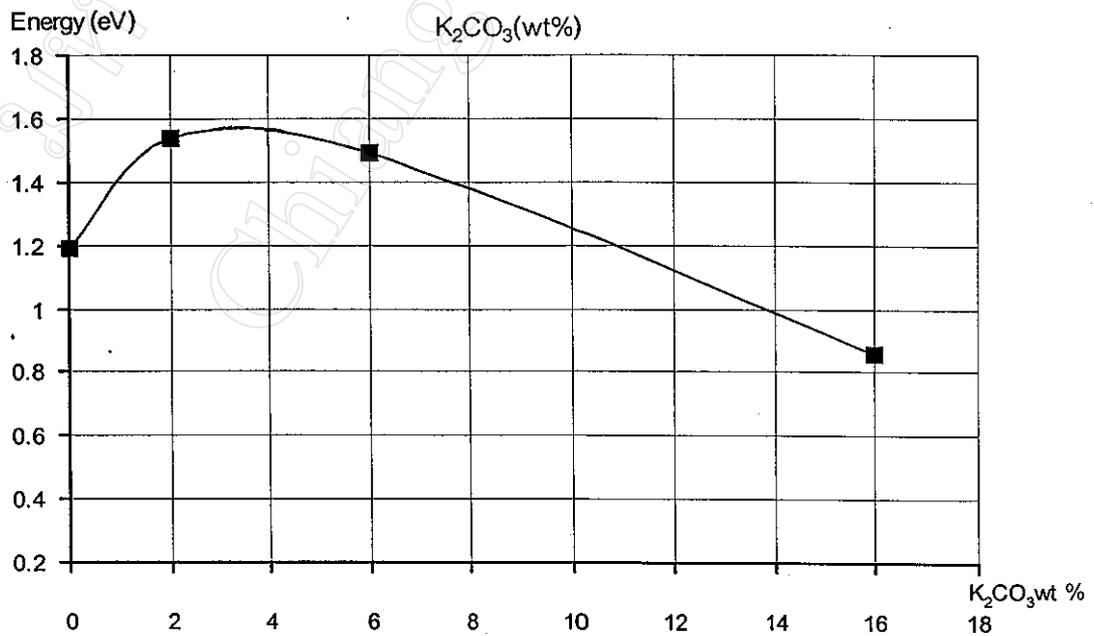
ชุดสาร ตัวอย่าง	องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)			พลังงานกระตุ้น (eV)
	SiO <sub>2</sub>	PbO	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
A	45.5	38.5	16	0.86
C	45.5	28.5	16	0.76
D	45.5	8.5	16	0.59
E	45.5	0	16	0.28
F	45.5	38.5	6	1.49
G	45.5	38.5	2	1.54
H	45.5	38.5	0	1.19

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้นของกลาส A C D E (โดยมีองค์ประกอบอื่นในอัตราส่วนที่เท่ากัน แต่มีเลดออกไซด์ในอัตราส่วนต่างกัน) กับ เลดออกไซด์ % โดยน้ำหนัก จะได้กราฟดังรูป 4.11

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้นของกลาส A F G H (โดยมีองค์ประกอบอื่นในอัตราส่วนที่เท่ากัน แต่มีโปตัสเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนต่างกัน) กับ โปตัสเซียมคาร์บอเนต % โดยน้ำหนัก จะได้กราฟดังรูป 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นของกลาส กับ PbO % โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นของกลาส กับ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> % โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไป

จากรูปภาพ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณของเลดออกไซด์ เพิ่มขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้น มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเลดไอออนไปบังโฮล ดังนั้นเมื่อมีเลดไอออนจำนวนมาก จะทำให้โปรตัสเซียมไอออน เคลื่อนที่ได้ยากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากขึ้น

จากรูปภาพ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณของโปรตัสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้นมีแนวโน้มที่จะลดลงตาม เนื่องจากโปรตัสเซียมไอออนที่เข้มข้นขึ้น ทำให้มีแคทไอออน ในการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ส่งผลให้ต้องการพลังงานกระตุ้นน้อยลง

สำหรับกลาสที่ไม่มีโปรตัสเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ จึงไม่มีโปรตัสเซียมไอออนซึ่งเป็นแคทไอออนอิสระ ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่เป็นการนำไฟฟ้าโดยโปรตัสเซียมไอออน