



ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตแผ่นรองรับอะลูมินาใช้งานไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้ทำการศึกษาและมีผลการทดลองวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

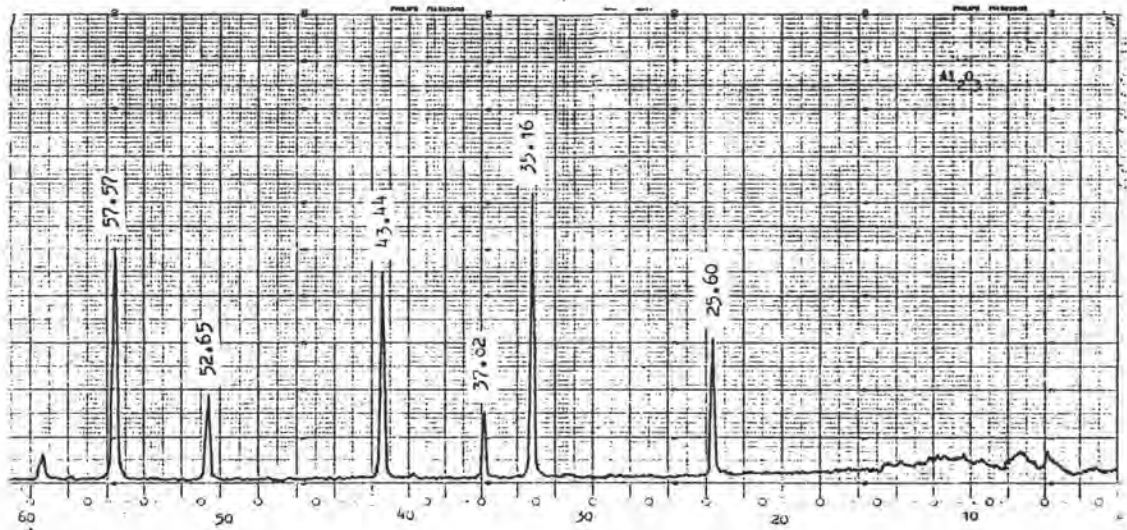
4.1.1 ผลการตรวจเฟส

จากการตรวจเฟสของสารอะลูมินา ดังรูปภาพที่ 34 (ก) และของสารแมกนีเซีย (MgO) ดังภาพที่ 34 (ข) จะเห็นว่าพีคที่ปรากฏในภาพที่ 34 (ก) มีพีคที่มีความเข้มสูงสุด ที่มุม 2θ เท่ากับ 35.16 องศา และพีคที่มีความเข้มรองลงมา คือ 57.57 43.44 25.60 52.60 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นเฟสของแอลฟาอะลูมินา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ตรงกับข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากร้านค้าว่าเป็น แอลฟาอะลูมินา (ดูรายละเอียดในภาคผนวก File No 10-173) และจากพีคที่ปรากฏในภาพที่ 34 (ข) จะเห็นว่า พีคที่มีความเข้มสูงสุด ที่มุม 2θ เท่ากับ 42.9 องศา และพีคที่มีความเข้มรองลงมา คือ 36.95 องศา ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเป็นเฟสของสารแมกนีเซีย (MgO) เป็นอันว่าสารเริ่มต้นทั้งสองชนิดถูกต้องตามต้องการของการทำการศึกษาวิจัยในเรื่องนี้ (ดูรายละเอียดในภาคผนวก File No 4-0829)

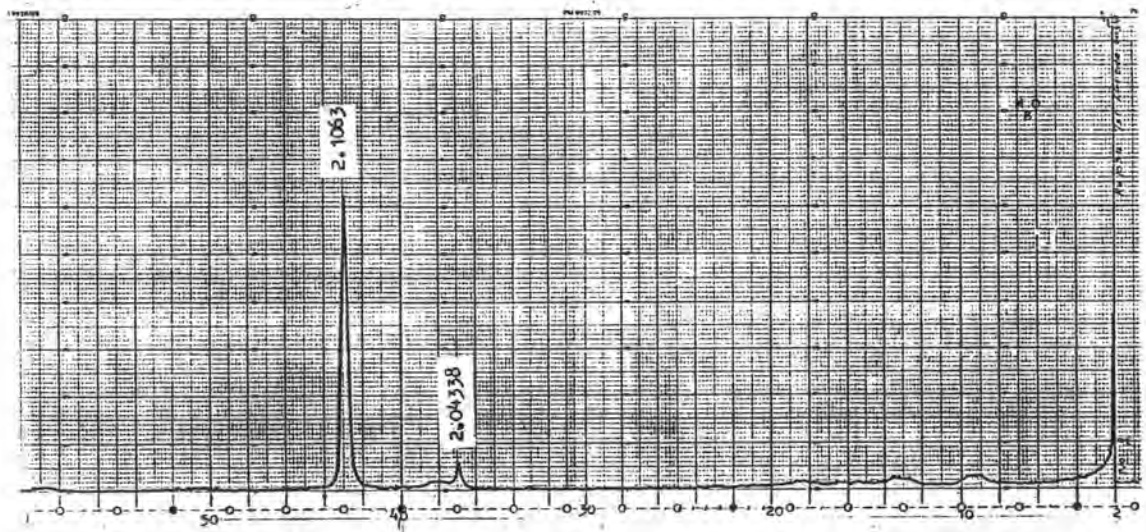
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี

จากการศึกษาพบว่าสารอะลูมินาที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ มีส่วนประกอบของอะลูมินาถึง 99.543 เปอร์เซ็นต์ และมีสิ่งเจือปนเล็กน้อย คือ ซิลิกา 0.330 เปอร์เซ็นต์

เพอร์ริคออกไซด์ 0.046 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียมออกไซด์ 0.030 เปอร์เซ็นต์ (ดูรายละเอียดในภาคผนวกผลเอ็กซ์เรย์ ฟลูออ เรสเซนส์) เมื่อเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ได้จาก AlCoa จะเห็นว่า Na_2O หายไป แต่มี CaO เพิ่มมา และตัวอื่นๆ ต่างกันเล็กน้อย



ก



ข

ภาพที่ 34 (ก) . เฟสของอะลูมินา (Al_2O_3)

(ข) เฟสของแมกนีเซียม (MgO)

4.1.3 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของสาร

4.1.3.1 การกระจายขนาดของสารอะลูมินา (Al_2O_3)

ตารางที่ 13 การกระจายขนาดของสารอะลูมินา

ขนาด ϕ (Diameter) (μm)	% ขนาดที่ละเอียดกว่า (Cumulative mass finer) %	% จำนวนที่มี (Mass in interval) %
50.00	100.0	0.7
40.00	98.5	1.5
30.00	95.4	3.1
25.00	92.9	2.6
20.00	89.3	3.6
15.00	84.8	4.4
10.00	78.2	6.6
8.00	72.0	6.2
6.00	60.7	11.3
5.00	51.9	8.8
4.00	40.2	11.7
3.00	26.2	14.0

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ขนาด ϕ (Diameter) (μm)	% ขนาดที่ละเอียดกว่า (Cumulative mass finer) %	% จำนวนที่มี (Mass in interval) %
2.00	13.8	12.4
1.50	9.3	4.6
1.00	5.9	3.3
0.80	5.9	0.0
0.60	6.4	0.5
0.50	6.1	0.3
0.40	5.4	0.7
0.30	5.1	0.3
0.20	5.1	0.0
0.10	6.1	1.0

จากข้อมูล จะเห็นว่า สารอะลูมินามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2-6 ไมโครเมตร คือมีขนาด 1-2 ไมโครเมตร 7.9 เปอร์เซ็นต์ ขนาด 8-80 ไมโครเมตร 29.9 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นอยู่ในช่วงขนาด 2-6 ไมโครเมตร ถึง 58.2 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้เป็อนุภาคขนาดที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 3 ไมโครเมตร คือ 14 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่ 2 ไมโครเมตร 12.4 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 4.82 ไมโครเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลของ Alcoa

4.1.3.2 การกระจายขนาดของสารแมกนีเซียม (MgO)

ตารางที่ 14 การกระจายขนาดของสารแมกนีเซียม

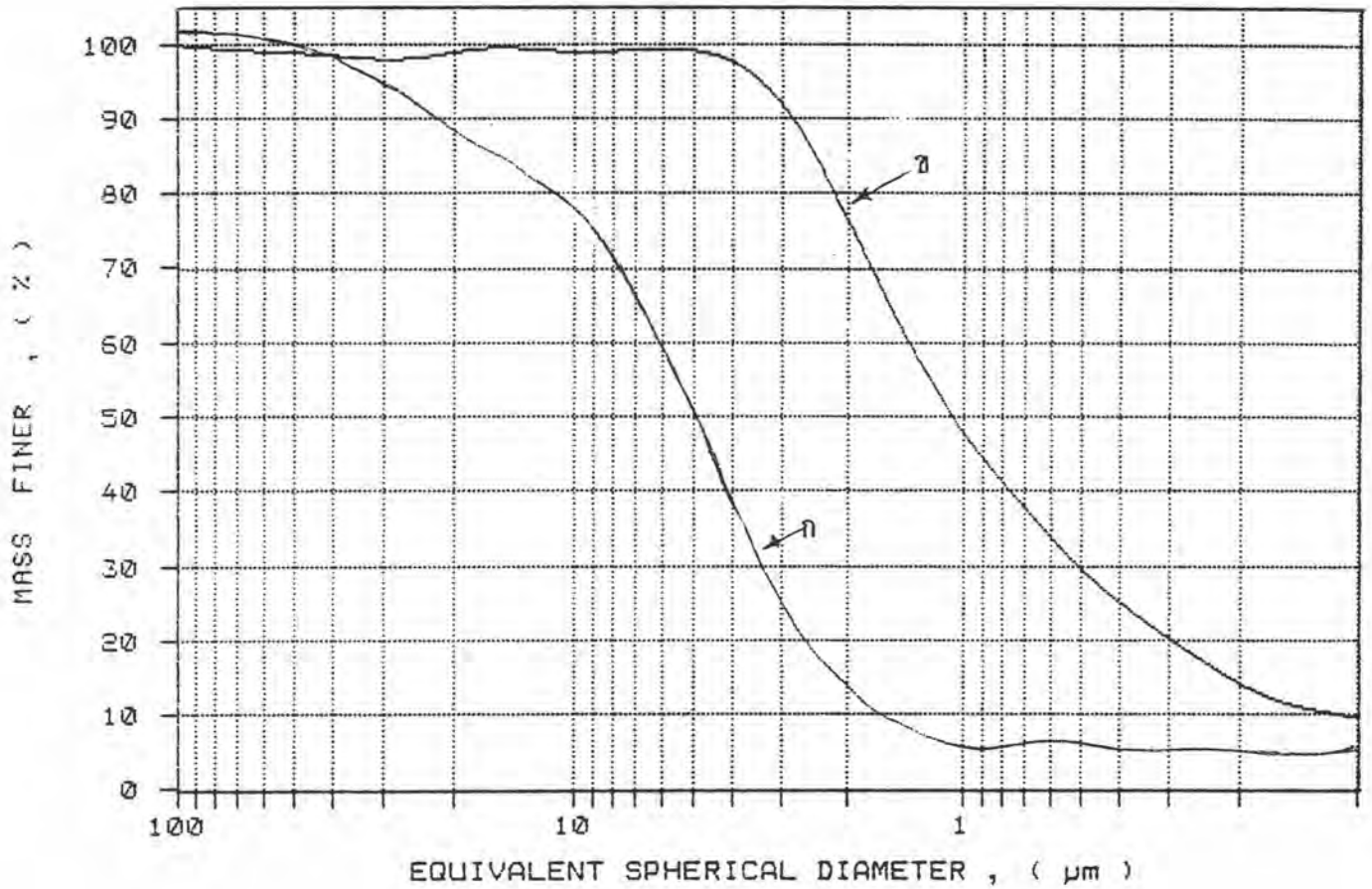
ขนาด ϕ (Diameter) (μm)	% ขนาดที่ละเอียดกว่า (Cumulative mass finer) %	% จำนวนที่มี (Mass in interval) %
100.00	99.8	0.2
80.00	99.3	0.5
60.00	98.9	0.4
50.00	98.7	0.2
40.00	98.3	0.4
30.00	97.9	0.4
25.00	98.1	0.2
20.00	98.8	0.8
15.00	99.4	0.6
10.00	98.9	0.5
8.00	99.0	0.1
6.00	99.2	0.3
5.00	99.0	0.2
4.00	97.4	1.6
3.00	91.7	5.7
2.00	76.1	15.6

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ขนาด ϕ (Diameter) (μm)	% ขนาดที่ละเอียดกว่า (Cumulative mass finer) %	% จำนวนที่มี (Mass in interval) %
1.50	63.2	12.9
1.00	47.5	15.7
0.80	41.1	6.4
0.60	33.7	7.4
0.50	29.4	4.3
0.40	25.0	4.4
0.30	20.2	4.8
0.20	14.1	6.1
0.10	9.5	4.7

จากข้อมูลข้างบนจะเห็นว่า สารแมกนีเซียม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ย อยู่ในช่วง 1-2 ไมโครเมตร ถึง 44.3 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร 38.1 เปอร์เซ็นต์ และขนาดโตกว่า 2 ไมโครเมตร 8.61 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคอยู่ที่ 1.08 ไมโครเมตร

จากข้อมูลการกระจายขนาดของสารอะลูมินา และแมกนีเซียม เขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 35 การกระจายขนาดของสาร

(ก) อะลูมินา

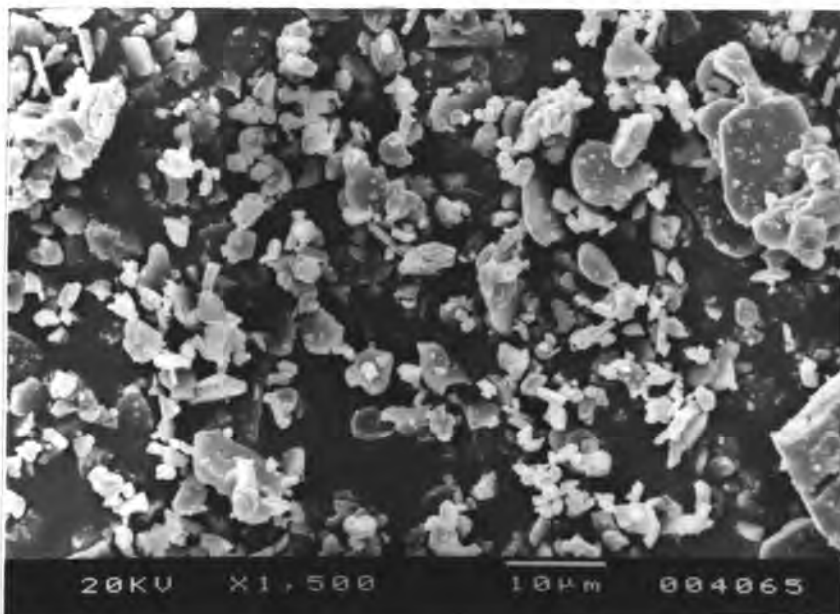
(ข) แมกนีเซียม

4.1.4 ผลการหาพื้นที่ผิวของสาร

จากการศึกษาพบว่า สารอะลูมินาที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1.22 ตารางเมตรต่อกรัม และสารแมกนีเซียมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 24.20 ตารางเมตรต่อกรัม

4.1.5 ผลการตรวจจุดจุลโครงสร้างของสารอะลูมินา

จากการศึกษาพบว่าผงอะลูมินามีขนาดตั้งแต่เล็กสุด 0.30 ไมโครเมตร จนถึงขนาดใหญ่สุด 50 ไมโครเมตร แต่ส่วนใหญ่อยู่ในระดับขนาด 2-6 ไมโครเมตร แสดงว่ามีการกระจายขนาดดีมาก ลักษณะอนุภาคเป็นหลายเหลี่ยม ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 จุลโครงสร้างของอะลูมินา



4.1.6 ผลการหาค่าความเป็นกรด/ด่าง pH ของสาร

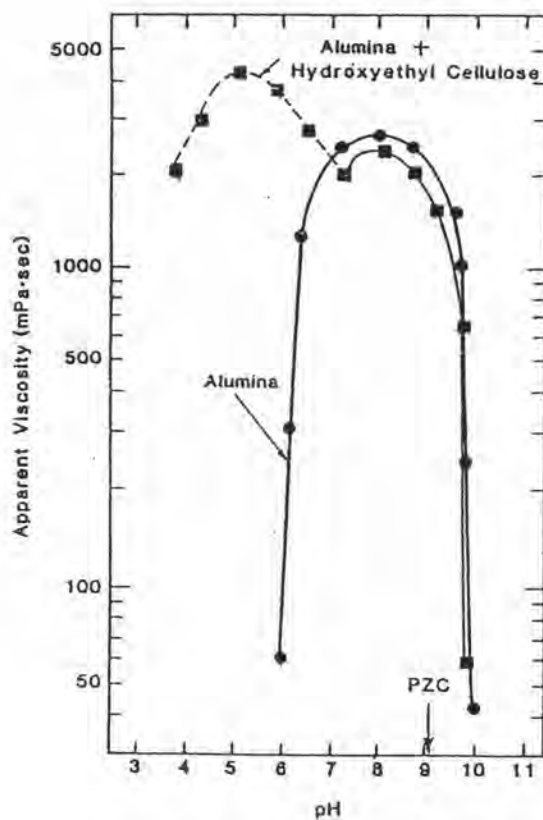
เราศึกษาเรื่องนี้ เพราะว่า ความเป็นกรด/ด่าง มีผลต่อการกระจายลอยตัวของอะลูมินาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 37

ตารางที่ 15 ค่า pH ของสารที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัตถุตีบ	ค่า pH
อะลูมินา	8.70
สารช่วยการยึดเกาะ	7.27
สารช่วยกระจายลอยตัว	7.16
สารไล่ฟอง	5.06
น้ำกลั่น	7.72

จากผลดังกล่าวจะเห็นว่า สารอะลูมินามีความเป็นด่างเล็กน้อย เนื่องจากมีโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นสิ่งเจือปน ดังแสดงใน 4.1.2 และมีสารไล่ฟองตัวเดียวที่มีคุณสมบัติเป็นกรด ส่วนตัวช่วยอื่นจัดว่ามีคุณสมบัติเป็นกลาง

จากการศึกษา พบว่าความเป็นกรดของสาร มีผลทำให้การกระจายลอยตัวของอะลูมินาไม่ได้ดีเท่าที่ควร (ดูภาพที่ 37) ฉะนั้นเราจึงควรใส่สารไล่ฟองให้น้อยที่สุด



ภาพที่ 37 : ความแตกต่างของความหนืดของอะลูมินาสเลอรัที่ค่า pH ต่างกัน

ที่มา : Reed, 1989, P 244

4.2 กระบวนการขึ้นรูปในการศึกษาวิจัย

ในกระบวนการขึ้นรูปนั้น เราได้ทำการศึกษาเป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

4.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปแบบแผ่น (sheet casting) บนแผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้นแทนเครื่องดอกเตอร์เบลด โดยใช้ผงอะลูมินา 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่ใช้สารช่วยอื่น ผ่านการบด 30 ชั่วโมง โดยบด 10 ชั่วโมง หยุด 1 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดความร้อนในอะลูมินาสเลอรั ผลปรากฏว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้หนา 0.6 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร โดยไม่มีการแตกร้าว ขณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Green sheet) จะเปราะมาก หักง่าย ไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย แต่ก็เป็นที่น่าพอใจ ในการที่จะดำเนินการ

ศึกษาต่อไป

4.2.2 จากการปรับอัตราส่วนการผสมระหว่างสารอะลูมินา (Al_2O_3) กับแมกนีเซียม (MgO) จำนวน 6 สูตร โดยใช้แมกนีเซียม 1-5 เปอร์เซ็นต์ โดยการควบคุมความหนาให้เท่าๆ กัน ด้วยเปอร์เซ็นต์น้ำกลั่น ปรากฏว่าสามารถขึ้นรูปได้ดีพอๆ กัน คือได้ขนาดหนา .6 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร แต่มีความเปราะมากขณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (Green sheet) เหมือนกันทุกสูตร

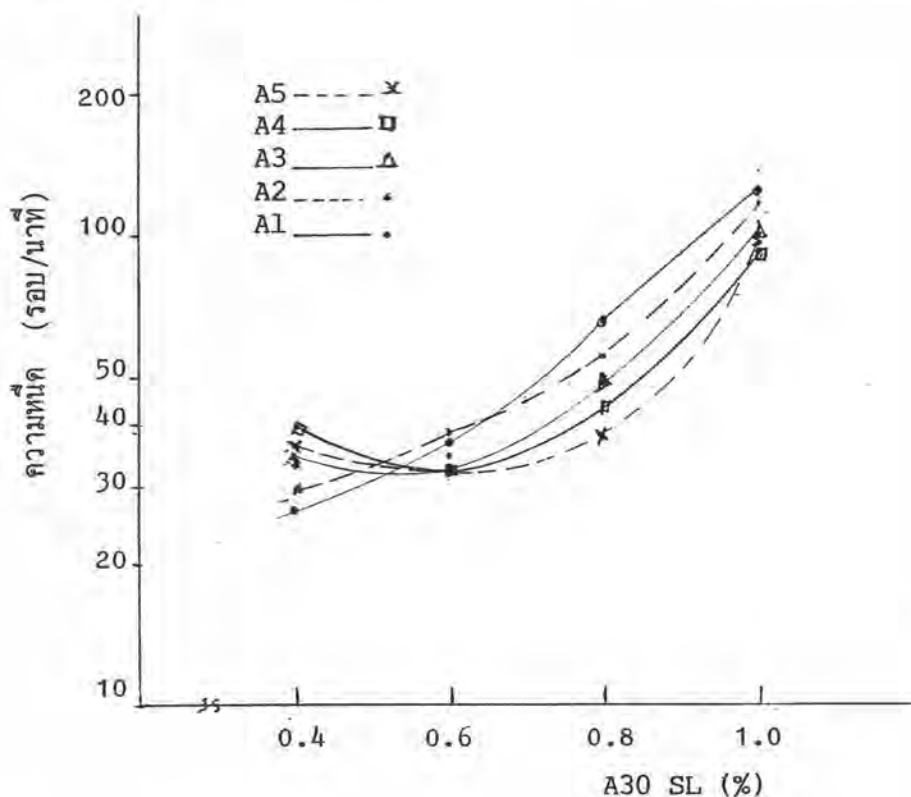
4.2.3 จากการนำขึ้นทดลอง ทั้ง 5 ตัวอย่าง ไปเผา (sintering) ที่ 1500 องศาเซลเซียส ปรากฏว่า การบิดงอมีน้อย จะมีเสียรูปเฉพาะสูตร A_5 เท่านั้น เมื่อศึกษาถึงขั้นนี้ พอสรุปผลได้ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 16 สมบัติของขึ้นทดลองทั้ง 5 ตัวอย่างที่ยังไม่ได้เติมสารช่วยในการขึ้นรูป

ตัวอย่างที่	การขึ้นรูป	ความแข็งแรงขณะเป็นผลิตภัณฑ์ดิบ	ความคงรูปหลังเผา
A_1	ง่าย	เปราะมาก	ดีมาก
A_2	ง่าย	เปราะมาก	ดีมาก
A_3	ง่าย	เปราะมาก	ดีมาก
A_4	ง่าย	เปราะมาก	ดี
A_5	ง่าย	เปราะมาก	เสียรูปเล็กน้อย

จากการศึกษามาถึงขั้นตอนนี้ ทำให้เห็นว่าตัวอย่างทั้ง 6 ตัวอย่างน่าสนใจทั้งสิ้น จึงใช้เป็นฐานในการศึกษาวิจัยต่อไป

4.2.4 จากการนำสูตรตัวอย่าง ผสมกับสารช่วยการกระจายลอยตัวในช่วง 0.2-1 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างสารช่วยการกระจายลอยตัวกับค่าความหนืด

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัว กับค่าความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity) ของอะลูมินาสเลอรี่ ดังแสดงในภาพที่ 38 จะเห็นว่าถ้าใช้ $A_{30}SL$ น้อย จะมีค่าความหนืดสูง เมื่อเพิ่มปริมาณ $A_{30}SL$ ค่าความหนืดก็จะลดลงเรื่อยๆ ถ้าเติม $A_{30}SL$ ในช่วง 0.5-0.7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักการกระจายลอยตัวจะดีมาก มีค่าความหนืด 32-36 รอบ/นาที เหมาะสำหรับใช้งาน ถ้าใช้มากไปจะทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้นเช่นกัน

ตามทฤษฎีการกระจายลอยตัว เกิดจากแรงผลักจากประจุทางไฟฟ้า หรือการขัดขวางแบบสเตอริก ในของเหลวมีขี้ สามารถเอาชนะแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals' force) ที่ทำให้เกิดแอกโกลมิเรท (Agglomerates) ได้ การใช้สารช่วยการกระจายลอยตัวประเภทโพลิเมอร์ที่แตกตัวได้ จะต้องมีการควบคุมชนิด ความเข้มข้น และความเป็นกรดหรือด่างของสารด้วย เพื่อควบคุมแรงผลักระหว่างอนุภาค หรือการเกิดประจุที่ขี้มันเอง

4.2.5 จากการศึกษาทดลองเติมสารช่วยยึดเกาะ (Binder) ตั้งแต่ 1.00-10.00 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักนั้น พบว่ายิ่งใส่ WA-320 มากขึ้น การขึ้นรูปจะยิ่งง่ายขึ้น คือสามารถขึ้นรูปได้บางขึ้น แผ่นใหญ่ขึ้น และถ้าใช้เปอร์เซ็นต์สูง จะทำให้ชั้นทดลองมีความอ่อนตัวขณะที่เป็นผลิตภัณฑ์ สามารถตัดขึ้นรูป และเคลื่อนย้ายได้สะดวก ไม่บิ่น หรือหักง่าย แต่การเติม WA-320 จะมีผลต่อค่าความหนืดด้วย เพราะ WA-320 เป็นของเหลว ฉะนั้น ถ้าจะให้ค่าความหนืดดังแสดงในภาพที่ 38 จะต้องลดเปอร์เซ็นต์น้ำกลั่นลง

ตารางที่ 17 สมบัติของชั้นทดลอง 5 ตัวอย่าง ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

No	C	% การหดตัว	% ดูดซึมน้ำ	% สูญเสียน้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความคงรูป
A ₀	1410	1.1	64.0	0.04	3.55	ดีมาก
	1440	4.1	20.1	0.09	3.56	ดีมาก
	1470	9.2	18.5	0.10	3.58	ดีมาก
	1500	11.9	6.0	0.11	3.66	ดี
	1530	14.8	2.5	0.18	3.74	ดี

ตารางที่ 17 (ต่อ)

No	C	% การหดตัว	% ดูดซึมน้ำ	% สูญเสียน้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความคงรูป
A ₁	1410	1.4	62.0	0.04	3.55	ดีมาก
	1440	4.3	19.4	0.09	3.56	ดีมาก
	1470	9.7	18.0	0.10	3.58	ดีมาก
	1500	12.5	5.8	0.11	3.70	ดี
	1530	15.3	1.9	0.18	3.76	ดี
A ₂	1410	1.4	60.0	0.04	3.55	ดีมาก
	1440	4.3	18.9	0.10	3.56	ดีมาก
	1470	9.8	15.5	0.11	3.59	ดีมาก
	1500	12.7	5.0	0.12	3.75	ดี
	1530	15.4	1.8	0.19	3.77	ดี
A ₃	1410	1.5	60.0	0.65	3.56	ดีมาก
	1440	4.4	18.2	0.10	3.57	ดีมาก
	1470	9.9	14.0	0.12	3.60	ดีมาก
	1500	12.9	4.5	0.13	3.76	ดี
	1530	15.8	1.5	0.20	3.79	ดี

ตารางที่ 17 (ต่อ)

No	C	% การหดตัว	% ดูดซึมน้ำ	% สูญเสียน้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความคงรูป
A ₄	1410	1.5	60.0	0.05	3.56	ดีมาก
	1440	4.5	18.0	0.10	3.57	ดีมาก
	1470	1.0	11.0	0.12	3.61	ดีมาก
	1500	13.0	1.5	0.13	3.78	ดี
	1530	16.0	0.5	0.20	3.84	ดี

ในช่วงที่อะลูมินาสเลอรัรี มีความหนืดต่ำสุด จะมีฟองเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย ฉะนั้นในการศึกษาทดลองจึงมีการเติม Pronarl 502 0.2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากการศึกษา พบว่า สารตัวนี้มีคุณสมบัติเป็นกรด เพราะมีค่า pH เท่ากับ 5.06 ซึ่งจัดว่าเป็นสารผสมตัวเดียวที่ใช้ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ที่มีคุณสมบัติเป็นกรด และพบว่าถ้าใช้สารนี้มากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำให้อะลูมินาสเลอรัรีมีค่าความหนืดสูงขึ้นมาก

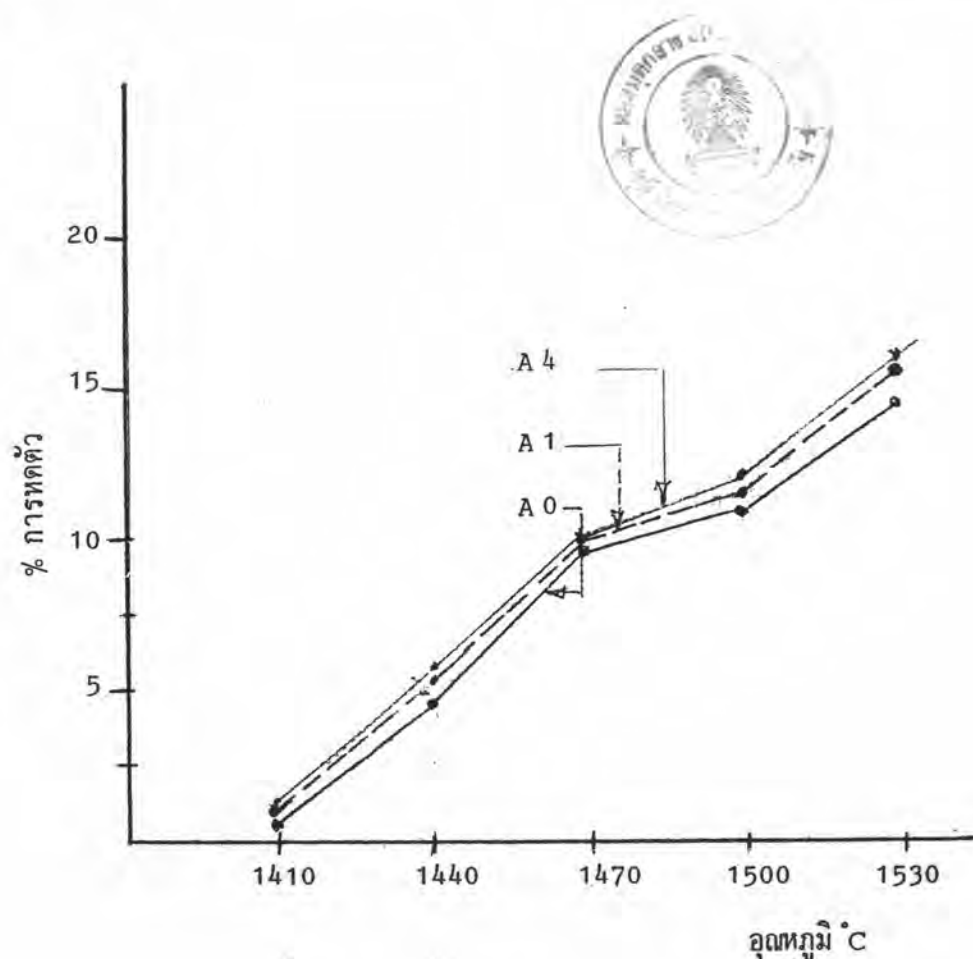
4.2.6 จากการศึกษาเตรียมอะลูมินาสเลอรัรีจำนวน 6 สูตรผสมและปรับค่าความหนืดให้อยู่ในช่วง 32-36 รอบต่อนาที ไปขึ้นรูปด้วยดอกเตอร์เบรค พบว่า ทุกสูตรมีคุณสมบัติทางฟิลิกส์ที่เหมือนๆ กัน คือ การขึ้นรูปง่าย ผิวหน้าเรียบ ขณะเป็นผลิตภัณฑ์ดิบ (green sheet) จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม ตัดแต่งรูปทรงได้ง่าย

4.2.7 จากการศึกษาการเผา (sintering) ในบรรยากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Oxidation) โดยแช่ไว้ที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) 3 ชั่วโมง ควบคุมให้อุณหภูมิเพิ่ม

ชั้น 10 องศาต่อนาทีในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 1410, 1440, 1470, 1500 และ 1530 องศาเซลเซียส ผลที่ได้ดังแสดงใน 4.3

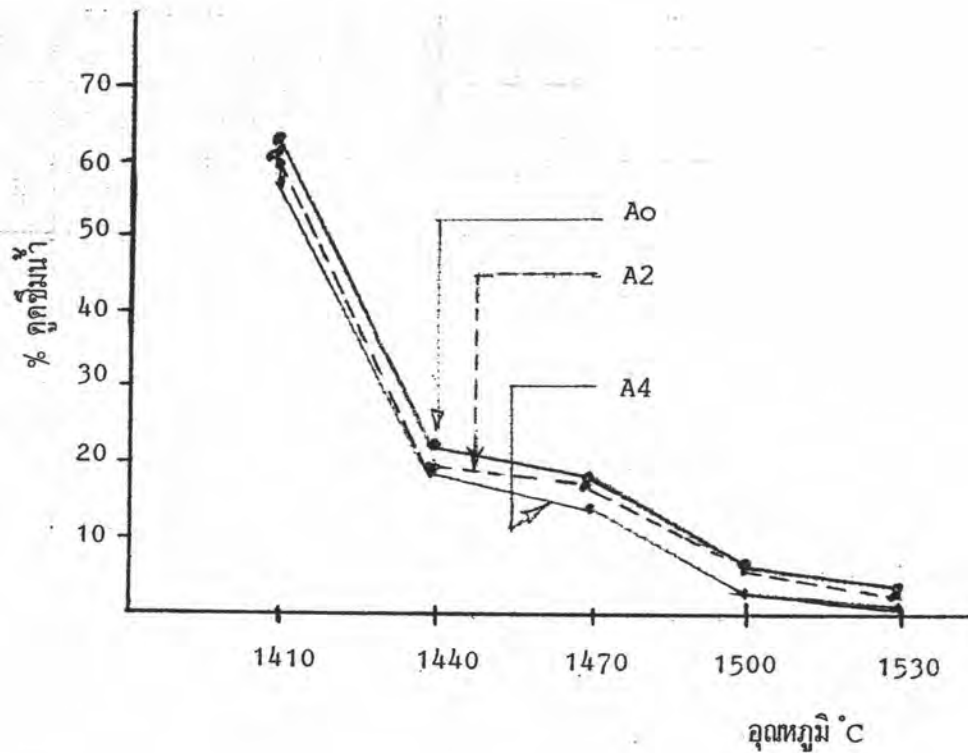
4.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นทดลองที่ผ่านการเผาแล้ว ได้ผลดังต่อไปนี้

4.3.1 จากผลการทดลอง ทำให้สังเกตเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัว แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ คือ ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้น การหดตัวก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน ส่วนจะหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารช่วยลดอุณหภูมิ (Flux) จากข้อมูลแสดงว่าชั้นทดลองเริ่มมีการหดตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับเปอร์เซ็นต์การหดตัว

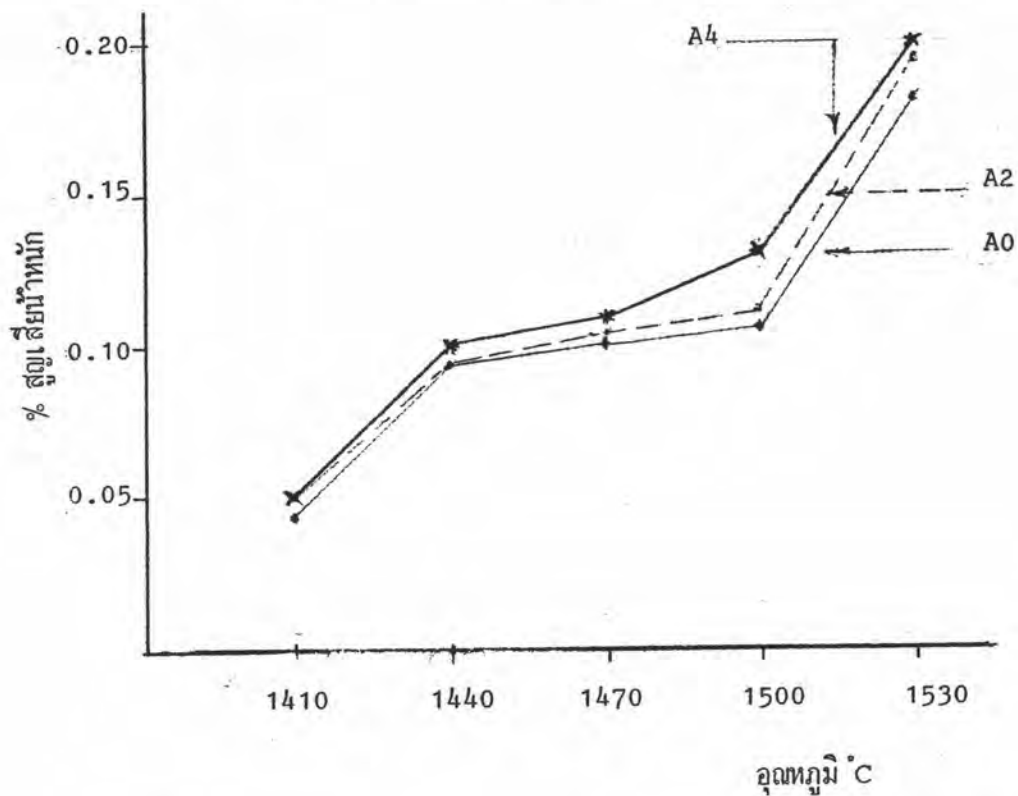
4.3.2 เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำที่ได้จากการทดลองเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับเปอร์เซนต์ดูดซึมน้ำ

จากกราฟแสดงว่า ถ้าอุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำจะลดลง ขึ้นตัวอย่างที่มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ A_4 ที่ผ่านการเผา 1530 องศาเซลเซียส ในช่วงเผาที่อุณหภูมิ 1410 องศาเซลเซียส พบว่ามีเปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำสูงมากทุกตัวอย่างขึ้นทดลอง

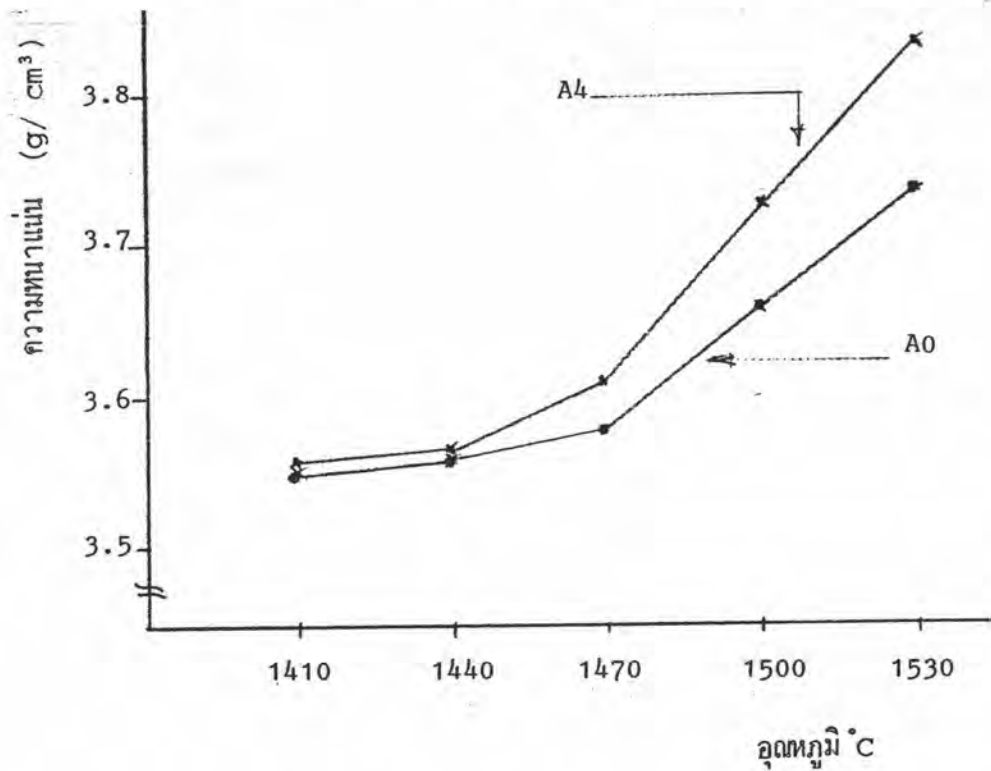
4.3.3 เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักที่ได้จากการทดลองเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับเปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนัก

จากกราฟเห็นว่า การสูญเสียน้ำหนักของชั้นทดลองจะเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา เนื่องจากการสูญเสียสิ่งเจือปนในการขึ้นรูปไป เช่น น้ำ ตัวช่วยการกระจายลอยตัว ตัวช่วยการยึดเกาะ ตัวไล่งอง ตลอดจนการแปรสภาพของสารเคมีในขณะเผา

4.3.4 เปอร์เซนต์ความหนาแน่น ที่ได้จากการทดลองเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้

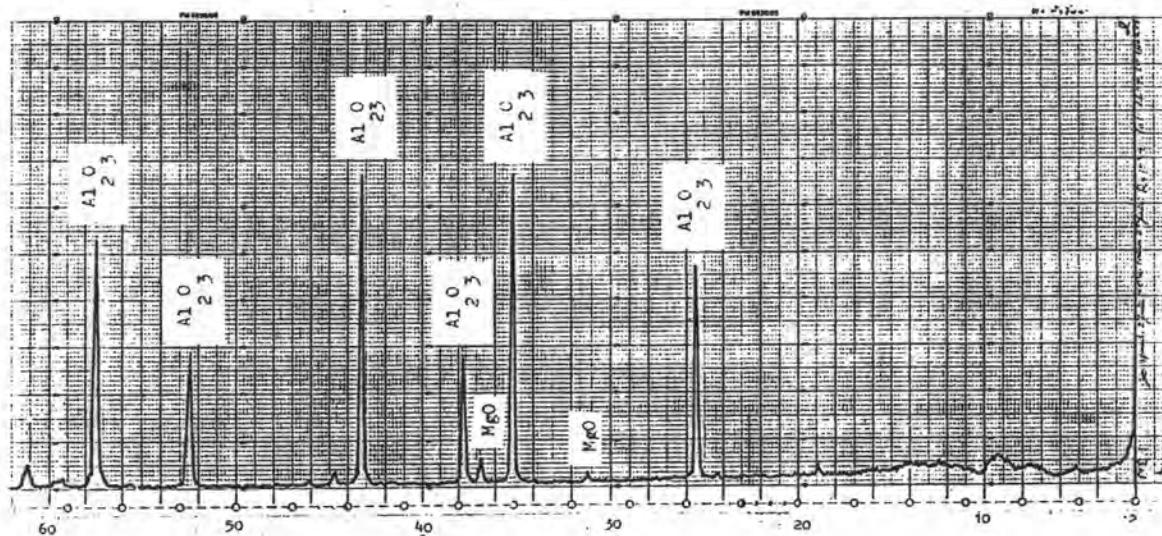


ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผากับความหนาแน่น

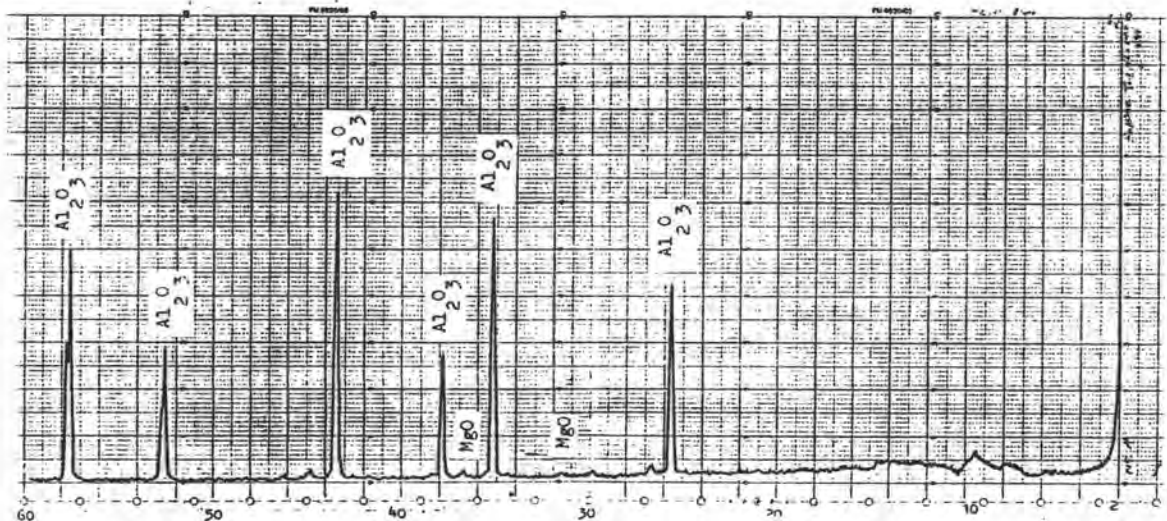
จากกราฟจะเห็นว่าความหนาแน่น จะเพิ่มขึ้นในขณะที่อุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาแน่นที่จัดอยู่ในเกณฑ์ดี ตัวอย่าง A_4 เผาที่ 1530 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น เท่ากับ 3.84 g/cm^3 ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำ ค่าความหนาแน่น จะใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของสารเริ่มต้น (Al_2O_3) คือ 2.14 g/cm^3

4.3.5 จากการตรวจเฟสของชั้นทดลองที่เผา 1500 องศาเซลเซียส และเฟสของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างของบริษัทอิเล็กทรอนิกส์ที่นครอุตสาหกรรม ลำพูน ดังแสดงในภาพที่ 43,

44



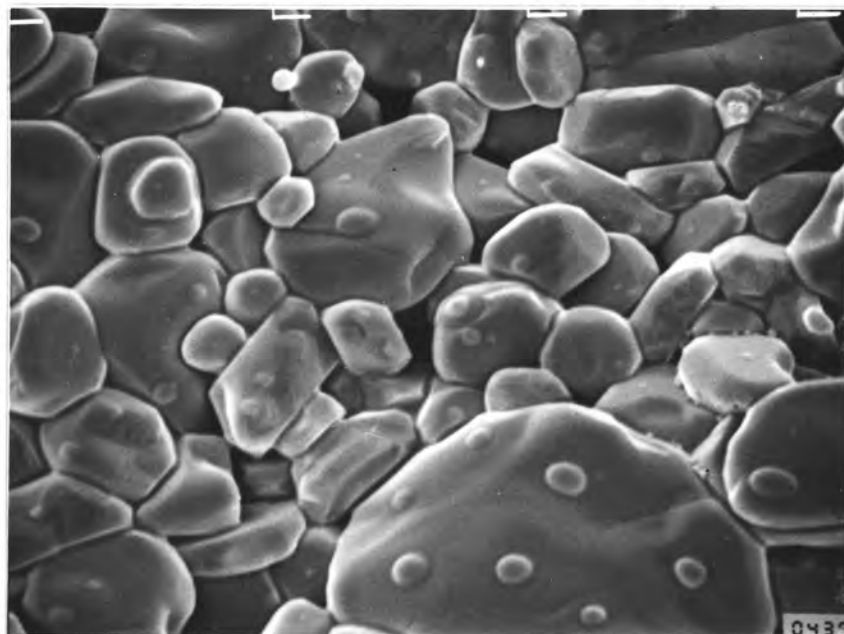
ภาพที่ 43 เฟสของชั้นทดลอง A_4 ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 44 เฟสของชิ้นงานตัวอย่าง ของบริษัทอิเล็กทรอนิกส์หรือเซรามิก จำกัด ที่นครมอุตสาหกรรม
ลำพูน

ในการตรวจเฟสครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างที่ A₄ เพราะเป็นตัวอย่างที่น่าสนใจที่สุด ดังคุณสมบัติที่แสดงไว้ในตารางที่ 16 จากการเปรียบเทียบเฟส ของภาพที่ 43 กับ 44 จะเห็นว่า มีลักษณะเฟสเกือบจะเหมือนกัน ที่ต่างกันเพียงเฟสเล็กๆ 1 เฟสเท่านั้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเฟส ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องในการเตรียมสเลอรรี่ คืออาจจะเป็นผลจากการสึกหรอของลูกบด ซึ่งน่าจะทำการศึกษาต่อไป

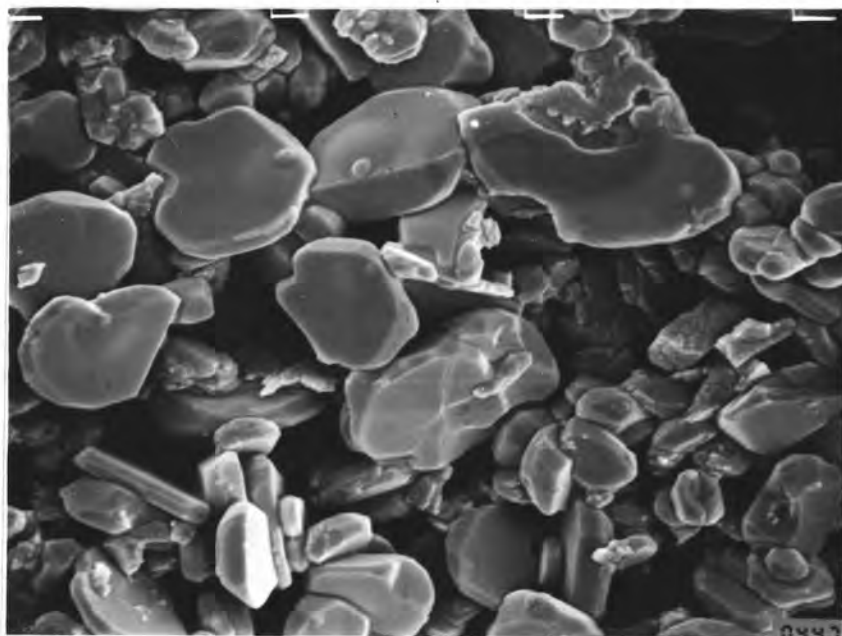
4.3.6 จากการนำชิ้นทดลองที่ผ่านการเผาแล้ว (Sintered) ไปถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ด้วยกำลังขยาย 3500 เท่า เพื่อศึกษาดูจุลโครงสร้างของชิ้นทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 45, 46, 47, 48, 49 และ 50




++
10 μ m

ภาพที่ 45 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₀ ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส

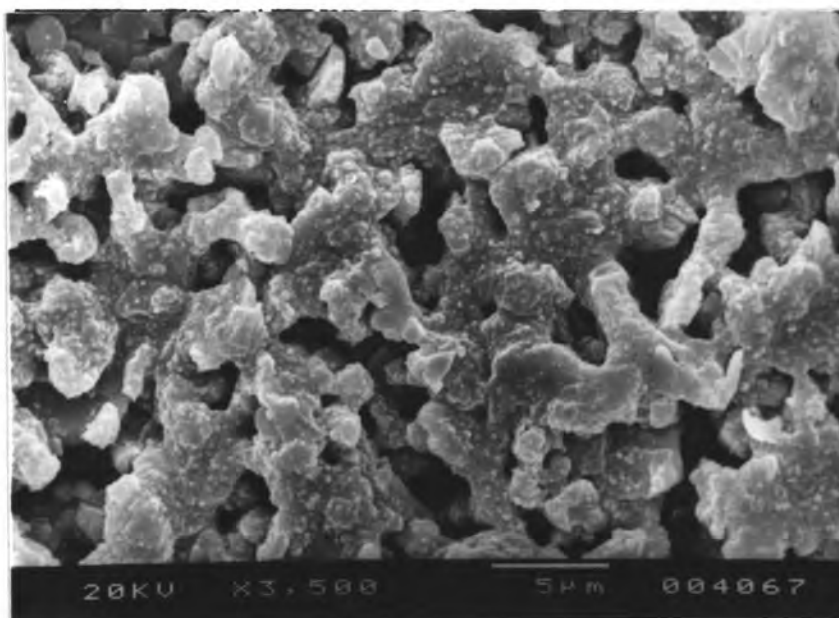
จากภาพจะเห็นว่า มีการกระจายขนาดของเกรนที่ดี การเชื่อมของขอบเกรน (Grain boundary) อยู่ในเกณฑ์ดี มีรูอากาศน้อย จัดว่ามีโครงสร้างอยู่ในเกณฑ์ดี




 10 μm

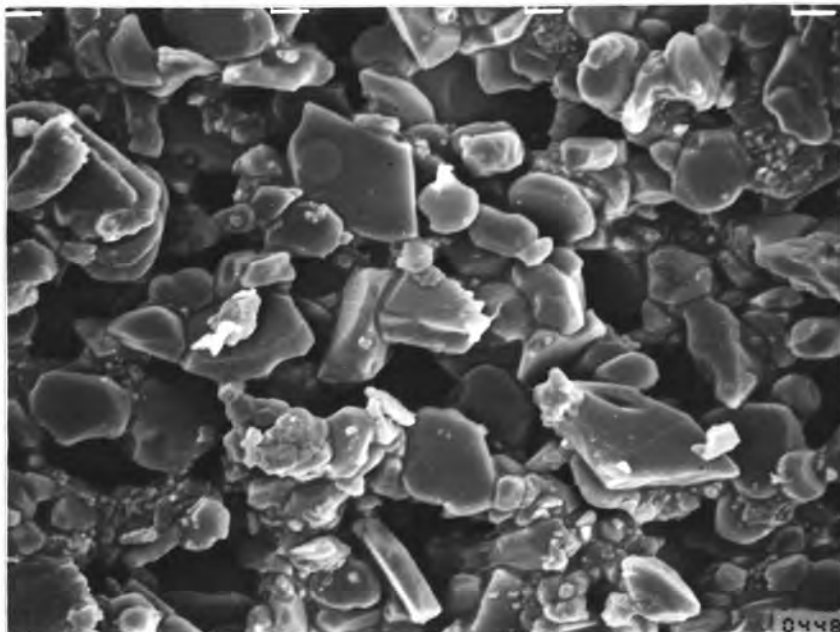
ภาพที่ 46 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₁ ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส

จากภาพจะเห็นว่าการกระจายขนาดของเกรนมากกว่า A₀ และลักษณะเกรนเป็นหลายเหลี่ยมกว่า A₀ เช่นกัน การเชื่อมระหว่างขอบเกรนยังไม่ดี รูอากาศมากไป ซึ่งจะทำให้มีผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ถ้ามีการควบคุมการขึ้นรูปที่ดี สูตรนี้ก็จะเป็นสูตรที่น่าสนใจสูตรหนึ่ง



ภาพที่ 47 จุดโครงสร้างของชั้นทดลอง A₉ ผ่านการเผาที่ 1230 องศาเซลเซียส

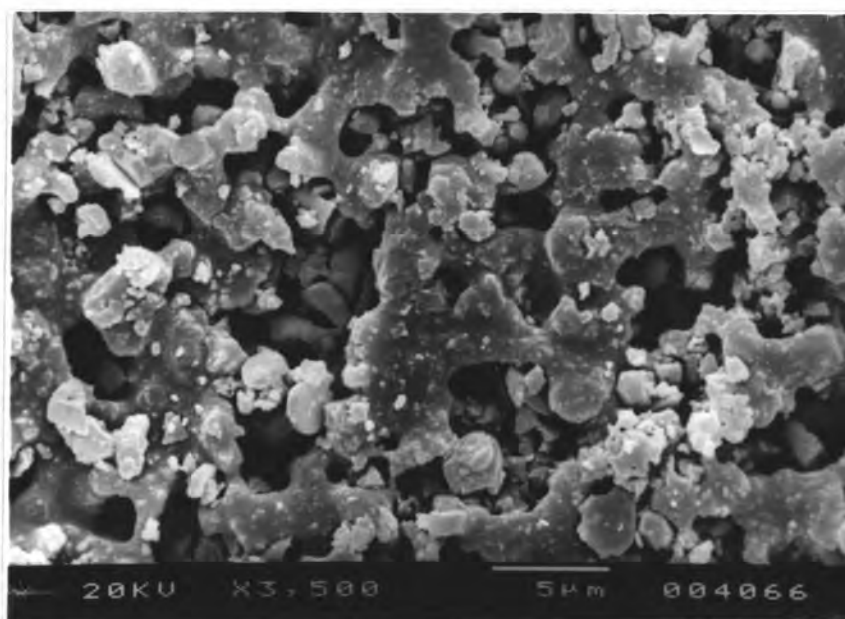
จากภาพจะเห็นว่า เกรนยังมีลักษณะหลวมๆ



10 μ m

ภาพที่ 48 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₉ ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส

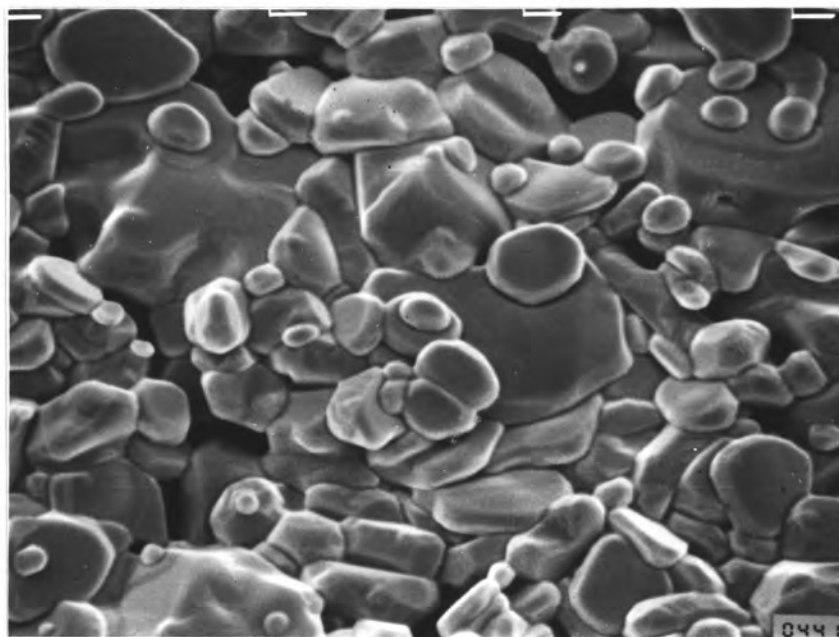
จากภาพจะเห็นว่ามีการกระจายขนาดของเกรนดีมาก การเรียงตัวยังไม่แน่นเท่าที่ควร แต่มีการเชื่อมของขอบเกรนดีกว่า A₀ และ A₁ เกรนมีลักษณะหลายเหลี่ยม และมีเหลี่ยมคมชัด



ภาพที่ 49 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₄ ผ่านการเผาที่ 1230 องศาเซลเซียส

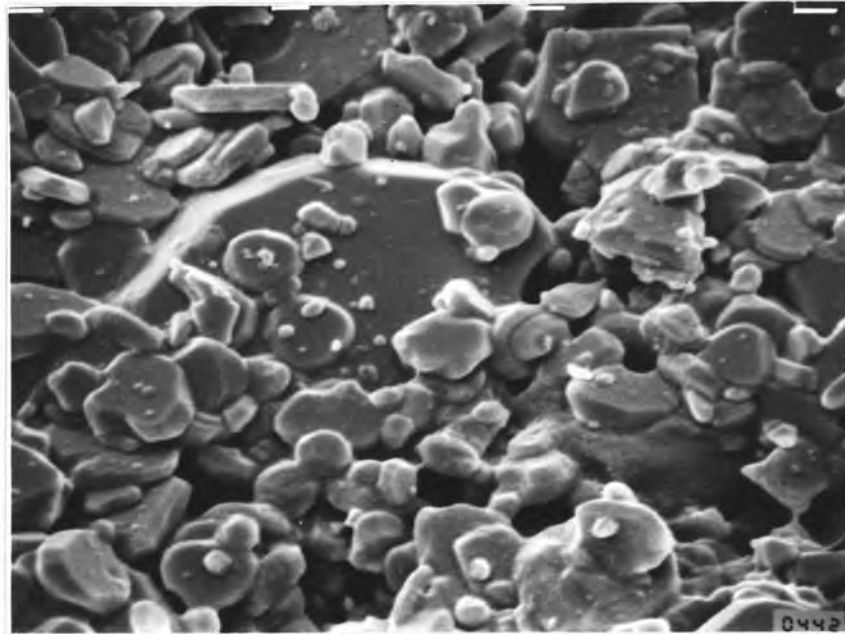
จากภาพด้านบนไปเปรียบกับภาพที่ 47 แล้วจะเห็นว่า มีขนาดเกรนมากกว่า การเรียงตัวดีกว่า





++
10 μ m

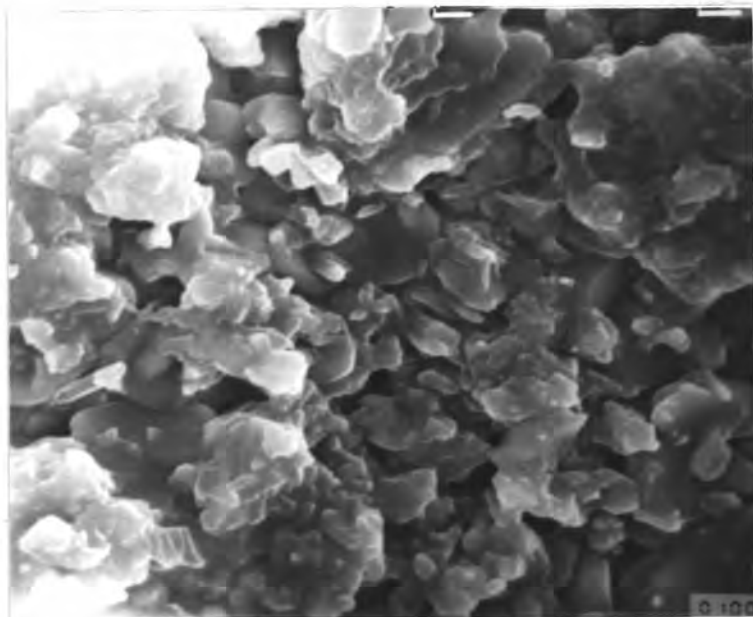
ภาพที่ 50 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₂ ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส



10 μm

ภาพที่ 51 :จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₄ ผ่านการเผาที่ 1530 องศาเซลเซียส

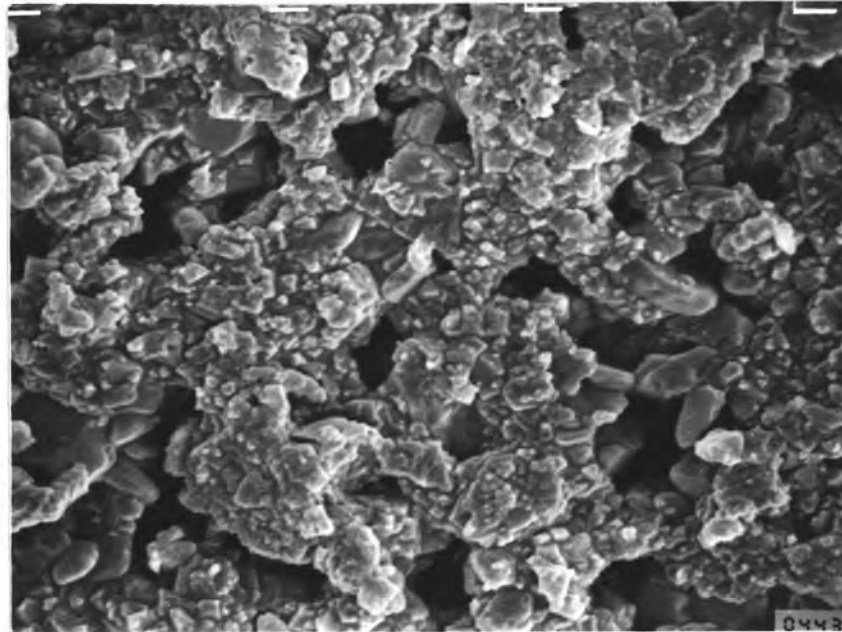
จากภาพที่ 50 และ 51 จะเห็นว่า การกระจายขนาดของเกรนตีมาก มีการเรียงตัวที่มีระเบียบ การเชื่อมของขอบเกรนดีกว่า ทุกตัวอย่างที่ผ่านมามีรูอากาศน้อย ซึ่งนับได้ว่าเป็นชั้นทดลองที่ดีที่สุดในการศึกษาวิจัยครั้งนี้



10 μm

ภาพที่ 52 จุลโครงสร้างของชั้นทดลอง A₈ ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส

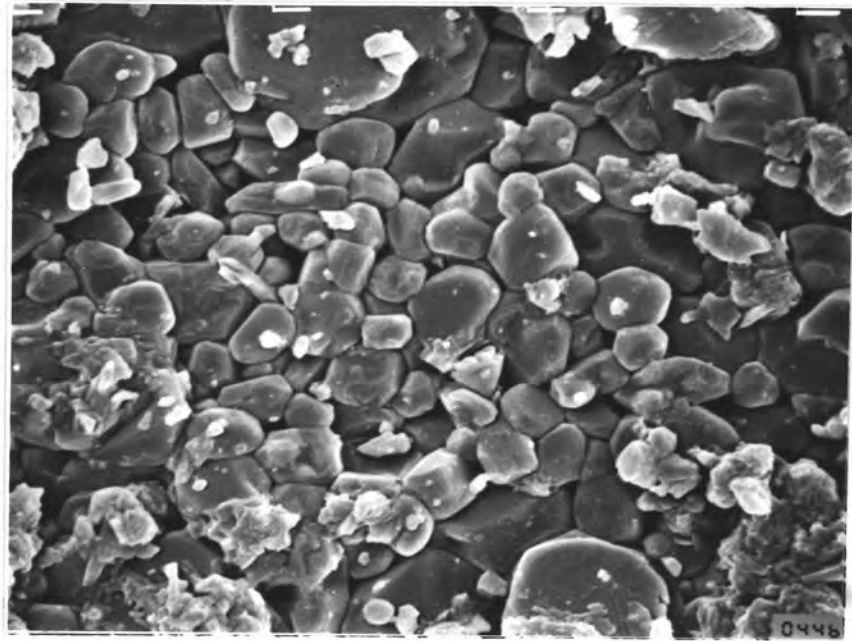
จากภาพจะเห็นว่า มีการกระจายขนาดของเกรน และการเชื่อมของขอบเกรนดีมาก รูอากาศน้อย ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ แต่ตัวอย่างนี้มักจะมีการบิดเบี้ยว เพราะมี ฟลักซ์สูง



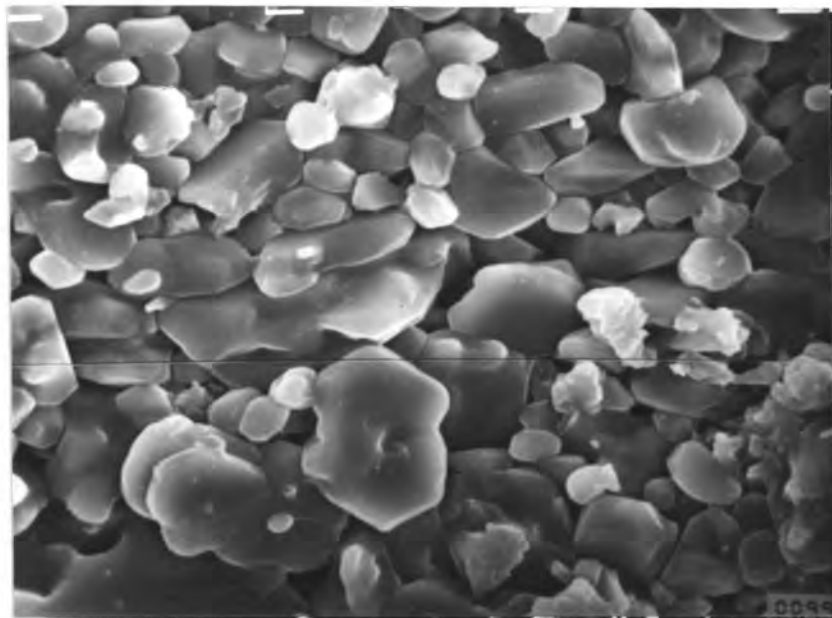
10 μ m

ภาพที่ 53 จุลโครงสร้างของชั้นทดลองที่ A₅ ผ่านการเผาที่ 1530 องศาเซลเซียส

จากภาพจะเห็นว่าเกรนเกาะกันเป็นแผ่นใหญ่ แต่ตัวอย่างนี้มักจะบิดเบี้ยวเวลาเผา



↑ ↑
10 μm



ภาพที่ 54 จุลโครงสร้างของตัวอย่างจากบริษัทอิเล็กทรอนิกส์ ลำพูน

(ก) ตัวอย่างชนิด หน้า 0.4 mm.

(ข) ตัวอย่างชนิด หน้า 0.6 mm.

จากภาพจะเห็นว่า มีลักษณะโครงสร้างเกือบจะเหมือนกับภาพที่ 50 และ 51 เป็นตัวอย่าง A_4 ของการทดลอง

จากการศึกษาจุลโครงสร้างที่กลั้วมาข้างต้น พอจะสรุปได้ว่าการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประสบผลสำเร็จพอสมควร เนื่องจากสามารถสร้างชั้นทดลองที่มีจุลโครงสร้างใกล้เคียงกับตัวอย่าง

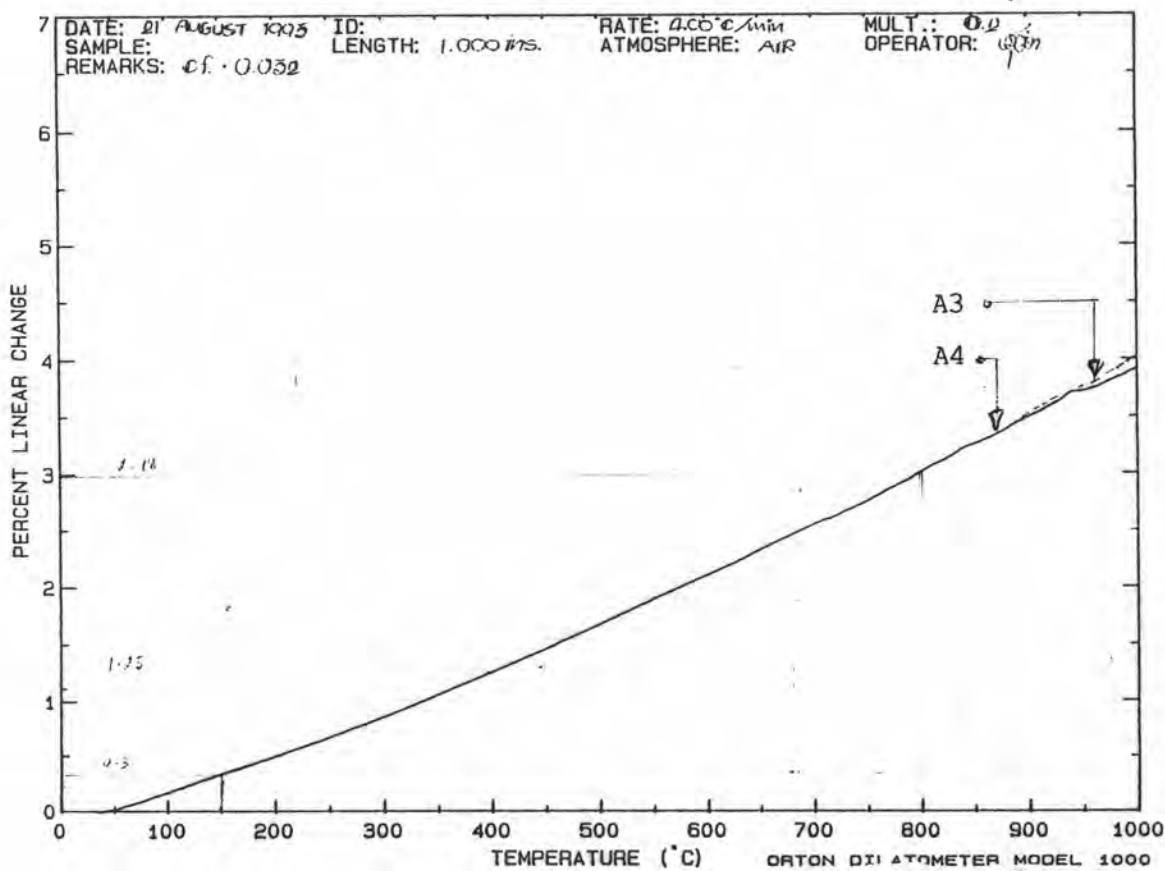
4.3.7 จากการหาสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่ออุณหภูมิของชั้นทดลอง A_4 ได้ผลดังนี้

ที่อุณหภูมิ	25-150 °C	$6.85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	150-400 °C	$8.88 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
	400-800 °C	$9.45 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

เมื่อนำข้อมูลนี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของ บริษัทล้าปูน จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ต่างกันเฉพาะช่วง 25-150 องศาเซลเซียสเท่านั้น ที่ชั้นทดลองที่เตรียมขึ้น มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การขยายตัว เมื่อถูกความร้อนของชั้นทดลองที่เตรียมขึ้น กับผลิตภัณฑ์ของบริษัท Electro ceramic

อุณหภูมิ	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน	
	ชั้นทดลองที่ A ₄	ผลิตภัณฑ์จาก Electro, ceramic
25-150 °C	$6.85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$3.40 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
150-400 °C	$8.88 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$8.40 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
400-800 °C	$9.45 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$9.10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



ภาพที่ 55 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนของชั้นทดลองที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ

4.3.8 จากการหาค่าความแข็งแรง (Bending strength) โดยใช้ตัวอย่างที่ A_4 เเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส เป็นชั้นทดลอง วัดได้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย เท่ากับ 2883 kg/cm^2

4.3.9 จากการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) ของตัวอย่าง A_4 เเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยวัดที่อุณหภูมิห้อง ณ 25 องศาเซลเซียส ได้ผลดังนี้

ที่อุณหภูมิ 1410°C	>	$1.25 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$.
1440°C	>	$1.26 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$.
1470°C	>	$4.03 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$.
1500°C	>	$6.35 \times 10^7 \Omega/\text{cm}$.
1530°C	>	$10^8 \Omega/\text{cm}$. (สุดความสามารถของเครื่องวัด)

สังเกตจะเห็นว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา แต่ยังมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างของบริษัทอิเล็กทรอนิกส์ธรรมดา ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 สาเหตุเนื่องมาจากชั้นทดลองที่เตรียมขึ้น ยังเผาไม่ถึงจุดขึ้นเตอรริง เพราะถูกจำกัดด้วยความสามารถของเตาเผา

4.3.10 จากการนำชั้นทดลองไปหาความราบเรียบของผิว

ปรากฏว่าได้ค่า $R_x = 14.5 \mu\text{m}$.

$R_z = 5 \mu\text{m}$.

