

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น

สารตั้งต้นประกอบด้วยผงเซรามิก สารเติมแต่งต่างๆ และสารปรับปรุงสมบัติ สำหรับผงเซรามิกประกอบด้วย อลูมินา ดินขาวนิวซีแลนด์ และ ทัลคัม ได้ตรวจสอบและวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเฉลี่ย พื้นที่ผิวจำเพาะ องค์กรประกอบทางเคมี และเฟสต่างๆดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเฉลี่ย พื้นที่ผิวจำเพาะ และองค์กรประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

สารตั้งต้น	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	องค์กรประกอบทางเคมี
A-152 SG	1.09	$6.35 \pm 0.02$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Al}(\text{OH})_3$ (bayerite)
SCA-96	3.09	$4.54 \pm 0.13$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Na}_2\text{AlP}_3\text{O}_{10}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
ดินขาวนิวซีแลนด์	0.33	$24.89 \pm 0.26$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (halloysite), $\text{SiO}_2$ (low quartz), $\text{SiO}_2$ (cristobalite)
ทัลคัม	5.84	$2.92 \pm 0.04$	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (talca), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomite), $\text{MgCO}_3$ (magnesite)

มีกราฟแสดงในภาคผนวก ข

ขนาดที่หาได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างจากข้อมูลจากบริษัทเล็กน้อย อาจเป็นเพราะใช้วิธีการต่างกัน ทั้งชนิดของเครื่องมือ และวิธีการเตรียมตัวอย่าง

## 4.2 การทดลองหาปริมาณและอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุดิบต่างๆ

### 4.2.1 การทดลองการตกตะกอน (sedimentation experiment)

ใช้การทดลองการตกตะกอนในการหาปริมาณสารช่วยการกระจายตัว (dispersant) ที่เหมาะสมกับอนุภาคนาแต่ละชนิด เพราะเป็นวิธีการที่ให้ผลแม่นยำ และทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก วิธีการทดลองเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.4.1.1 และได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการหาปริมาณสารช่วยการกระจายตัวที่เหมาะสม

ผงเซรามิก	ความสูงของตะกอน (ซ.ม.) ที่เปอร์เซ็นต์ของสารช่วยการกระจายตัวต่างๆ					
	0%	1%	2%	3%	4%	5%
A-152 SG	1.70	1.50	0.95	0.95	0.95	0.90
A-152 SG + clay + talcum	1.95	1.20	1.00	1.00	1.05	1.10
SCA-96	2.20	1.75	1.15	1.15	2.00	2.10

หลังจากตั้งหลอดทดลองทิ้งไว้สองอาทิตย์เพื่อให้เกิดการตกตะกอน พบว่าเมื่อใช้สารช่วยการกระจายตัว 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงเซรามิกจะมีตะกอนบางที่สุด แสดงว่าอนุภาคมีการกระจายตัวอยู่ในสารละลายได้ดีและนานกว่า ฉะนั้นจึงเลือกใช้ค่านี้ในการเตรียมสเลอรีของทั้งระบบที่ใช้ A-152 SG เพียงอย่างเดียว ระบบที่ใช้ A-152 SG ร่วมกับ ดินขาว นิวซีแลนด์และทัลคัม และระบบที่ใช้ SCA-96 เพียงอย่างเดียว ส่วนการที่มีชั้นตะกอนหนาขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยการกระจายตัวนั้นอาจเป็นเพราะมีการเกิดแรงคูมากกว่าแรงผลักในกลไก electrostatic stabilization ในกลไกนี้จะเกิดขึ้นของประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาคมาล้อมรอบไว้ชั้นหนึ่ง ส่วนประจุที่เหมือนกันถูกผลักออกมาเป็นชั้นถัดไป เกิดเป็นประจุสองชั้นล้อมรอบอนุภาค Moreno (1992) กล่าวว่า ถ้าความเข้มข้นของประจุชั้นแรกมากจนถึงจุดๆหนึ่งอนุภาคจะรวมตัวกันและตกตะกอนลงมา ทั้งนี้อาจเกิดจากการเติมสารช่วยการกระจายตัวมากเกินไปจนทำให้ความเข้มข้นของประจุชั้นแรกมากจนถึงจุดที่จะเกิดการตกตะกอนดังกล่าว

สารละลายที่แยกชั้นกับตะกอน (supernatant) ของการทดลองที่ใช้ A-152 SG ร่วมกับดินขาวนิวซีแลนด์และทัลคัม และการทดลองที่ใช้ SCA-96 ยังคงมีความขุ่นอยู่เล็กน้อย คาดว่าเป็นผลจากการที่มีดินขาวผสมอยู่ด้วย แตกต่างจากของ A-152 SG ที่เป็นสารละลายใส

จากตารางที่ 4.1 คินขาวมีขนาดอนุภาค 0.33 ไมครอนซึ่งเป็นขนาดเล็กเกินกว่าจะตกตะกอนลงมาในช่วงเวลาสองอาทิตย์

การทดลองที่ใช้ SCA-96 มีชั้นตะกอนหนากว่าเมื่อใช้เฉพาะ A-152 SG เช่นเดียวกับการทดลองที่ใช้ A-152 SG ร่วมกับคินขาวนิวซีแลนด์และทลคัม แต่ตะกอนที่ได้เกาะตัวกันอย่างหลวมๆ คาดว่าเป็นเพราะ SCA-96 ซึ่งนอกจากจะเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการค็อกเตอร์เบลตแล้วยังใช้ในกระบวนการอินเจกชัน โมลดิ้ง อีกด้วย ทำให้มีความเป็นไปได้ที่อาจจะผสมสารหล่อลื่นบางตัว (lubricant) เพื่อให้ใช้กับกระบวนการอินเจกชัน โมลดิ้ง ได้ดี เป็นสาเหตุให้อนุภาคเกาะตัวกันแบบหลวมๆ จึงได้ชั้นของตะกอนหนาแต่มีความหนาแน่นต่ำกว่าการทดลองที่ใช้เฉพาะ A-152 SG นอกจากนี้ SCA-96 มีขนาดอนุภาค 3.09 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่า A-152 SG ซึ่งมีขนาดอนุภาค 1.09 ไมโครเมตรถึงสามเท่า ส่วนทลคัมมีขนาดอนุภาค 5.84 ไมโครเมตร ทำให้การทดลองที่ใช้ A-152 SG ร่วมกับคินขาวนิวซีแลนด์และทลคัมมีตะกอนหนาว่าการทดลองที่ใช้เฉพาะ A-152 SG เช่นกัน

4.2.2 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของสารช่วยการกระจายตัวและสารเพิ่มความยืดหยุ่น

จากการทดลองตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.4.1.2 ได้ผลดังตารางที่ 4.3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างสารช่วยการยึดเกาะ (binder, B) และสารเพิ่มความยืดหยุ่น (plasticizer, P)

B:P	2:1			1:1			1:2		
	ความใส	การเกาะกับแผ่นพลาสติก	ความแข็งแรง	ความใส	การเกาะกับแผ่นพลาสติก	ความแข็งแรง	ความใส	การเกาะกับแผ่นพลาสติก	ความแข็งแรง
B1	5	5	5						
B1:P1	5	3	4	5	4	3	5	4	2
B1:P2	5	4	5	5	4	1	5	4	1
B1:P3	1	5	1	1	5	1	1	5	1
B1:P4	5	5	ไม่เป็นฟิล์ม	5	5	ไม่เป็นฟิล์ม	5	5	ไม่เป็นฟิล์ม
B2	4	3 <sup>X</sup>	5						
B2:P1	4*	1 <sup>X</sup>	5	1*	4	1	1*	1	1
B2:P2	1*	1	2	1* <sup>∇</sup>	1	1	1* <sup>∇</sup>	1	1
B2:P3	1*	1	1	1*	ติดแน่น	1	1*	ติดแน่น	1
B2:P4	4	1 <sup>X</sup>	5	4	4	4	4 <sup>∇</sup>	4	3
B3	5	5	5						
B3:P1	5	4	4	5	4	3	5	4	3
B3:P2	2	2	2	1 <sup>∇</sup>	1	1	1 <sup>∇</sup>	1	1
B3:P3	1 <sup>∇</sup>	1	1	1 <sup>∇</sup>	1	1	1 <sup>∇</sup>	1	1
B3:P4	5	5	3	5	5	3	5	5	2
B4	5	5	5						
B4:P1	5	5	4	5 <sup>∇</sup>	5	3	5 <sup>∇</sup>	5	3
B4:P2	3	4	4	1* <sup>∇</sup>	4	2	1* <sup>∇</sup>	4	1
B4:P3	1* <sup>∇</sup>	4	1	1* <sup>∇</sup>	4	1	1* <sup>∇</sup>	4	1
B4:P4	5	5	3	5	5	2	5	5	1
B5	5	5	5						
B5:P1	5	4	3	5	3	2	5	3	2
B5:P2	3	ติดแน่น	1	1	ติดแน่น	1	1	ติดแน่น	1
B5:P3	1	ติดแน่น	1	1	ติดแน่น	1	1	ติดแน่น	1
B5:P4	5	5	1	5	5	ไม่เป็นฟิล์ม	5	5	ไม่เป็นฟิล์ม

หมายเหตุ ใช้ระดับตัวเลขแสดงการเปรียบเทียบเฉพาะในการทดลองของสารช่วยการปิดเกาะแต่ละชนิด อัตราส่วนที่ใช้ตัวเข้มและอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมคือค่าที่เลือกไปทดลองเตรียมสเลอรี

“∇” คือ ผิวเปียกเนื่องจากมีสารเพิ่มความยึดหยุ่นมากเกินไปและซึมออกมาจากแผ่น

“\*” คือ ไม่สามารถละลายด้วยกันได้เต็มที่ มีเศษชิ้นส่วนกระจายทั่วไป หรือเป็นก้อนใหญ่

“X” คือ แผ่นงอมาก

เมื่อ	B1	คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	มวตโมเลกุล	9000-10000
	B2	คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	มวตโมเลกุล	11000-31000
	B3	คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	มวตโมเลกุล	30000-70000
	B4	คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	มวตโมเลกุล	100000
	B5	คือ ซีรานเดอร์ (Cerander,DB-R1)		
	P1	คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล	มวตโมเลกุล	400
	P2	คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล	มวตโมเลกุล	1000
	P3	คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล	มวตโมเลกุล	2000
	P4	คือ กลีเซอริน	มวตโมเลกุล	92.10

เมื่อ	5	ดีมาก
	4	ดี
	3	ปานกลาง
	2	แย่มาก
	1	แย่มาก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติบางประการของแผ่นโสรที่ได้จากการขึ้นรูปสารผสมระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่น เมื่อนำมาเตรียมสเลอรีของอลูมินาจะมีองค์ประกอบอื่นๆแสดงในตารางที่ 4.4 สเลอรีประกอบด้วย อลูมินา สารช่วยการกระจายตัว 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอลูมินาจากรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2.1 สารลดฟอง 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอลูมินา น้ำกลั่น 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอลูมินา และใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เลือกไว้ ซึ่งแสดงเป็นตัวเลขในกรอบสี่เหลี่ยมในตาราง

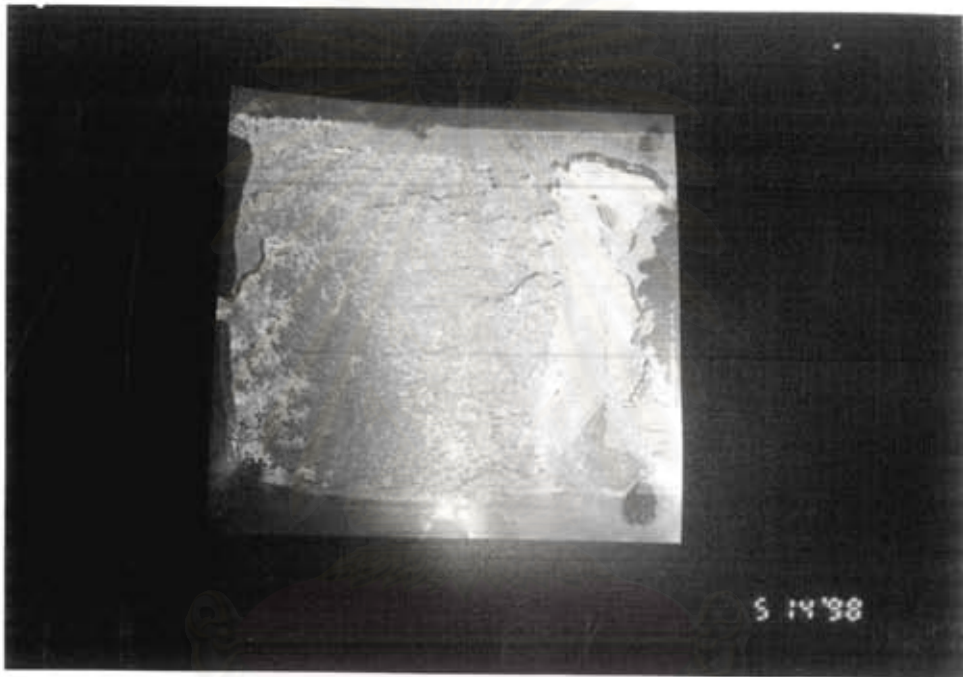
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบและอัตราส่วนในการเตรียมสเลอรี

องค์ประกอบ	อัตราส่วน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอลูมินา)
A-152 SG	100.00
PVA	vary
PEG	vary
SN 5020	2.00
SN 247	0.20
น้ำกลั่น	75.00

จะได้แผ่นก่อนเผาที่มีสมบัติเป็นไปในแนวเดียวกับแผ่นโสรที่อัตราส่วนนั้นๆแต่ไม่เหมือนกันทุกประการ เพราะผงอลูมินาที่เติมลงไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างทั้งความหนืด แรงดึงผิว และ pH อย่างไรก็ตามสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกอัตราส่วนระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าสารคู่ใดที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ หรือสารคู่ที่ผสมกันได้ดีมีขอบเขตการละลายที่อัตราส่วนใด

ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือคู่ที่มี P3 (PEG 2000) อยู่ด้วย จะเห็นว่าทั้ง B1 B2 B3 B4 และ B5 ไม่สามารถผสมกับ P3 ได้ที่อัตราส่วนใดทั้งสิ้นเพราะจะได้สารผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเกิดเศษเล็กๆไปจนถึงเป็นก้อนใหญ่สีขาวขุ่นแยกตัวกับส่วนที่เป็นของเหลวเห็นได้ชัดเจนแสดงในรูปที่ 4.1 หากนำไปเตรียมสเลอรี แผ่นที่ผ่านการเผาจะมีสมบัติต่างๆไม่ตี เช่นแผ่นเปราะ แผ่นแยกชั้น หรือมีผิวโป่งพอง นอกจากนี้แม้ว่าในสารบางคู่เช่น B5 และ P3 จะเห็นการแยกตัวได้ไม่ชัดเจนในขั้นตอนการเตรียมสเลอรีและการขึ้นรูปแผ่น เพราะได้สเลอรีที่เป็นเนื้อเดียวกันไล่ฟองอากาศออกง่าย ได้แผ่นก่อนเผาผิวเรียบ ไม่แตกราน แต่ในที่สุด

ผลเสียจากความไม่เข้ากันระหว่างสารเติมแต่งทั้งสองก็จะปรากฏอย่างชัดเจนในแผ่นที่ผ่านการเผา แผ่นจะมีผิวขรุขระ หลุดลอก แยกเป็นชั้นๆและเปราะมาก สาเหตุที่ทำให้ PEG มวลโมเลกุล 2000 ไม่สามารถผสมเข้ากันกับสารช่วยการยึดเกาะใดๆ อาจเป็นเพราะมีขนาดโมเลกุลใหญ่เกินไป เป็นโพลิเมอร์สายยาวจนไม่สามารถแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของ PVA และ ซิรานเคอร์ได้ ตรงกับที่ Mistler (1992) กล่าวไว้ว่า สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่นควรมีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 300-400 จึงจะมีประสิทธิภาพตามต้องการ ส่วน Shanefield (1995) กล่าวว่า PEG ที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่นควรมีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 300-400 ส่วน PEG ที่มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 2000 ขึ้นไปจะทำหน้าที่สารช่วยการยึดเกาะ



รูปที่ 4.1 แผ่นใสจากสูตรที่สารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นไม่เข้ากัน

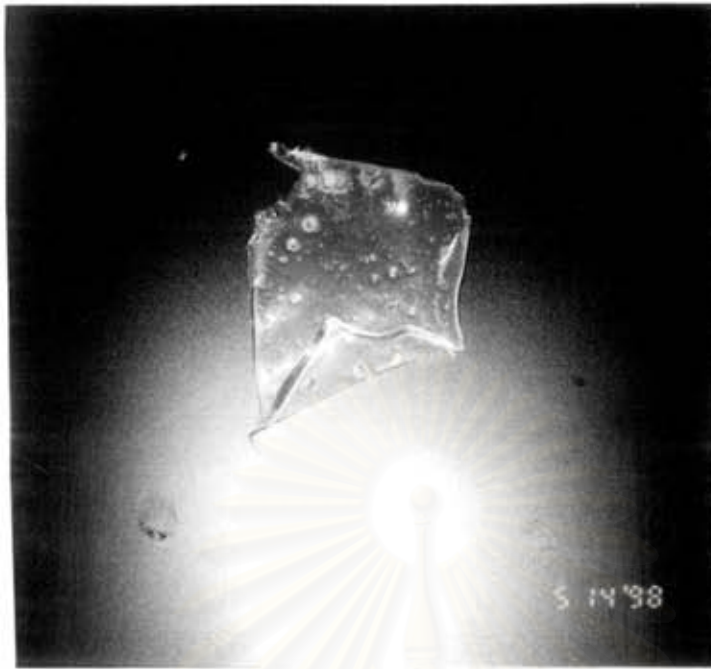
การเลือกอัตราส่วนของสารเติมแต่งทั้งสองจากแผ่นที่มาจากสารผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันยังต้องผ่านเกณฑ์อีกหลายประการ ต้องพิจารณาความแข็งแรง ความยืดหยุ่นของแผ่น สภาพผิว การเกาะกับแผ่นรองรับพลาสติก สมบัติด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์ผกผันกัน แผ่นที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นมากจะมีความแข็งแรงต่ำลงเพราะทำให้มีระยะระหว่างอนุภาคมากขึ้น ทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาในขั้นตอนของการตัดแผ่นให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ เพราะแผ่นอาจมีขนาดไม่คงที่ไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการขึ้นเทออริง แผ่นที่มีลักษณะดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.2 การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นมากเกินไปนั้น นอกจากจะทำให้แผ่นมีความแข็งแรงน้อยลงแล้วยังทำให้เกิดสภาพผิวเปื่อยเมื่อเวลาผ่านไปสองถึงสามวันเนื่องจากส่วนเกินของสารเพิ่มความยืดหยุ่นซึมออกมา ทำให้ไม่สามารถควบคุมสภาพผิวของแผ่นได้ แผ่นจะมีอายุสั้น และไม่สามารถม้วนเก็บได้



รูปที่ 4.2 แผ่นที่ยึดหยุ่นมากเกินไป

ความสามารถในการยึดเกาะกับแผ่นรองรับพลาสติกเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่ง เพราะจะสามารถลดปัญหาการงอของแผ่นก่อนเผาได้ เมื่อทดสอบเร่งบนแผ่นรองรับพลาสติกจะมีแรงดึงให้ผิวเรียบเสมอกัน ผิวของแผ่นรองรับพลาสติกต้องสะอาดและเกิดแรงยึดเกาะกับสเลอรี่ได้ มิฉะนั้นแผ่นที่ขึ้นรูปไว้ก็จะหดตัวทำให้ควบคุมความหนาไม่ได้ ดังที่พบเมื่อใช้แผ่นรองรับพลาสติกของบริษัท Isekyu ซึ่งเป็นแผ่นที่เคลือบด้วยวัสดุบางอย่างที่ทำให้ผิวลื่นมากเกินไป ในการใช้งานจะเช็ดผิวด้วยอะซิโตนเพื่อขจัดผิวเคลือบนั้น และพบว่าแผ่นยึดติดกับแผ่นรองรับพลาสติกดีขึ้น สำหรับการขึ้นรูปแผ่นจากสเลอรี่ของอูมินาจะไม่เห็นการหดตัวชัดเจนเท่ากับแผ่นใสจากการทดลองในตารางที่ 4.3 ที่จะหดเข้ามาเป็นก้อนอยู่กลางแผ่นรองรับพลาสติกที่ไม่ได้เช็ดผิว เป็นเพราะสเลอรี่ที่มีอูมินาอยู่ด้วยจะมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้สเลอรี่ที่เทไปยังคงรูปเป็นแผ่นได้ตามเดิม แต่อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นการหดตัวได้จากแผ่นก่อนเผาที่ผ่านการอบแห้งแล้ว แผ่นจะเกิดรอยที่มีลักษณะเป็นวงกลมหลายๆวงซ้อนกันอันเนื่องมาจากการหดตัวจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในของแผ่น การเช็ดแผ่นรองรับพลาสติกด้วยอะซิโตนก่อนสามารถแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน เมื่อผ่านขั้นตอนการอบแห้งแผ่นควรยังติดอยู่กับแผ่นรองรับพลาสติกและสามารถดึงให้ลอกออกมาได้โดยง่ายและไม่มีเศษติดอยู่อย่างในรูปที่ 4.4





รูปที่ 4.3 แผ่นที่มีการหดตัว



รูปที่ 4.4 แผ่นที่ลอกออกจากแผ่นรองรองรับพลาสติกได้ไม่สมบูรณ์

พบว่าการผสม PVA มวลโมเลกุล 9000-10000 หรือ ซีรานเคอร์ กับ กลีเซอริน มวลโมเลกุล 92.10 ไม่สามารถขึ้นรูปแผ่นได้ เพราะได้แผ่นที่ไม่มีความแข็งแรง ติดแน่นกับแผ่นรอง และลอกออกมาไม่ได้เพราะแผ่นนี้ไม่ยึดเกาะกัน เมื่อขูดออกมาจะมีลักษณะเป็นเกร็ดนูนๆหรือเป็นไข มักจะมีรายงานว่านิยมใช้กลีเซอรินเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นเมื่อใช้ PVA

เป็นสารช่วยการยึดเกาะ จากผลการทดลองทำให้รู้ว่าต้องคำนึงถึงมวลโมเลกุลของ PVA ด้วย เพราะในขณะที่ PVA มวลโมเลกุลมากกว่า 10000 สามารถใช้ร่วมกับกลีเซอริน ได้ดี PVA มวลโมเลกุล 9000-10000 กลับขึ้นรูปแผ่นไม่ได้ดังกล่าว

นอกจากนี้ Mistler (1995) กล่าวว่าโดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณมากกว่าสารช่วยการยึดเกาะ แต่ผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่าที่อัตราส่วนสารช่วยการยึดเกาะต่อสารเพิ่มความยืดหยุ่นเป็น 1 ต่อ 2 จะได้แผ่นใสที่มีความแข็งแรงต่ำ ขาดง่าย อย่างไรก็ตาม หากนำอัตราส่วนนี้ไปเตรียมสเลอรี่อาจได้แผ่นที่มีสมบัติต่างจากแผ่นใสที่มีเฉพาะสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่น เพราะผงอูมินาที่เติมลงไปจะทำให้สเลอรี่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างทั้ง ความหนืด แรงดึงผิว และ pH ซึ่งน่าสนใจศึกษาต่อไป

จากตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงการเตรียมสเลอรี่ของอูมินาในระบบที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายและระบบที่ใช้ตัวทำละลายอื่นๆ มีอัตราส่วนระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่าง ๆ กัน Shanefield และ Mistler (1974) ใช้ PVB เป็นสารช่วยการยึดเกาะ ปริมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ PEG 4.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็น Trichloroethylene และ Ethyl alcohol ส่วน Ushifusa และ Cima (1991) ใช้ Acrylic emulsion เป็นสารช่วยการยึดเกาะปริมาณ 14.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ PEG 1200 ปริมาณ 2.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมสเลอรี่และขึ้นรูปแผ่นด้วยกระบวนการค็อกเตอร์เบลคโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยการกระจายตัวและสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เลือกไว้ซึ่งแสดงเป็นคัวหนาในกรอบสี่เหลี่ยมในตารางที่ 4.3 ส่วนสารเติมแต่งอื่นๆใช้ในอัตราส่วนตามที่แสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ยังทดลองขึ้นรูปแผ่นที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นอื่นๆที่ไม่ได้เลือกในตารางที่ 4.3 และอัตราส่วนนอกเหนือจากตารางที่ 4.3 ด้วย เช่น 4:1 5:1 1.5:1 เป็นต้น

การเลือกสูตรที่ดีที่สุดจะดูจากสมบัติบางประการของสเลอรี่และแผ่นก่อนเผาที่เตรียมได้ ส่วนพารามิเตอร์ของเครื่องมือค็อกเตอร์เบลคแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของเครื่องมือค็อกเตอร์เบลต

พารามิเตอร์	
ระยะใบมีด (blade gap, mm.)	2.50
ความเร็วแผ่นรองรับพลาสติก (carrier speed, cm/min)	30.00
ชนิดของแผ่นรองรับพลาสติก (carrier type)	แผ่นรองรับพลาสติกสำหรับ กระบวนการค็อกเตอร์เบลตของ บริษัทIsckyเซ็คมิวด้วยอะซิโตน

เมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B1 ได้ผลดังตารางที่ 4.6 สูตรที่เลือกไว้จากตารางที่ 4.3 จะแสดงเป็นตัวหนาและมีเครื่องหมาย “ \* ”

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติของสเลอริและแผ่นก่อนเผาเมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B1

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยึดเกาะ	สารเพิ่มความ ยึดหยุ่น	สเลอริ	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับแผ่น รองรับพลาสติก	ความยึดหยุ่น
<b>B1*</b>	<b>ไม่มี</b>				
10.00	-	ได้ฟองออกยาก	เกิดทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี, เพราะมาก
20.00	-	ได้ฟองออกยาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	เกาะแน่น	ไม่มี
<b>B1</b>	<b>P1</b>				
ที่ 2:1*					
10.00	5.00	ได้ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
15.00	7.50	ได้ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
ที่ 1:1					
7.50	7.50	ได้ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
15.00	15.00	ได้ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยึดเกาะ	สารเพิ่มความ ยึดหยุ่น	ผลลรี	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับแผ่น รองรับพลาสติก	ความยึดหยุ่น
ที่ 1:2 5.00	10.00	ไล่ฟองออกยาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
B1 ที่ 2:1*	P2	ไล่ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
10.00	5.00	ไล่ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
16.00	7.50	ไล่ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
B1 ที่ 1:1*	P4	ไล่ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี
7.5	7.5	ไล่ฟองออกยาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ไม่มี

จากการสังเกตผลลรีและแผ่นก่อนเผาได้ผลดังตารางที่ 4.6 อาจจะสรุปได้ว่า B1 ไม่เหมาะกับการทำสเลอรีของอลูมินาสำหรับการขึ้นรูปแบบแผ่น โดยเฉพาะเป็นแผ่นหนา เพราะเมื่อไล่ฟองอลูมินาจะได้ผลแตกต่างจากการทดลองขึ้นรูปแผ่นใสที่มีเฉพาะสารช่วยเพิ่มความยึดหยุ่นและสารช่วยการยึดเกาะอย่างมาก พบว่าถึงแม้จะใช้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ก็ยังได้แผ่นที่เปราะมาก และที่ทุกๆอัตราส่วนจะได้แผ่นแตกรานทั่วไป

เมื่อใช้สารช่วยการยัดเกาะ B2 ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติของสเลอริและแผ่นก่อนเผาเมื่อใช้สารช่วยการยัดเกาะ B2

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยัดเกาะ	สารเพิ่มความ ยัดหุ้ม	สเลอริ	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับแผ่น รองรับพลาสติก	ความยัดหุ้ม
B2*	ไม่ใช่				
27.00	-	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตกแต่ผิวด้าน	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นงอและแข็งมาก
15.00	-	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตกแต่ผิวด้าน	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นงอและแข็งมาก
B2 ที่ 1:1*	P4				
7.50	7.50	ฟองอากาศน้อยลง	มีรอยแตกเล็กๆ	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดีแต่แผ่นงอมาก
8.00	8.00	ฟองอากาศน้อยลง	ไม่มี, ผิวไม่เรียบ	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย, งอ
10.00	10.00	มีเศษของสเลอริ หลังขัดฟอง	ไม่มี, ผิวไม่เรียบ	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย, งอ
ที่ 2:1					
10.00	5.00	ฟองอากาศน้อย	แผ่นแตกเป็นร่อง ยาว	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย, งอมาก
ที่ 10:1					
10.00	1.00	ฟองอากาศน้อย	ไม่แตก	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย, งอเล็กน้อย

ปัญหาที่พบมากที่สุดเมื่อใช้ B2 คือการงอตัวอย่างมากและไม่เกาะแผ่นรองรับพลาสติก แต่มีข้อดีคือแผ่นไม่แตก และมีความยัดหุ้มดี

## เมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B3 ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติของสเลอรีและแผ่นก่อนเผาเมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B3

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยึดเกาะ	สารเพิ่มความ ยึดหยุ่น	สเลอรี	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับ แผ่นรองรับ พลาสติก	ความยึดหยุ่น
B3*	ไม่มี				
10.00	-	มีฟองอากาศมาก	แตกรานทั่วไป	เกาะแผ่น	แผ่นเปราะมาก
15.00	-	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตก	เกาะแผ่น	แผ่นขาดง่าย
20.00	-	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตก	เกาะแผ่น	แผ่นขาดง่าย
B3 ที่ 2:1 *	P1				
10.00	5.00	มีฟองอากาศมาก	รอยแตกรูปกากบาท	เกาะแผ่น	แผ่นขาดง่าย
15.00	7.50	มีฟองอากาศมาก	แผ่นแตกบริเวณขอบ	เกาะแผ่น	แผ่นขาดง่าย
ที่ 1:1					
10.00	10.00	มีฟองอากาศมาก	ไม่เป็นฟิล์ม	ติดแน่น	ไม่มี
ที่ 1:2					
5.00	10.00	มีฟองอากาศมาก	แผ่นแตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่น	ไม่มี
9.00	18.00	มีฟองอากาศมาก	แผ่นแตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่น	ไม่มี
ที่ 4:1					
8.00	2.00	มีฟองอากาศมาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่น	ไม่มี
20.00	5.00	มีฟองอากาศมาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่น	ไม่มี
ที่ 5:1					
15.00	3.00	มีฟองอากาศมาก	แตกที่ขอบ	ไม่เกาะแผ่น	แผ่นแข็งมาก

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยัดเกาะ	สารเพิ่มความ ยัดหยุ่น	สเลอรี	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับ แผ่นรองรับ พลาสติก	ความ ยัดหยุ่น
B3 ที่ 1.5:1 9.00	P1  6.00	มีฟองอากาศมาก	รอยแตกรูปกากบาท	เกาะแผ่น	แผ่นขาดง่าย
B3 ที่ 2:1* 10.00	P4  6.00	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตก	ไม่เกาะแผ่น	ต่ำ
ที่ 1:1 10.00	10.00	มีฟองอากาศมาก	ไม่แตก	ไม่เกาะแผ่น	ต่ำ
ที่ 1:2 9.00	18.00	มีฟองอากาศมาก	มีรอยแตกทั่วไป	ไม่เกาะแผ่น	ต่ำ

สาเหตุที่เลือก B3 มาทดลองทำสเลอรีเพราะมีแนวโน้มว่าจะได้แผ่นเรียบมาก  
 ดังเช่นแผ่นจากสเลอรีที่ใช้เฉพาะ B3 แม้แผ่นจะขาดง่าย คาดว่าเมื่อเติมสารเพิ่มความยัดหยุ่นจะ  
 สามารถแก้ปัญหานี้ได้ แต่พบว่าแม้จะทดลองที่หลายอัตราส่วนแต่ก็ยังได้แผ่นที่มีความยัดหยุ่นต่ำอยู่

เมื่อใช้สารช่วยการยัดเกาะ B4 ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติของสเลอร์และแผ่นกอนเผาเมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B4

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วยการ ยึดเกาะ	สารเพิ่มความ ยึดหยุ่น	สเลอร์	แผ่นกอนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับแผ่น รองรับพลาสติก	ความยึดหยุ่น
<b>B4*</b>	<b>ไม่มี</b>				
10.00	-	ฟองอากาศน้อย	มีรอยแตกทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย
20.00	-	ฟองอากาศน้อย	ไม่แตก	ไม่เกาะแผ่นรอง	แผ่นขาดง่าย
<b>B4*</b> ที่ 2:1	<b>P1</b>				
10.00	5.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นร่องยาว	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดีมาก, แผ่นงอ
9.00	4.50	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นร่องยาว	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดีมาก, แผ่นเรียบ
8.00	4.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นรอยทั่วไป	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดี
ที่ 1:1					
5.00	5.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ติดแน่นบางจุด	แผ่นเปราะ
7.50	7.50	ฟองอากาศน้อย	มีรอยแตกเล็กๆ	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดี
10.00	10.00	ฟองอากาศน้อย	มีรอยแตกเล็กๆ	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดี
ที่ 1:2					
5.00	10.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ติดแน่นบางจุด	ต่ำ
ที่ 5:1					
10.00	2.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นร่องยาวที่ขอบ	ไม่เกาะแผ่นรอง	ต่ำ
<b>B4</b> ที่ 2:1	<b>P4</b>				
10.00	5.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่นรอง	ดี
14.00	7.50	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นร่องยาว	ไม่เกาะแผ่นรอง	มากไป (คล้ายยาง)
ที่ 5:1					
10.00	2.00	ฟองอากาศน้อย	แตกเป็นร่องยาวที่ขอบ	ไม่เกาะแผ่นรอง	ต่ำ



เมื่อใช้ B4 จะได้สเตอร์ค่อนข้างดีเพราะมีฟองอากาศน้อย มีความหนืดเหมาะสมกับการขึ้นรูปแผ่นหนาแต่มีปัญหาเกี่ยวกับรอยแตกแบบร่องยาว จากตารางจะเห็นว่าที่อัตราส่วน 2:1 ที่ 9.00 และ 4.50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผงเซรามิกได้แผ่นที่มีสมบัติทุกประการยกเว้นรอยแตกเป็นร่องยาว เพราะได้แผ่นเรียบถึงแม้จะไม่เกาะแผ่นรองรับพลาสติก มีความยืดหยุ่นพอเหมาะ ในขณะที่ 10.00 และ 5.00 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผงเซรามิกจะได้แผ่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันแต่แผ่นงอมากกว่าและยืดหยุ่นน้อยกว่าเมื่อแห้ง รอยแตกที่เป็นร่องยาวไม่ได้มีสาเหตุมาจากส่วนผสมของสเตอร์ไม่ดี แต่เกิดจากการอบแห้งที่ไม่เหมาะสม เพราะพบว่าเมื่อควบคุมภาวะการอบแห้งให้อยู่ในไออ้อมตัวของน้ำจะแก้ปัญหาได้ ต่างกับแผ่นที่มีรอยแตกกรานทั่ว ไปดังที่ 8.00 และ 4.00 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผงเซรามิกซึ่งเป็นปัญหาจากการที่สเตอร์มีอัตราส่วนไม่เหมาะสมโดยตรง สำหรับที่อัตราส่วน 9.00 และ 4.50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผงเซรามิก หากแก้ไขปัญหาการอบแห้งได้ก็จะได้แผ่นก่อนเผาที่มีคุณภาพดี และนำไปสู่แผ่นผ่านการซินเทอริงคุณภาพดีต่อไป

การเกิดรอยแตกเป็นร่องยาวเพราะแผ่นแห้งตัวไม่สม่ำเสมอ ผิวด้านบนจะแห้งก่อนเป็นฟิล์มบางๆและเกิดการหดตัวที่ไม่เท่ากับด้านล่าง แผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นจะดึงตัวจนเกิดรอยแยกขึ้น ในบางแผ่นที่หนามากๆจะเห็นการดึงตัวนี้ชัดจนที่บริเวณขอบจะเกิดลักษณะคล้ายขั้นบันได การแก้ไขคือเปลี่ยนจากที่เคยอบแผ่นที่อุณหภูมิห้องเป็นอบในตู้อบที่ควบคุมความชื้นได้พบว่าที่ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซนต์สามารถอบแผ่นหนาประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตรได้ค่อนข้างดี นั่นคือยังมีส่วนที่แตกเป็นร่องยาวหลงเหลืออยู่บ้างบริเวณขอบ เมื่อแห้งแผ่นจะไม่เกาะแผ่นรองรับพลาสติกแต่ยังคงเรียบอยู่ ส่วนแผ่นที่บางกว่าจะอบได้ง่ายกว่า พบว่าสามารถอบแผ่นขนาด 0.5-0.7 มิลลิเมตรได้ที่ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซนต์ได้โดยแผ่นไม่แตก

ผลจากตารางที่ 4.9 สรุปได้ว่า PVA มวลโมเลกุล 100000 ใช้ได้ดีกับ PEG มวลโมเลกุล 400 ที่อัตราส่วน 2:1 โดยใช้ที่ 9.00 และ 4.50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผงเซรามิกตามลำดับ มีปัญหาด้านการแห้งตัวต้องอบแห้งในสภาพที่ควบคุมความชื้นได้ และเลือกใช้อัตราส่วนนี้ในการเตรียมสเตอร์ของอุมิยาเพื่อคุณภาพของการเติมสารปรับปรุงสมบัติต่อไป

เมื่อใช้สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะ B5 ได้ผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติของสเลอรีและแผ่นก่อนเผาเมื่อใช้สารช่วยการยึดเกาะ B5

องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิก)		การตรวจสอบสมบัติ			
สารช่วย การยึดเกาะ	สารเพิ่ม ความ ยึดหยุ่น	สเลอรี	แผ่นก่อนเผา		
			การแตกราน	การเกาะกับ แผ่นรองรับ พลาสติก	ความยึดหยุ่น
B5*	ไม่ใช่				
10.00	-	ฟองอากาศน้อยมาก	แตกรานทั่วไป	ไม่เกาะแผ่น	แผ่นเปราะ
20.00	-	ฟองอากาศน้อยมาก	แตกเป็นรอยเล็กๆ	ไม่เกาะแผ่น	ดี, งอเล็กน้อย
25.00	-	ฟองอากาศน้อยมาก	แตกเป็นรอยเล็กๆ	ไม่เกาะแผ่น	ดีมาก, งอเล็กน้อย
B5* ที่ 2:1	P1				
10.00	5.00	ฟองอากาศน้อยมาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่น	แผ่นเปราะ
15.00	7.50	ฟองอากาศน้อยมาก	แตกเป็นชิ้นใหญ่	ไม่เกาะแผ่น	แผ่นเปราะ

ซีรานเดอร์ หรือ DB-R1 เป็นสารช่วยการยึดเกาะที่ไม่ทราบองค์ประกอบและมวลโมเลกุลที่แน่นอน ข้อมูลของบริษัทมีรายละเอียดว่า เป็นสารที่ใช้กับระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย มีการยกตัวอย่างสูตรการเตรียมสเลอรีของอลูมินาสำหรับการขึ้นรูปแบบแผ่นไว้ดังนี้

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100.00	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
DB-R1	11.00	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
dispersant (SN 5020)	0.50	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
defoamer (SN 247)	0.05	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
น้ำ	33.30	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากสูตรด้านบนจะเห็นว่าไม่มีการใช้ซีทรานเตอร์ร่วมกับสารเพิ่มความยืดหยุ่นและใช้เพียง 11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของออลูมินาเท่านั้น แต่เมื่อนำมาทดลองเตรียมสเลอรีโดยใช้ซีทรานเตอร์ที่ 10 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.10 แผ่นที่ขึ้นรูปได้มีรอยแตกทั่วไป ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างการเตรียมสเลอรีตามการทดลองในตารางที่ 4.10 กับสูตรของบริษัทคือชนิดของออลูมินา แสดงว่าลักษณะบางประการของ A-152 SG ที่ใช้ต่างกันอย่างมากกับออลูมินาในสูตรของบริษัท A-152 SG มีขนาดอนุภาคประมาณ 1.2 ไมโครเมตรในขณะที่ออลูมินาของบริษัทซึ่งไม่ได้ระบุว่าเป็น SCA-96 หรือ SCA-92 หรืออื่นๆมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 3-4 ไมโครเมตร ออลูมินาที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าย่อมต้องใช้สารช่วยการยึดเกาะมากกว่าในการยึดเหนี่ยวอนุภาคไว้ด้วยกันเพราะมีพื้นที่ผิวมากกว่า เมื่อใช้ออลูมินาเป็น A-152 SG จึงมีความเป็นไปได้ที่จะต้องใช้ซีทรานเตอร์มากกว่า 11 เปอร์เซ็นต์ แต่ในการทดลองใช้ซีทรานเตอร์มากถึง 25 เปอร์เซ็นต์แผ่นก็ยังไม่มีรอยแตกเมื่อแห้ง ไม่แข็งแรง ขาดง่าย ซึ่งถ้าใช้มากกว่านี้ก็จะเกิดปัญหาในขั้นตอนการเผาจัดสารช่วยการยึดเกาะ พบว่าที่ 30 เปอร์เซ็นต์ แผ่นจะมีผิวแตกร่อนเหมือนรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อแก้ไขด้วยการขึ้นอุณหภูมิซ้ำมากๆ และแช่อุณหภูมิจุดที่สารช่วยการยึดเกาะสลายตัวนานๆจะแก้ไขปัญหาคือหลุดลอกได้ แต่แผ่นต้องบางประมาณ 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ถึงอย่างไรก็ตามแผ่นที่ได้ก็จะมีความหนาแน่นต่ำและเปราะ อันเป็นสาเหตุเนื่องมาจากมีปริมาณสารเติมแต่งอยู่มากเกินไป เมื่อถูกเผาจัดไปก็จะเหลือส่วนที่เป็นออลูมินาที่อนุภาคเกาะตัวกันอยู่แบบหลวมๆ ทำให้มีความหนาแน่นต่ำดังกล่าว

เมื่อทดลองใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นร่วมด้วยพบว่าไม่ช่วยให้ได้แผ่นที่มีสมบัติดีขึ้นจากการทดลองใช้ร่วมกับ PEG 400 PEG 1000 หรือ PEG 2000 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าได้สเลอรีมีสมบัติดีมากมีฟองน้อยและขจัดออกได้ง่าย แต่แผ่นที่ได้จากการใช้ซีทรานเตอร์กับ PEG 1000 ที่อัตราส่วน 2:1 จะงอและแข็ง เมื่อพยายามเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นมากขึ้นเป็นอัตราส่วน 1:1 ก็พบก้อนสีขาวขุ่นของสารเติมแต่งทั้งสองที่ไม่ละลายด้วยกันกระจายทั่วไปในสเลอรีหลังการบด ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการทดลองเพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างสารช่วยการยึดเกาะและสารเพิ่มความยืดหยุ่นในตารางที่ 4.3 เมื่อใช้ร่วมกับ PEG 2000 พบว่าที่อัตราส่วน 25:5 จะได้แผ่นก่อนเผาที่ดีมีผิวเรียบ ไม่งอ มีความยืดหยุ่นสูง แต่เมื่อผ่านการเผาก็จะได้แผ่นที่มีผิวหลุดลอก เปราะ เมื่อพยายามลดปริมาณ B5 และ P3 ลงมาให้น้อยที่สุดที่ยังคงได้แผ่นก่อนเผาที่ดีคือที่ 15:10 และที่ 18:7.5 ก็ยังได้แผ่นหลังเผาที่ผิวหลุดลอกเหมือนเดิม สาเหตุคือสารเติมแต่งทั้งสองไม่เข้ากันตั้งแต่แรกดังในตารางที่ 4.3

“สรุปว่าที่อัตราส่วน PVA 100000 ต่อ PEG 400 เป็น 2:1 และใช้ในปริมาณ 9 และ 4.5 เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิกตามลำดับ สามารถขึ้นรูปแผ่นด้วยกระบวนการค็อกเตอร์เบลคได้ดี เนื่องจากได้สเลอรี่ที่มีฟองอากาศน้อย ขจัดออกได้ง่าย ได้แผ่นก่อนเผาและหลังเผาที่มีสมบัติในเบื้องต้นดีนั่นคือ แผ่นเรียบ แม้จะยึดติดกับแผ่นรองรับพลาสติกในระยะเวลาสั้นๆก่อนจะลอกตัวออกเองในขั้นตอนการอบแห้งแต่ก็ทำให้ขจัดปัญหาการรอตตัวของแผ่นได้ มีสภาพผิวที่มีความยืดหยุ่นดีพอที่จะม้วนเก็บได้ และเมื่อผ่านการเผาจะได้แผ่นที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนนี้เป็นแนวทางหลักในการทดลองสูตรที่มีดินขาวนิวซีแลนด์และทลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติต่อไป

อย่างไรก็ตามสูตรที่ดีที่สุดที่เลือกดังกล่าวยังมีปัญหาการอบแห้ง เพราะยังมีรอยแตกเป็นทางยาวเหลืออยู่บ้างบริเวณขอบ ซึ่งเป็นเรื่องที่ควรศึกษาต่อไป”

การออกแบบการทดลองเติมดินขาวนิวซีแลนด์และทลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ แสดงในหัวข้อ 3.4.1.5

#### 4.3 การทดลองเพื่อคุณสมบัติของดินขาวนิวซีแลนด์ และทลคัม

การเตรียมสเลอรี่ที่ผสมดินขาวนิวซีแลนด์และทลคัมจะใช้อัตราส่วน PVA 100000 ต่อ PEG 400 เป็น 2:1 และใช้ในปริมาณ 9 และ 4.5 เปอร์เซ็นต์ของผงเซรามิกตามลำดับ ส่วนปริมาณสารเติมแต่งอื่นๆและน้ำแสดงในตารางที่ 4.4 สเลอรี่ที่ได้จะมีความหนืดมากกว่าเมื่อมีเฉพาะอลูมินาเล็กน้อย จากข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่ผิวและขนาดในตารางที่ 4.1 ดินขาวนิวซีแลนด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด สารที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากย่อมต้องการน้ำและสารเติมแต่งปริมาณมากเพื่อช่วยในการยึดเกาะกันของอนุภาค แต่เนื่องจากเติมสารปรับปรุงสมบัติในปริมาณน้อยมากคืออยู่ในช่วง 1.67 ถึง 3.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงเซรามิกทั้งหมด ทำให้สเลอรี่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและสามารถขึ้นรูปแผ่นด้วยกระบวนการค็อกเตอร์เบลคได้ดีที่อัตราส่วนและปริมาณสารเติมแต่งเท่าเดิม การทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมดินขาวนิวซีแลนด์และทลคัม แสดงในตารางที่ 4.11 ตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.4.1.5 และ 3.4.1.6

ตารางที่ 4.11 สรุปการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมดินขาวนิวซีแลนด์และทัลคัม

การทดลอง	อลูมินา	MgO	อัตราส่วน		อุณหภูมิเผา (องศาเซลเซียส)
			อลูมินา : ดินขาว และทัลคัม	ดินขาว : ทัลคัม	
1	A-152SG	-	-	-	1500,1550,1620
2	A-152SG	0.5 %wt.	-	-	1500,1550,1620
3	SCA-96	-	-	-	1500,1550,1620
4	A-152SG	-	90 : 10	1 : 2	1500,1550,1620
5	A-152SG	-	90 : 10	1 : 1	1500,1550,1620
6	A-152SG	-	93 : 7	1 : 2	1500,1550,1620
7	A-152SG	-	93 : 7	1 : 1	1500,1550,1620

ตรวจสอบสมบัติของสเลอร์ที่เตรียมได้ด้วยการวัดค่าความหนืด และค่า pH ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.12 และทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด และ pH แสดงในหัวข้อ 4.3.2

#### 4.3.1 ผลการวัดค่าความหนืด และ pH

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดค่าความหนืด และ pH

การทดลอง	ความหนืด (มิลลิปาสคาล.วินาที)	pH
1	10732	7.83
2	12364	8.15
3	10235	7.93
4	11550	8.92
5	12463	8.58
6	10104	8.82
7	11985	8.08

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด และ pH

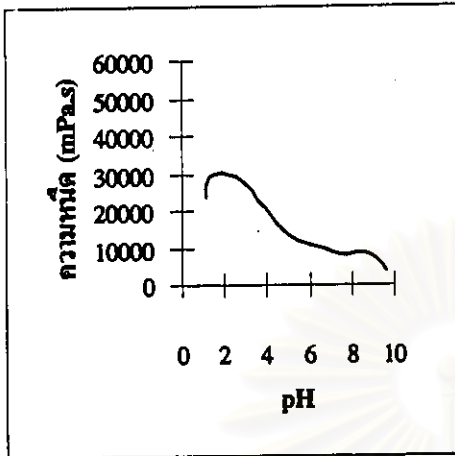
นำสเลอรี่ของการทดลอง 1 2 3 6 และ 7 มาตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด และ pH ได้กราฟดังรูปที่ 4.5 4.6 4.7 และ 4.8 เหตุที่เลือกการทดลองทั้งสี่ เพราะเป็นตัวแทนของระบบที่ต่างกันทั้งสี่แบบคือ

การทดลองที่ 1 ใช้ธูมิมา A-152 SG เพียงอย่างเดียว

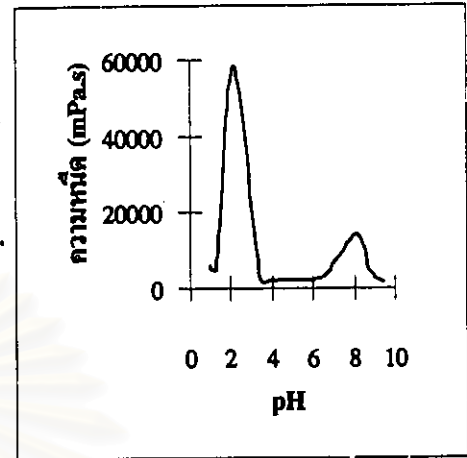
การทดลองที่ 3 ใช้ SCA-96 ซึ่งเป็นธูมิมาผสมสารปรับปรุงสมบัติสำหรับขึ้นรูปด้วยกระบวนการค็อกเตอร์เบลคจากบริษัท Isekyu

การทดลองที่ 6 ใช้ธูมิมา A-152 SG และใช้สารปรับปรุงสมบัติเป็นดินขาว และทลคัมที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2

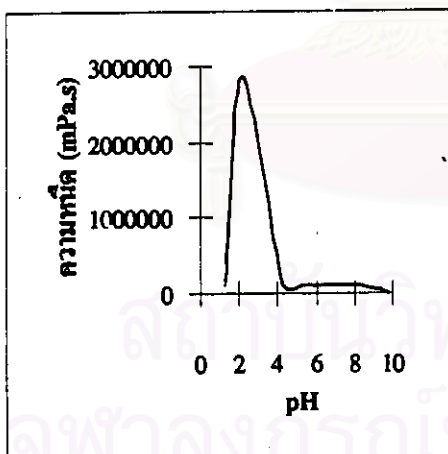
การทดลองที่ 7 ใช้ธูมิมา A-152 SG และใช้สารปรับปรุงสมบัติเป็นดินขาว และทลคัม 1 ต่อ 1



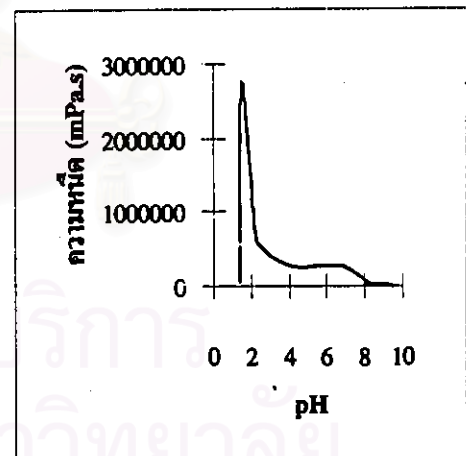
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความหนืด และ pH  
ของการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความหนืด และ pH  
ของการทดลองที่ 3



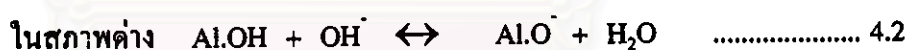
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความหนืด และ pH  
ของการทดลองที่ 6



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  
ความหนืด และ pH  
ของการทดลองที่ 7

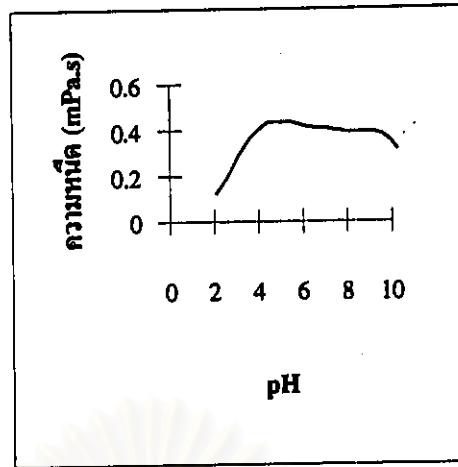
การทดลองทั้งสี่มีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ pH ไปในทิศทางเดียวกัน สเตอริจะมีความหนืดสูงสุดที่ pH ช่วงกรดที่ 2-3 จากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนลดต่ำสุดที่ pH ประมาณ 1 และ 4 ก่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ pH 5-8 แต่น้อยกว่าค่าความหนืดในช่วงแรกๆ มาก แสดงว่าช่วง pH ที่เหมาะกับการเตรียมสเตอริคือที่ pH ช่วง 5-8 และที่ต่ำกว่า 1 สเตอริของการทดลอง 1 ถึง 7 มีค่า pH อยู่ในช่วง 7.83-8.92 จึงเป็นช่วงที่เหมาะสมไม่ต้องปรับ pH อีก ลักษณะของสเตอริที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีฟองอากาศน้อย สามารถขจัดฟอง (deairing) ด้วยเครื่องดึงอากาศที่ความดันสูง สเตอริมีความหนืดอยู่ในช่วง 9981-12963 มิลลิปาสกาลวินาที เป็นค่าค่อนข้างสูง Misdler (1995) กล่าวในหนังสือเกี่ยวกับหลักการของกระบวนการค็อกเคอร์เบลดว่าโดยทั่วไปความหนืดควรมีค่าประมาณ 500-6000 มิลลิปาสกาลวินาที เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดยี่ห้อ Brookfield ใช้เข็มวัดเบอร์ RV4 ที่ 20 rpm อย่างไรก็ตามในการขึ้นรูปแผ่นชนิดหนาต้องการสเตอริความหนืดสูงเป็นพิเศษเพื่อให้สามารถคงรูปร่างอยู่ได้บนแผ่นรองรับพลาสติก จนกว่าจะแห้ง

การที่สเตอริมีค่าความหนืดเปลี่ยนไปเมื่อ pH เปลี่ยนเพราะองค์ประกอบข้างในเปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิละลายในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ที่ผิวซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ pH โดยในสภาพกรดจะมีค่าประจุโดยรวมเป็นบวกและเป็นลบในสภาพเบส ปฏิกิริยาไฮเดรชันแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2



และสเตอริของอลูมินาที่ไม่เติมสารอินทรีย์ใดๆจะมีจุดที่มีปริมาณของประจุทั้งสองเท่ากันเรียกว่า "isoelectric point, IEP" ที่ pH ประมาณ 7-8 (Gil, Almeida และ DiZ, 1996) ที่จุดนี้จะมี ความหนืดมากที่สุดเพราะค่าประจุโดยรวมเป็นศูนย์ไม่มีแรงผลักระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการรวมตัวกันค่าความหนืดจึงสูง เมื่อเติมสารเติมแต่งลงไปจะทำให้ IEP ของอลูมินาเปลี่ยนไปอาจจะเลื่อนไปอยู่ที่ pH มากขึ้นหรือน้อยลงแล้วแต่ชนิดของสารเติมแต่งนั้นๆ ดังเช่นสเตอริของการทดลอง 1 ถึง 7 มีจุด IEP ลดลงไปอยู่ที่ pH ประมาณ 2-3 แสดงว่าที่ pH 2-3 ซึ่งเป็นจุดที่อลูมินามีค่าประจุรวมเป็นบวกตามสมการที่ 4.1 อาจมีสารบางตัวแตกตัวให้ประจุลบออกมาในปริมาณเท่ากันจึงทำให้ค่าประจุโดยรวมเป็นศูนย์สเตอริจึงมีความหนืดสูงอีกครั้ง พิจารณาสารเติมแต่งแต่ละตัว SN 5020 คือ Ammonium polycarbonic acid เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ จะแตกตัวให้ประจุบวกของ  $\text{NH}_4^+$  และประจุลบของกรดคาร์บอนิก เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับ pH ของ SN 5020 ได้กราฟในรูปที่ 4.9





รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับ pH ของ SN 5020

SN 5020 มีค่าความชื้นเปลี่ยนตาม pH น้อยมาก มีค่าอยู่ในช่วงไม่ถึง 1 มิลลิปาสกาลวินาที และมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ pH ประมาณ 4 ดังนั้นจึงไม่น่าจะเป็นตัวหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสเลอรี่ที่ pH 2-3 ส่วน PVA และ PEG ไม่เกิดการแตกตัวตาม pH ที่เปลี่ยนไปเพราะไม่ใช่สารประกอบอไอออนิก Onada (1978) กล่าวว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์อาจทำให้ค่าความชื้นของสารช่วยการยึดเกาะเพิ่มขึ้นหรือต่ำลง แต่จะมีผลมากต่อสารช่วยการยึดเกาะที่เป็นสารประกอบอไอออนิก ส่วน PVA ซึ่งไม่เป็นสารอไอออนิกจะมีค่าความชื้นคงที่ใน pH ช่วงกว้าง พิจารณาดินขาวซึ่งเป็น kaolin ชนิด holloysite มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  Heystek (1978) กล่าวว่าในระบบที่ใช้ดินขาวและใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย พื้นที่ผิวของดินขาวและประจุที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของสเลอรี่ เมื่อดูกราฟในรูปที่ 4.5 4.6 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่ากราฟของการทดลองที่ 6 และ 7 ซึ่งเป็นสูตรที่มีดินขาวนิวซีแลนด์และทัลคัมผสมอยู่ด้วยจะมีความชื้นสูงกว่าและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นชัดเจนกว่าการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่ได้เติมดินขาวนิวซีแลนด์และทัลคัมมาก ส่วนการทดลองที่ 3 ใช้ SCA-96 ซึ่งเป็นอนุภาคน้ำที่ผสมสารปรับปรุงสมบัติอันได้แก่ดินขาวและทัลคัมก็มีกราฟที่มีค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดเจนกว่าการทดลองที่ 1 เช่นกัน แต่มีค่าความชื้นสูงสุดต่ำกว่าการทดลองที่ 6 และ 7 อาจเป็นเพราะดินขาวและทัลคัมที่ใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติเป็นคนละชนิดกัน

#### 4.3.3 ผลการตรวจสอบแผ่นก่อนเผา

สมบัติแผ่นก่อนเผาแสดงในตารางที่ 4.13 รายละเอียดของการทดลองทั้ง 7 แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.18 สมบัติแผ่นก่อนเผา

สมบัติแผ่นก่อนเผา	การทดลอง						
	1	2	3	4	5	6	7
การลอกจากแผ่น (release)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ความยืดหยุ่น (flexibility)	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
การแตกราน (cracks)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความหนาแน่นก่อนเผา (green bulk density, g/cm <sup>3</sup> )	2.11	2.40	2.22	2.30	2.41	2.24	2.34

แผ่นที่ไม่ได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติมีความหนาแน่นก่อนเผาน้อยที่สุดคือ 2.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเติมแมกนีเซียม 0.5 เปอร์เซ็นต์เป็นสารปรับปรุงสมบัติได้แผ่นที่มีความหนาแน่นก่อนเผาเพิ่มขึ้นมากถึง 2.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเพราะในการเตรียม สเตอร์ใช้น้ำเท่ากับคือ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินขาว แต่สเตอร์ที่เติมแมกนีเซียมมีความหนืดสูงขึ้นกว่าการทดลองแรกที่ไม่ได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติมากเพราะแมกนีเซียมที่ใช้เป็นแมกนีเซียมไลท์ (magnesia light) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมากทำให้ต้องการน้ำมาล้อมรอบอนุภาคมากในการกระจายตัวอยู่ในสเตอร์ เมื่อสัดส่วนของผงเซรามิกในน้ำมากขึ้น (high solid loading) จะทำให้ความหนาแน่นก่อนเผาสูงขึ้น

แผ่นที่มาจากการใช้ SCA-96 มีความหนาแน่นก่อนเผา 2.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มากกว่าแผ่นที่ไม่ได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติ แต่น้อยกว่าแผ่นจากการทดลอง 4 ถึง 7 ซึ่งได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติในอัตราส่วนต่างๆ และมีความหนาแน่นก่อนเผาอยู่ในช่วง 2.24-2.41 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนแผ่นที่มีความหนาแน่นก่อนเผามากที่สุดคือแผ่นที่ได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติเป็นดินขาวและทลคัมที่อัตราส่วนผงเซรามิกต่อสารปรับปรุงสมบัติคือ 93 ต่อ 7 มีอัตราส่วนของดินขาวต่อทลคัมเป็น 1 ต่อ 1 มีความหนาแน่น 2.41 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นที่ได้เตรียมการปรับปรุงสมบัติเป็นดินขาวและทลคัมที่อัตราส่วนผงเซรามิกต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 90 ต่อ 10 แผ่นมีความหนาแน่นก่อนเผามากกว่าที่อัตราส่วน 93 ต่อ 7 เมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนเดียวกัน แผ่นที่มีอัตราส่วนของสารปรับปรุงสมบัติทั้งสองชนิดคือดินขาวต่อทลคัมเป็น 1 ต่อ 1 จะมีความหนาแน่นมากกว่าที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 อธิบายด้วยหลักการเดียวกันกับการเติมแมกนีเซียม ไลท์คือ ดินขาวมีขนาดอนุภาคเล็กมากคือ 0.33 ไมโครเมตร เพราะฉะนั้นจะทำให้สัดส่วนของผงเซรามิกในน้ำมากขึ้นด้วยหลักการเดียวกัน ที่

อัตราส่วน 90 ต่อ 10 มีปริมาณดินขาวมากกว่าที่อัตราส่วน 93 ต่อ 7 ทำให้แผ่นมีความหนาแน่นก่อนเผามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนดินขาวต่อทลคัม แผ่นที่มีดินขาวอยู่มากกว่าคือที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ก็จะมี ความหนาแน่นก่อนเผา มากกว่าเช่นกัน ทลคัมที่ใช้มีขนาดอนุภาคใหญ่ถึง 5.84 ไมโครเมตร

ความหนาแน่นก่อนเผาที่ได้อยู่ในช่วง 2.11-2.41 มีช่วงกว้างกว่าของแผ่นจากการทดลองของ Anderson, Marra และ Mistler (1997) ที่ทดลองการขึ้นรูปแบบแผ่นด้วยการบวมการค็อกเตอร์เบลค โดยใช้ A-152 SG ของบริษัท Alcoa ใช้สารปรับปรุงสมบัติเป็นดินขาวของบริษัท EPK Kaolin และทลคัมของบริษัท Vanderbilt มีค่าความหนาแน่นก่อนเผาอยู่ในช่วง 2.29-2.36



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.4 สมบัติของแผ่นจากการทดลองทั้ง 7 การทดลอง

##### 4.3.4.1 สมบัติของแผ่นจากการทดลองทั้ง 7 การทดลอง

รายละเอียดของการทดลองทั้ง 7 แสดงในตารางที่ 4.11 ค่าของสมบัติต่างๆเป็นค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่าง แสดงข้อมูลดิบในภาคผนวก ก แต่ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกจะได้จาก 1 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.14 สมบัติของแผ่นผ่านการขึ้นเทอริงที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

สมบัติแผ่นผ่านการ ขึ้นเทอริง	การทดลอง						
	1	2	3	4	5	6	7
ความหนาแน่นรวม ( $\text{g/cm}^3$ )	2.53	2.80	-	3.49	3.49	3.55	3.57
การหดตัว (%)							
ด้านกว้าง	8.60	11.31	15.96	18.15	16.88	18.80	17.95
ด้านยาว	8.09	9.12	16.13	18.24	16.95	18.14	18.35
ด้านหนา	7.17	8.13	13.43	16.36	12.63	17.17	15.87
ความพรุนปรากฏ (%)	35.48	28.41	-	1.487	1.964	1.371	1.436
การดูดซึมน้ำ (%)	13.98	10.12	-	0.426	0.565	0.385	0.401
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (1 MHz, 25°C)	16.46	-	17.26	-	-	13.77	15.50

หมายเหตุ : “ - ” หมายความว่าไม่ได้ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.15 สมบัติของแผ่นผ่านการซินเทอร์ริงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส

สมบัติแผ่นผ่านการ ซินเทอร์ริง	การทดลอง						
	1	2	3	4	5	6	7
ความหนาแน่นรวม ( $g/cm^3$ )	3.03	3.34	3.59	3.55	3.57	3.62	3.63
การหดตัว (%)							
ด้านกว้าง	12.71	14.79	18.78	18.32	18.06	19.08	18.91
ด้านยาว	12.73	14.97	18.83	18.33	17.94	17.79	18.88
ด้านหนา	11.15	13.47	17.55	14.21	12.00	16.59	15.96
ความพรุนปรากฏ (%)	23.18	15.02	1.46	1.32	1.29	0.92	1.42
การดูดซึมน้ำ (%)	7.63	4.50	0.41	0.37	0.36	0.25	0.39
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (1 MHz, 25°C)	-	-	16.83	-	-	13.62	15.17

หมายเหตุ : “ - ” หมายความว่าไม่ได้ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.16 สมบัติของแผ่นผ่านการซินเทอร์ริงที่อุณหภูมิ 1620 องศาเซลเซียส

สมบัติแผ่นผ่านการ ซินเทอร์ริง	การทดลอง						
	1	2	3	4	5	6	7
ความหนาแน่นรวม ( $g/cm^3$ )	3.33	3.58	3.66	3.37	3.47	3.62	3.63
การหดตัว (%)							
ด้านกว้าง	16.68	17.97	19.88	18.85	17.22	19.09	19.25
ด้านยาว	15.71	17.85	19.40	17.83	17.85	19.96	19.14
ด้านหนา	13.16	16.43	16.79	15.44	10.26	20.26	17.85
ความพรุนปรากฏ (%)	15.33	6.193	1.066	1.535	2.14	0.918	1.429
การดูดซึมน้ำ (%)	4.60	1.724	0.308	0.454	0.61	0.25	0.39
ค่าคงที่ตัวไดอิเล็กตริก (1 MHz, 25°C)	19.18	-	18.30	-	-	14.48	14.57

หมายเหตุ : “ - ” หมายความว่าไม่ได้ทำการทดลอง

#### 4.3.4.2 ปริมาณออกไซด์ในแต่ละสูตร

จากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของ A-152 SG SCA-96 ดินขาว นิวซีแลนด์ และทัลคัมในตารางที่ 3.3 ทำให้สามารถหาปริมาณของออกไซด์ต่างๆที่มีในแผ่นของแต่ละการทดลองได้ดังนี้

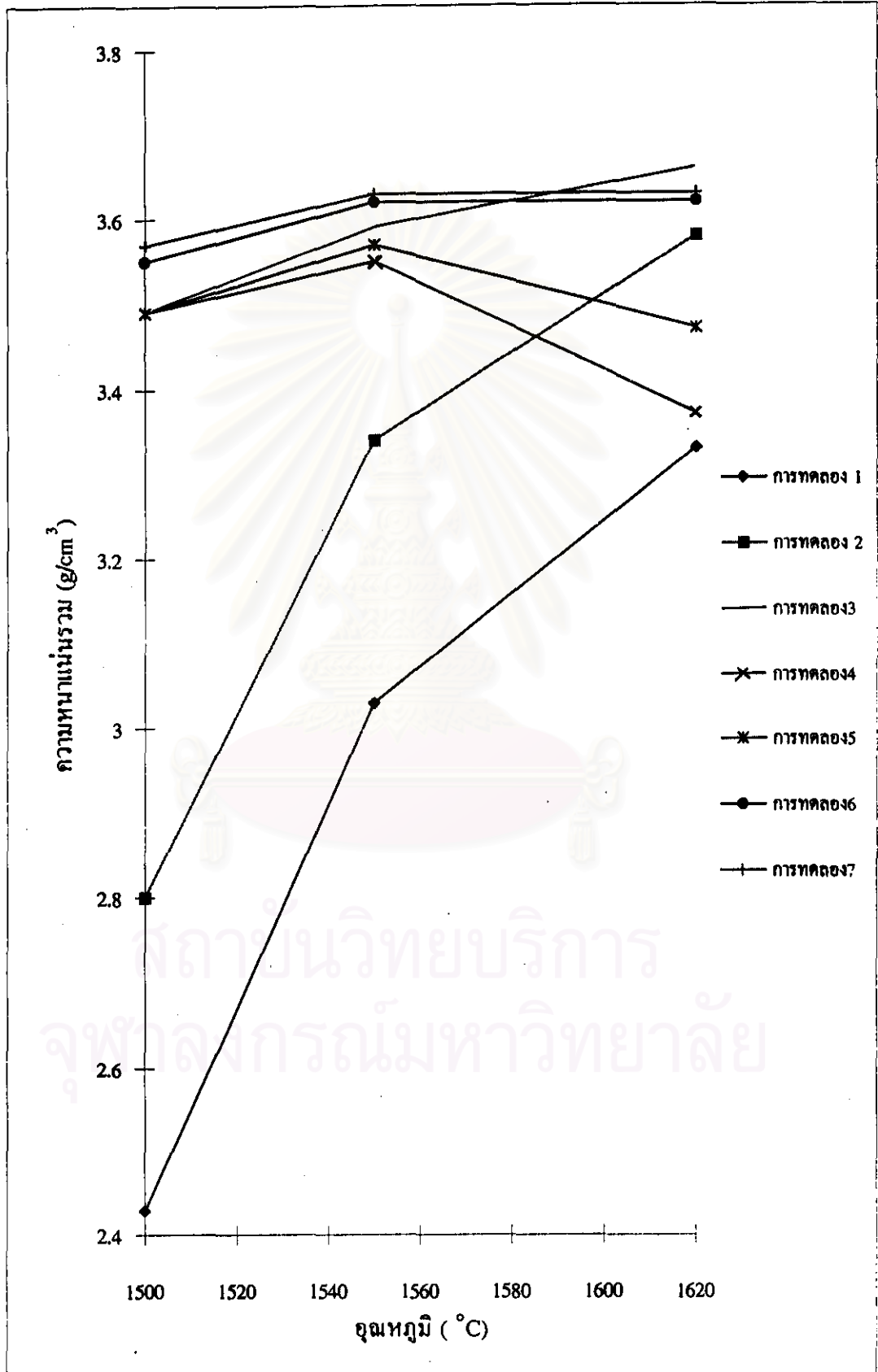
ตารางที่ 4.18 ปริมาณออกไซด์ในแต่ละการทดลอง

การทดลอง	อัตราส่วน:ดินขาว:ทัลคัม	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO
1	100 : 0 : 0	99.97	0	0.05	0.03
2	100 : 0 : 0	99.97	0.5	0.05	0.03
3*	100 : 0 : 0	94.59	0.61	2.37	0.88
4	90 : 3.33 : 6.67	91.16	2.31	5.03	0.08
5	90 : 5 : 5	91.74	1.71	5.04	0.07
6	93 : 2.33 : 4.67	93.80	1.60	3.53	0.07
7	93 : 3.5 : 3.5	94.21	1.20	3.54	0.06

หมายเหตุ : “\*” หมายความว่าใช้ SCA-96 ส่วนสูตรอื่นๆใช้ A-152 SG

## 4.3.5 การตรวจสอบแผ่นแห้งเผา

## 4.3.5.1 ความหนาแน่นรวม (bulk density)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นรวมกับอุณหภูมิเผา

เมื่อการทดลองทั้ง 7 มีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.11 สรุปสั้นๆ ได้ดังนี้คือ

- การทดลองที่ 1 ไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติ  
 การทดลองที่ 2 เติมแมกนีเซียมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ  
 การทดลองที่ 3 ใช้ลูมินาที่ผสมสารปรับปรุงสมบัติพร้อมใช้งานของบริษัท Isekyu  
 การทดลองที่ 4 เติมดินขาวและทัลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ โดยมีอัตราส่วนลูมินาคือต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 90 ต่อ 10 และมีอัตราส่วนดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 2  
 การทดลองที่ 5 เติมดินขาวและทัลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ โดยมีอัตราส่วนลูมินาคือต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 90 ต่อ 10 และมีอัตราส่วนดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 1  
 การทดลองที่ 6 เติมดินขาวและทัลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ โดยมีอัตราส่วนลูมินาคือต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 93 ต่อ 7 และมีอัตราส่วนดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 2  
 การทดลองที่ 7 เติมดินขาวและทัลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ โดยมีอัตราส่วนลูมินาคือต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 93 ต่อ 7 และมีอัตราส่วนดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 1

การทดลองที่ 1 มีความหนาแน่นรวมที่แต่ละอุณหภูมิต่างกันมากและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอีกหากเพิ่มอุณหภูมิเฝามากกว่า 1620 องศาเซลเซียส แสดงว่าหากไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติ แผ่นที่ขึ้นรูปได้จะมีอุณหภูมิขึ้นเทอริงมากกว่า ที่ 1620 องศาเซลเซียส

ในการทดลองที่ 2 ซึ่งเติมแมกนีเซียมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ ความหนาแน่นรวมยังมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอีกหากเพิ่มอุณหภูมิเฝเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 แต่เมื่อเปรียบเทียบแต่ละอุณหภูมิ แผ่นที่เติมแมกนีเซียมจะมีความหนาแน่นรวมมากกว่า ที่ 1620 องศาเซลเซียส แผ่นมีความหนาแน่นรวม 3.33 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร แสดงว่าการเติม แมกนีเซียมปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผงลูมินาไม่ช่วยลดอุณหภูมิการเผาขึ้นเทอริงของ A-152SG แต่ไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเรียงตัวของเกรน การโตของเกรน ทำให้ความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้น ต้องดูผลของการดูจุลโครงสร้างประกอบกัน ในภาคผนวก ข แสดงจุลโครงสร้างของการทดลองต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 1620 องศาเซลเซียส เกรนของแผ่นที่เติมแมกนีเซียมจะขนาดเล็กกว่า และมีรูพรุนน้อยกว่า ส่วนเกรนของแผ่นที่ไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติจะมีรูปร่างที่มี sharp edge มากกว่า

แผ่นจากการทดลองที่ 3 มีความหนาแน่นรวมมากที่สุดในการทดลองทั้ง 7 นั่นคือที่ 1620 องศาเซลเซียส มีค่า 3.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร และยังมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอีกหากเพิ่มอุณหภูมิเฝเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และ 2 แสดงว่าแผ่นจากการใช้ลูมินา



ที่ผสมสารปรับปรุงสมบัติของบริษัท Isekyu มีอุณหภูมิซินเทอริงมากกว่า 1620 องศาเซลเซียส เช่นกัน เมื่อดูจากกราฟในรูปที่ 4.9 แผ่นจากการทดลองที่ 3 ควรมีอุณหภูมิการซินเทอริงน้อยกว่า แผ่นจากการทดลองที่ 2 เพราะมีความหนาแน่นรวมมากกว่าที่ทุกๆอุณหภูมิเผาเดียวกัน จากตารางที่ 4.17 แผ่นมีปริมาณแมกนีเซียม 0.61 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าของการทดลองที่ 2 เพียงเล็กน้อยแต่สามารถลดอุณหภูมิการซินเทอริงลงมาได้มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการทดลองทั้งสองคือใช้ลูมินาต่างชนิดกัน ในการทดลองที่ 3 ใช้ SCA-96 ซึ่งเป็นลูมินาผสมสารปรับปรุงสมบัติสำหรับกระบวนการค็อกเคอร์เบลคของบริษัท Isekyu และมีออกไซด์นอกจากแมกนีเซียม คือ ซิลิกา 2.37 และ แคลเซียม 0.88 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ในการทดลองที่ 1 และ 2 มีซิลิกาและแคลเซียมน้อยกว่ามากคือ 0.05 และ 0.03 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แสดงว่าการมีแมกนีเซียมร่วมกับออกไซด์ชนิดอื่นอาจช่วยลดอุณหภูมิการซินเทอริงได้ด้วยการเกิดซินเทอริงแบบมีลิควิดเฟส (liquid phase sintering) เมื่อดูผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD (X-rays diffraction) ในหัวข้อ 4.3.5.6 ประกอบพบว่าการทดลองที่ 2 เป็นต้นไปจะเกิดเฟสของสปิเนล (spinel) ซึ่งเป็นสารประกอบของอลูมินากับแมกนีเซียม มีสูตรทั่วไปเป็น  $MgO \cdot Al_2O_3$  แต่ไม่พบลิควิดเฟสชนิดอื่น ซึ่งไม่สามารถสรุปได้ว่าไม่เกิดขึ้นเพราะอาจเกิดในปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีนี้ อาจต้องใช้วิธี XRF (X-rays Fluorescent) หรือ AA (atomic absorption) ซึ่งควรสนใจศึกษาต่อไป ส่วนการดูลิควิดเฟสในจุลโครงสร้างต้องใช้วิธีวิเคราะห์แบบ TEM (transmission electron microscope) เพราะลิควิดเฟสจะเกิดบริเวณขอบเกรนและมีความหนาในระดับไมโครเมตร ไม่สามารถใช้วิธี SEM (scanning electron microscope) ได้

การทดลองที่ 4 และ 5 มีอัตราส่วนระหว่าง A-152SG กับสารปรับปรุงสมบัติเป็น 90 ต่อ 10 และมีอัตราส่วนของดินขาวต่อทลคัมเป็น 1 ต่อ 2 และ 1 ต่อ 1 ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นรวมน้อยกว่าการทดลองที่ 3 6 และ 7 นอกจากนี้ยังมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผา มากกว่า 1550 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุณหภูมิการซินเทอริงอยู่ในช่วง 1550-1620 องศาเซลเซียส ส่วนแผ่นที่มีอัตราส่วนของดินขาวต่อทลคัมเป็น 1 ต่อ 1 จะมีความหนาแน่นมากกว่าที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 อาจเป็นเพราะปริมาณสปิเนลและลิควิดเฟสอื่นๆที่เกิดขึ้น สปิเนลมีความหนาแน่นประมาณ 3.55 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าเกิดขึ้นมากก็จะไปลดความหนาแน่นรวมของแผ่นลง แผ่นหลังเผาที่อุณหภูมิ 1620 องศาเซลเซียส จะมีส่วนที่เป็นแก้วกระจายทั่วไปเห็นเป็นแสงแวววาวเมื่อกระทบกับแสง เมื่อดู XRD ของการทดลองที่ 4 ที่ 1620 องศาเซลเซียส จะเห็นกราฟที่แตกต่างจากการทดลองอื่นที่ทำให้สรุปได้ว่าอาจมีเฟสของแก้วเกิดขึ้นเพราะกราฟที่แต่ละตำแหน่งมีขนาดกว้างขึ้น มีสัญญาณรบกวนมากกว่ากราฟของการทดลองอื่นๆ

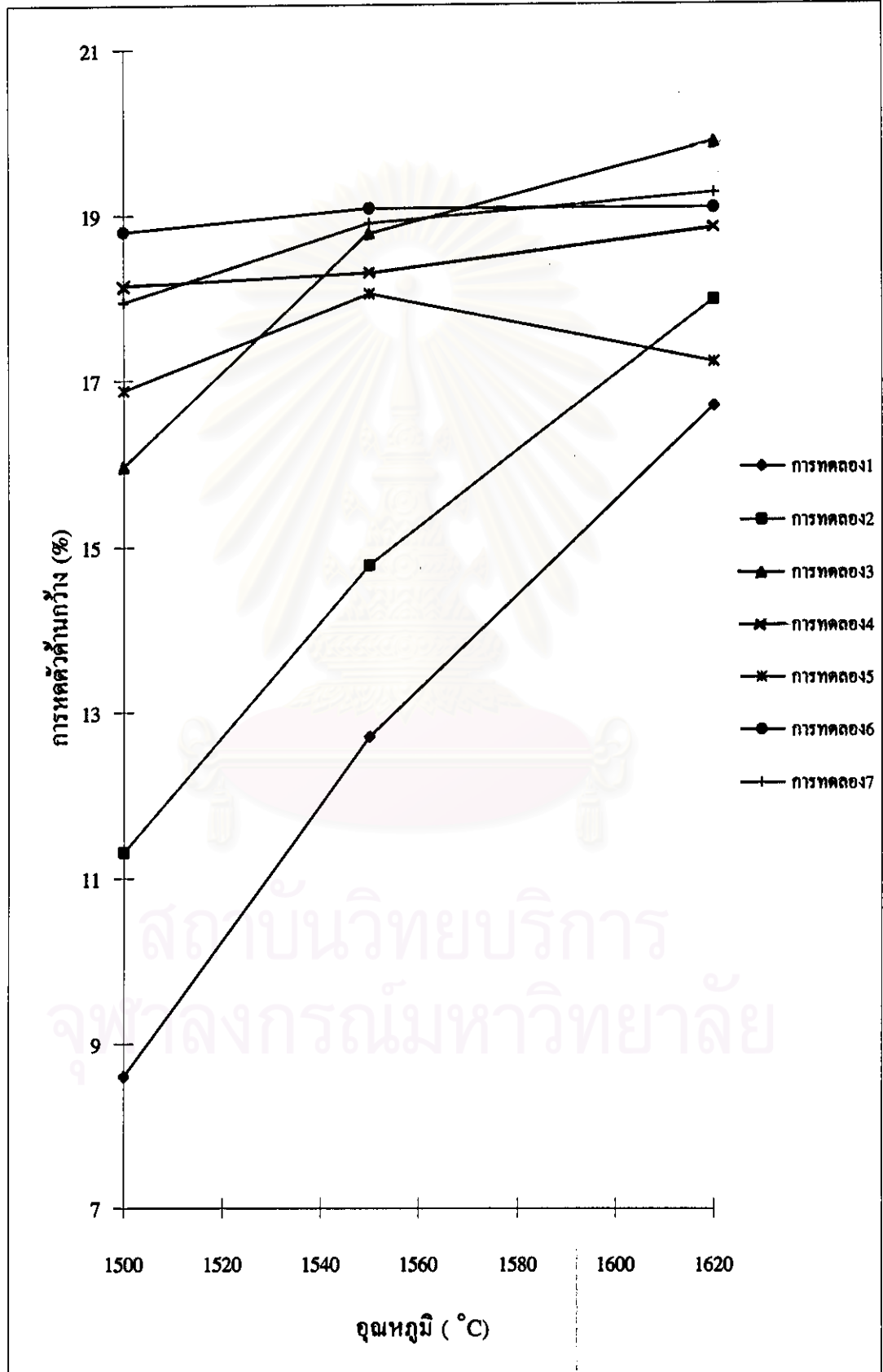
การทดลองที่ 6 และ 7 มีค่าความหนาแน่นมากกว่าการทดลองที่ 4 และ 5 และมีความหนาแน่นสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียสจากนั้นจะมีค่าคงที่ แสดงว่าแผ่นสามารถมีการขึ้นเทอริงที่ดีที่อุณหภูมินี้ เมื่อจุดโครงสร้างพบว่าแผ่นจากการทดลองที่ 6 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างดินขาวและทัลคัมเป็น 1 ต่อ 2 มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าแผ่นจากการทดลองที่ 7 ที่มีอัตราส่วนระหว่างดินขาวและทัลคัมเป็น 1 ต่อ 1

จากการทดลองของ Anderson, Marra และ Mistler (1997) ที่ขึ้นรูปแผ่นที่มีสารตั้งต้นเป็น A-152 SG และใช้ดินขาวของบริษัท EPK Kaolin และ ทัลคัมของบริษัท Vanderbilt ด้วยอัตราส่วนระหว่างอลูมินาต่อสารปรับปรุงสมบัติเป็น 93 ต่อ 7 และอัตราส่วนระหว่างดินขาวต่อทัลคัมเป็น 2.5 ต่อ 4.5 ใกล้เคียงกับการทดลองที่ 6 ซึ่ง มีอัตราส่วนระหว่างอลูมินาเป็น 93 ต่อ 7 และอัตราส่วนระหว่าง ดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 2 จากการทดลองของทั้งสามได้แผ่นมีความหนาแน่นรวม 3.69 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ส่วนแผ่นของบริษัท Electro Ceramics (Thailand) จังหวัดลำพูน มีความหนาแน่น 3.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร แผ่นจากการทดลองเดิมดินขาวและทัลคัมที่มีค่าใกล้เคียงคือแผ่นจากการทดลองที่ 6 มีค่า 3.62 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ที่ 1550 องศาเซลเซียส และจากการทดลองที่ 7 มีค่า 3.63 กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร ที่ 1550 องศาเซลเซียส ส่วนแผ่นจากการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้ SCA-96 มีความหนาแน่น 3.66 ที่ 1620 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

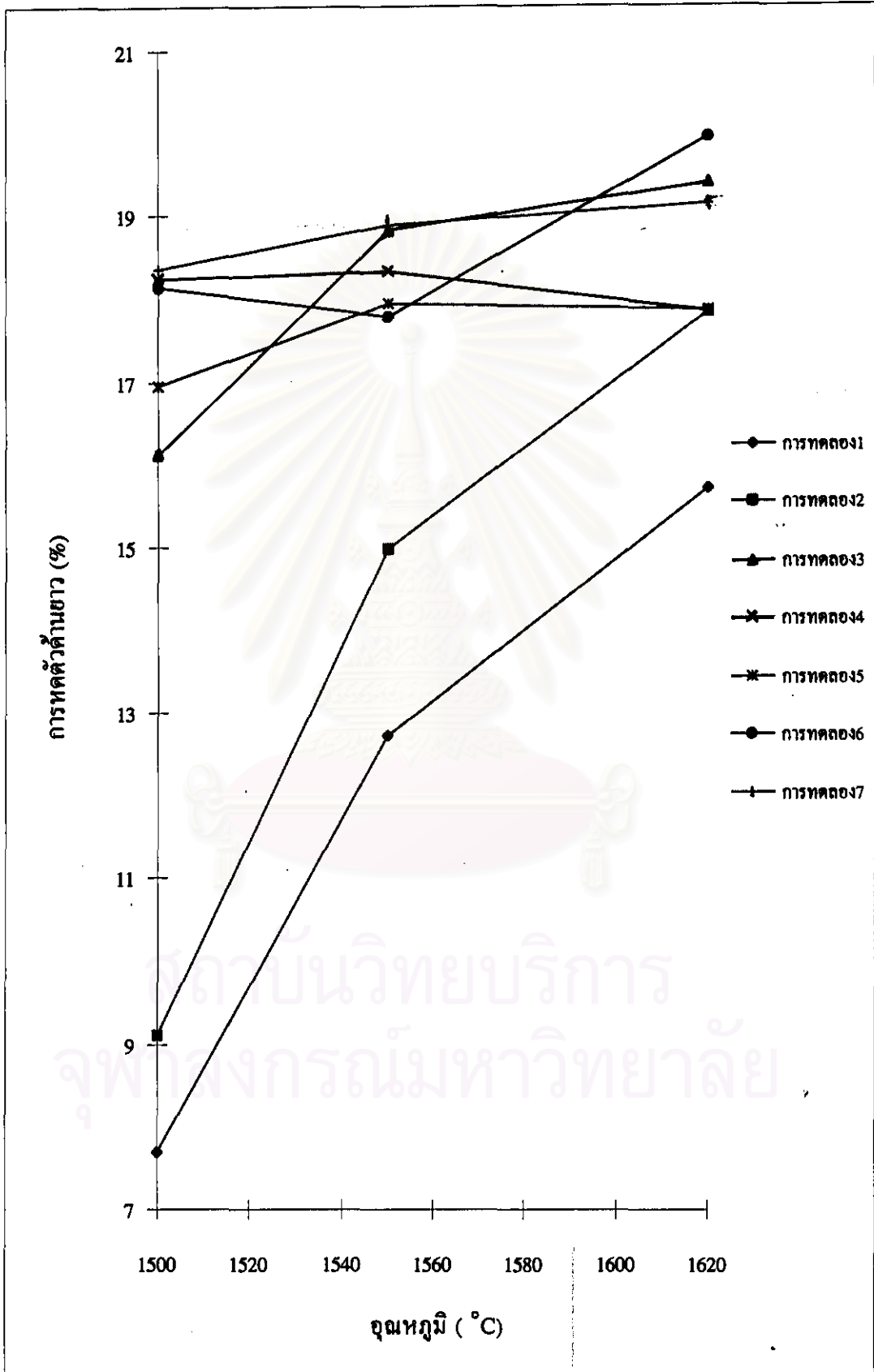
## 4.3.5.2 การหดตัว (shrinkage)

การหดตัวด้านกว้างแสดงในรูปที่ 4.10



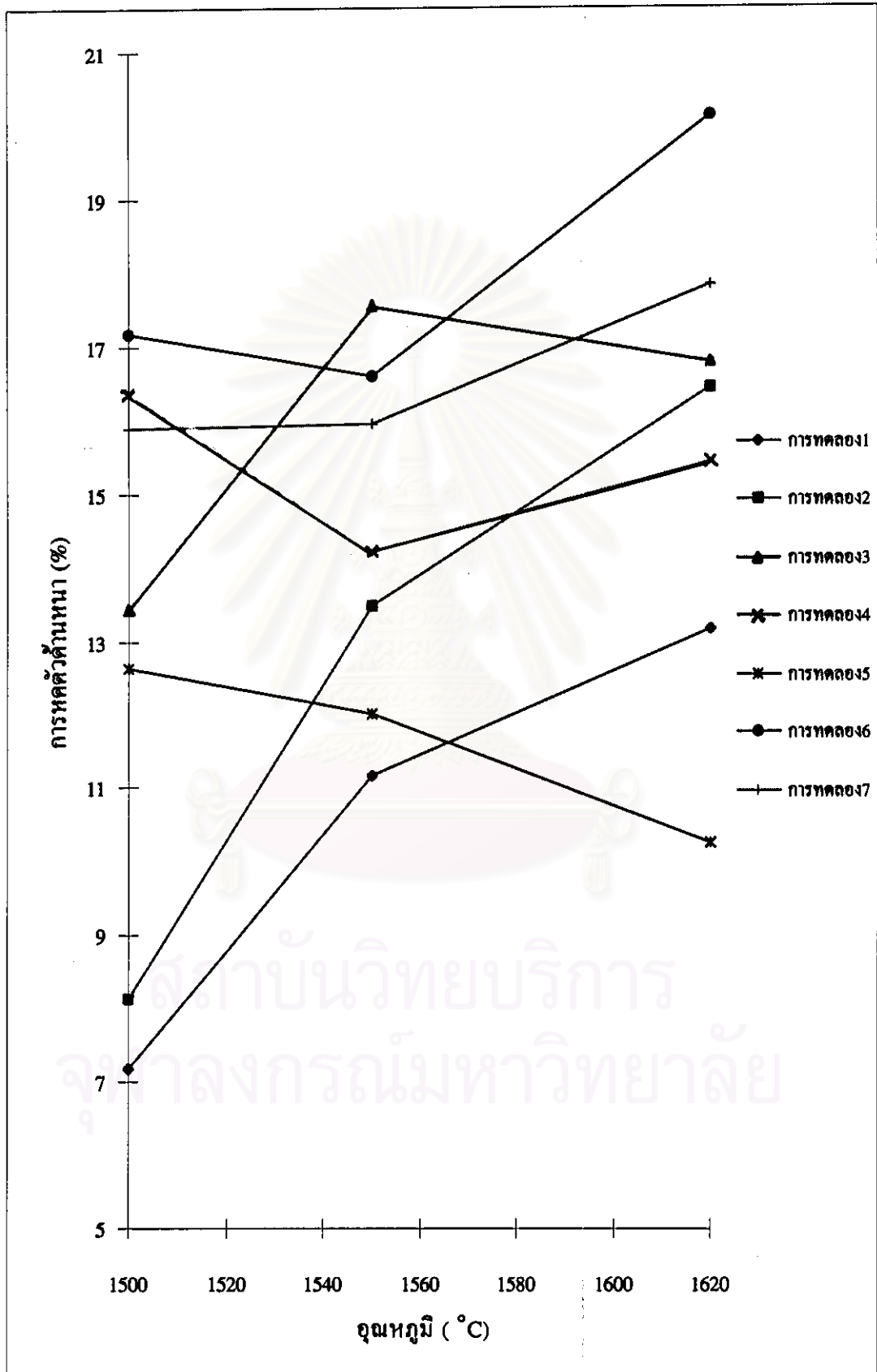
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้านกว้างกับอุณหภูมิเผา

การหดตัวด้านยาวแสดงในรูป 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้านยาวกับอุณหภูมิเผา

การหดตัวด้านหนาแสดงในรูป 4.12



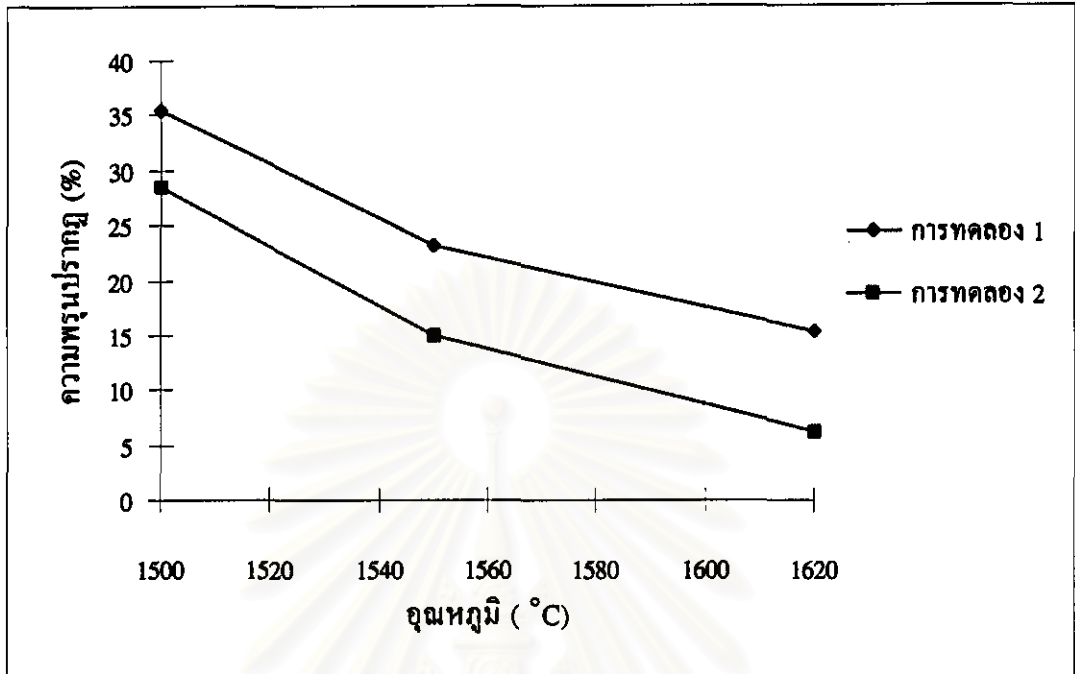
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวด้านหนา กับอุณหภูมิเผา

แผ่นจากการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติ และการทดลองที่ 2 ซึ่งเติมแมกนีเซียมจะมีการหดตัวน้อยกว่าแผ่นที่เติมดินขาวและทัลคัมเป็นสารปรับปรุงสมบัติ แต่เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละช่วงอุณหภูมิแผ่นจะมีการหดตัวเพิ่มขึ้นมากกว่า เช่นในช่วงอุณหภูมิเพิ่มจาก 1500 เป็น 1550 องศาเซลเซียส แผ่นจากการทดลองที่ 1 มีการหดตัวด้านกว้างเพิ่มจาก 8.60 เป็น 12.71 เปอร์เซ็นต์ และจาก 11.31 เป็น 14.79 เปอร์เซ็นต์ในแผ่นจากการทดลองที่ 2 ในขณะที่แผ่นจากการทดลอง 4 ถึง 7 มีการหดตัวสูงกว่าแต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย เป็นเพราะการทดลองที่ 1 และ 2 มีอุณหภูมิขึ้นเทอร์ริงสูงกว่า 1620 องศาเซลเซียส เมื่อจุดโครงสร้างจะเห็นว่ายังมีรูพรุนมาก ดังนั้นจึงยังเกิดการหดตัวได้มาก และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอีกถ้าเพิ่มอุณหภูมิเผา เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิขึ้นเทอร์ริงสูงกว่า 1620 องศาเซลเซียสเช่นกัน

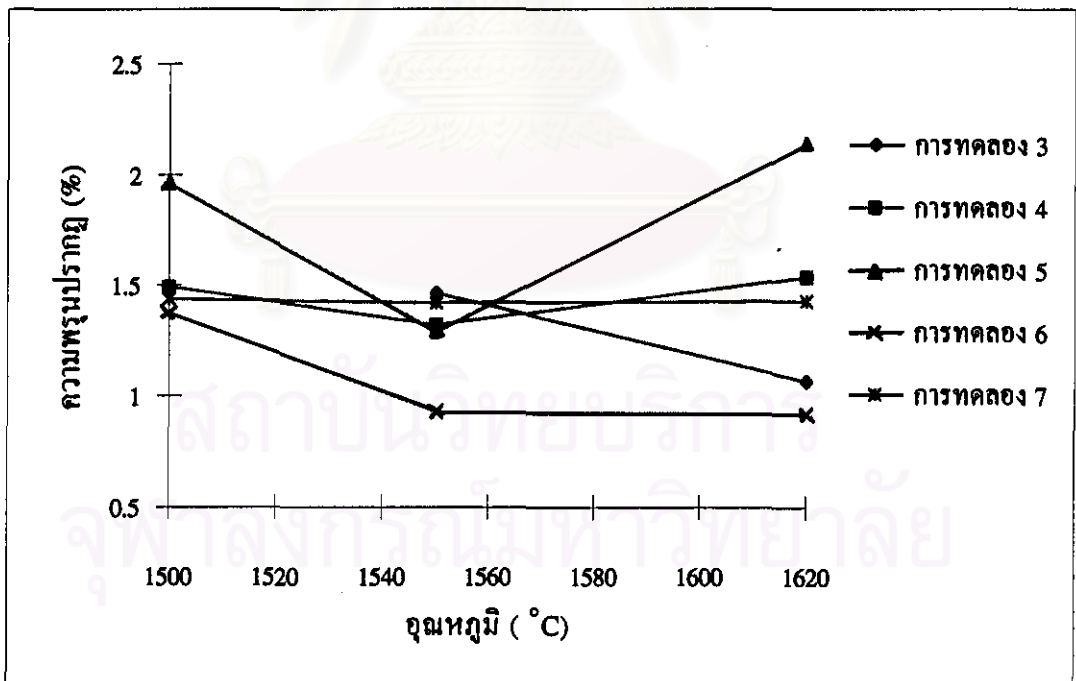
การหดตัวของแผ่นจะต่างกันทิศทางต่างๆด้วยเช่นในทิศเดียวกับทิศทางการวิ่งของแผ่นรองรับพลาสติก (cast direction) ทิศตั้งฉากกับทิศทางการวิ่งของแผ่นรองรับพลาสติก (cross cast direction) ทำให้การหดตัวของการทดลองที่ 4 5 6 และ 7 ได้แนวโน้มที่ไม่ดีนัก อาจเป็นเพราะในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานรูปร่างที่เหลี่ยมผืนผ้าไม่ได้คำนึงถึงทิศทางดังกล่าวนี้ แต่อาจสรุปได้ว่า แผ่นมีการหดตัวมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะเริ่มคงที่และบางการทดลองก็มีการหดตัวลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.3.5.3 ความพรุนปรากฏ (apparent porosity)



(ก) การทดลองที่ 1 และ 2



(ข) การทดลองที่ 3 4 5 6 และ 7

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนปรากฏกับอุณหภูมิเผา

หมายเหตุ : บางการทดลองไม่ได้วัดสมบัตินี้ไว้ครบทุกอุณหภูมิ

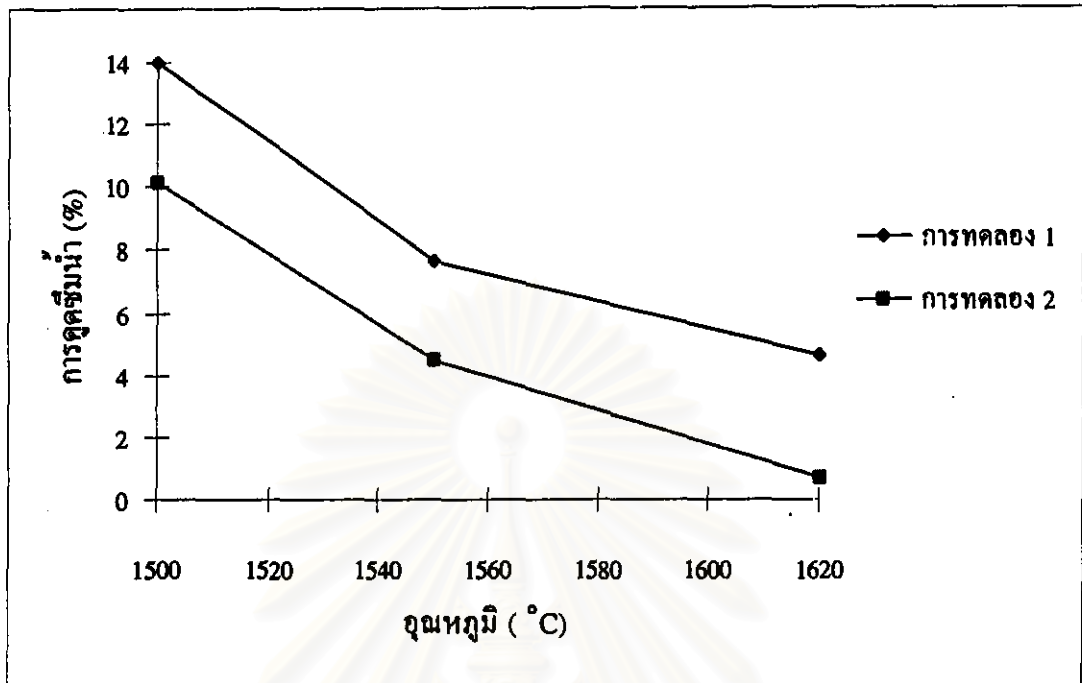
แนวโน้มของความพรุนตัวมีความสอดคล้องกับความหนาแน่นรวม นั่นคือการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งมีความหนาแน่นรวมต่ำก็จะมีค่าความพรุนปรากฏสูง และมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิอย่างมากเหมือนกัน แผ่นจากการทดลองที่ 1 มีความพรุนตัวปรากฏที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสเป็น 35.48 เปอร์เซ็นต์ และลดเป็น 23.18 เปอร์เซ็นต์ที่ 1550 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำสุดที่ 1620 องศาเซลเซียสคือ 15.33 เปอร์เซ็นต์ และยังมีแนวโน้มจะลดลงอีกถ้าเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น แผ่นจากการทดลองที่ 2 ก็เป็นไปในแนวเดียวกัน ส่วนการทดลองที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิขึ้นเทอร์ริงสูงกว่า 1620 องศาเซลเซียสเช่นกันก็มีลักษณะกราฟเหมือนกันคือความพรุนปรากฏลดลงเรื่อยๆและมีแนวโน้มจะลดต่ำลงอีก แต่จะอยู่ในช่วงค่าต่ำกว่าคือ 1.46 เปอร์เซ็นต์ที่ 1550 องศาเซลเซียสและ 1.07 เปอร์เซ็นต์ที่ 1620 องศาเซลเซียส

ส่วนแผ่นจากการทดลองที่ 4 และ 5 มีการเปลี่ยนแปลงของความพรุนปรากฏเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1550 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกับความหนาแน่นรวม ในขณะที่ความหนาแน่นรวมของทั้งสองการทดลองลดลงพบว่าความพรุนปรากฏเพิ่มขึ้น พิจารณาการทดลองที่ 4 และ 5 ซึ่งมีสารปรับปรุงสมบัติ 10 เปอร์เซ็นต์ จากจุลโครงสร้างประกอบด้วยผลของ XRD สรุปได้ว่า แผ่นหลังเผาที่ 1620 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการเผาเกินอุณหภูมิตี่เหมาะสมจะมีส่วนที่เป็นแก้วกระจายทั่วไป เพราะกราฟของ XRD มีช่วงกราฟกว้างกว่าและมีเกรนโตขึ้นกว่าการทดลองอื่นๆมาก และอาจมีรูพรุนเกิดขึ้นภายในเกรนทำให้ความหนาแน่นรวมของทั้งสองการทดลองลดลงในขณะที่ความพรุนปรากฏเพิ่มขึ้น

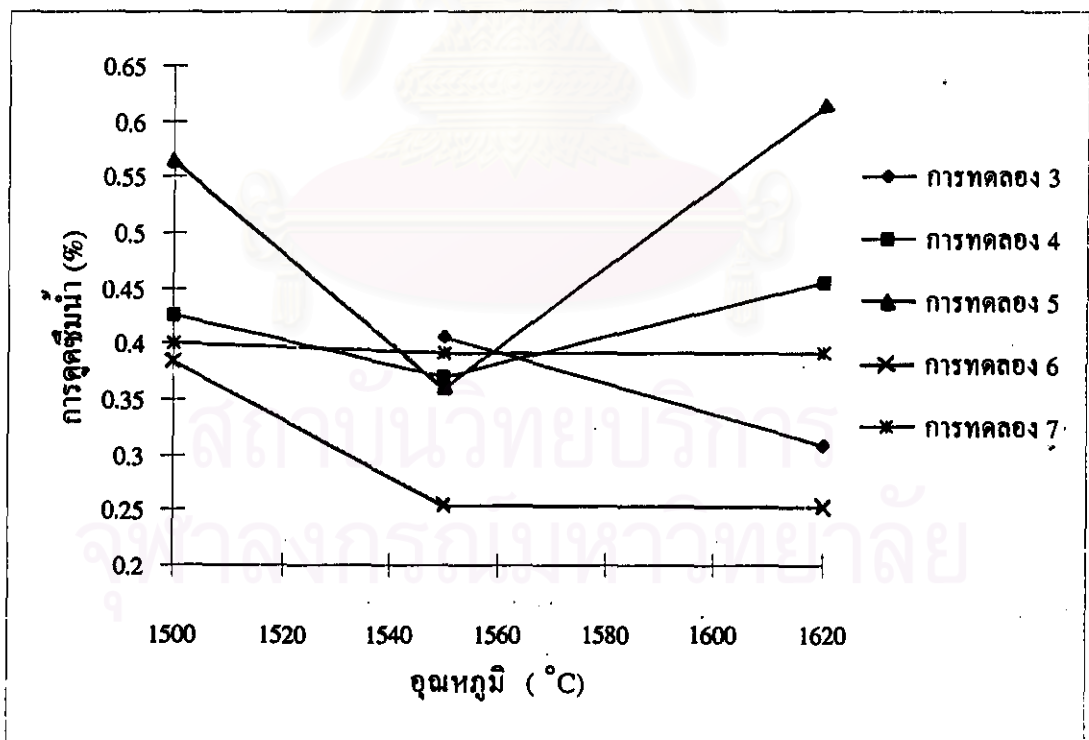
ส่วนการทดลองที่ 6 และ 7 ซึ่งมีสารปรับปรุงสมบัติอยู่ 7 เปอร์เซ็นต์ มีความพรุนปรากฏลดลงจนถึงอุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส และคงที่จนถึงอุณหภูมิ 1620 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมที่คงที่ตั้งแต่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียสเช่นกัน การทดลองที่ 6 มีค่าความพรุนตัวปรากฏน้อยที่สุดคือ 0.92 เปอร์เซ็นต์



## 4.3.5.4 การดูดซึมน้ำ (water absorption)



(ก) การทดลองที่ 1 และ 2



(ข) การทดลองที่ 3 4 5 6 และ 7

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับอุณหภูมิเผา  
 หมายถึง : บางการทดลองไม่ได้วัดสมบัตินี้ไว้ครบทุกอุณหภูมิ

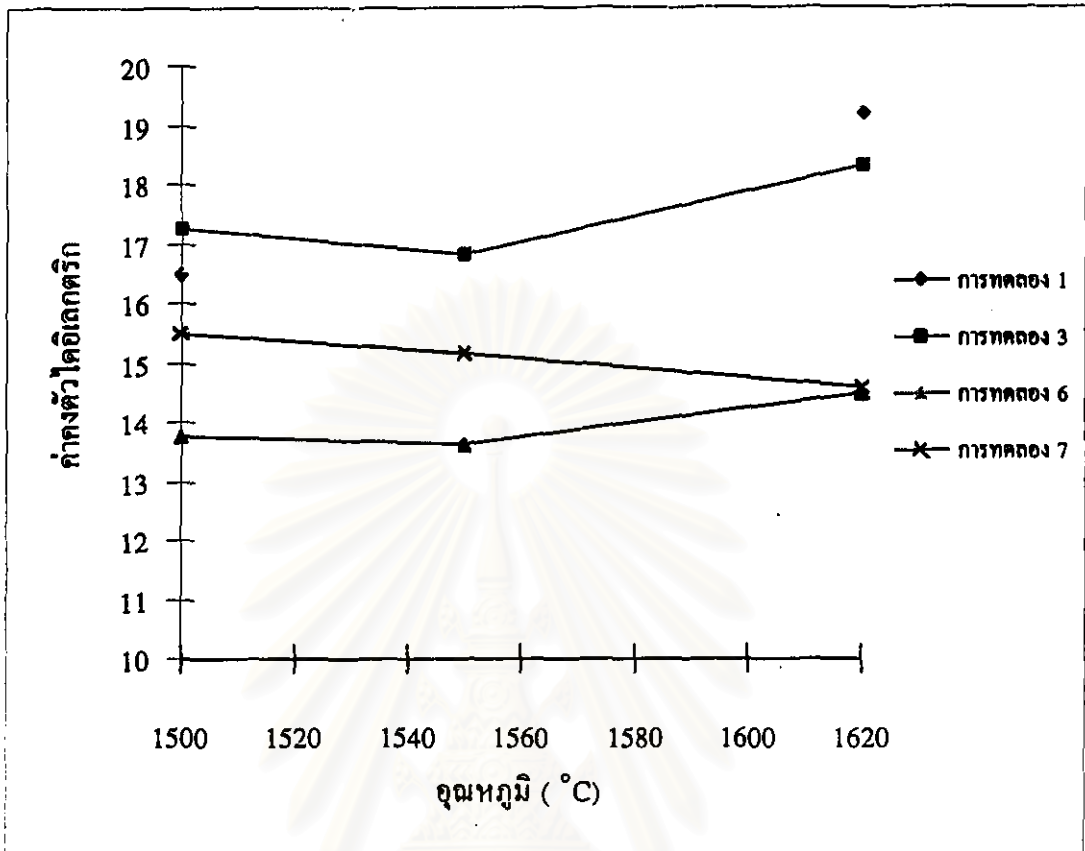
ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความพรุนตัวปรากฏ นั่นคือแผ่นจากการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งมีอุณหภูมิชื้นเทอริงมากกว่า 1620 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซึมน้ำมากและลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มจะลดลงได้อีกถ้าเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มมากกว่า 1620 องศาเซลเซียส ส่วนแผ่นจากการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้ SCA-96 จะได้กราฟลักษณะเดียวกันเพราะมีอุณหภูมิชื้นเทอริงมากกว่า 1620 องศาเช่นกัน แต่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเช่นเดียวกับความพรุนปรากฏ และมีการดูดซึมน้ำ 0.31 เปอร์เซนต์ที่ 1620 องศาเซลเซียส เมื่อจุดจุดโครงสร้างในหัวข้อที่ 4.3.5.7 ที่ 1620 องศาเซลเซียส แผ่นจากการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติมีรูพรุนมากกว่าแผ่นที่ใช้ SCA-96

พบว่าแผ่นจากการทดลองที่ 4 และ 5 ซึ่งมีความพรุนตัวปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 1550 องศาเซลเซียส จะมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ส่วนแผ่นจากการทดลองที่ 6 และ 7 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส และคงที่จนถึง 1620 องศาเซลเซียส แผ่นจากการทดลองที่ 6 มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ 0.25 เปอร์เซนต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.3.5.5 ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constant)



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิเผา

หมายเหตุ : บางการทดลองไม่ได้วัดสมบัตินี้ไว้ครบทุกอุณหภูมิ

แผ่นรองวงจรต้องการให้มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำๆ ในการทดลองของ Anderson, Marra และ Mistler (1997) ได้แผ่นที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 8.8 ในขณะที่การทดลองที่ 6 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียสคือ 13.62 จะเห็นว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกที่แต่ละอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนัก แต่จะต่างกันเมื่อมีองค์ประกอบต่างกัน ในการทดลองของ Anderson, Marra และ Mistler (1997) สรุปว่าขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นที่ต่างกัน จะส่งผลต่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริก โดยแผ่นที่ใช้ซิลิโคนนาเกรด A-16 SG ซึ่งมีขนาดอนุภาค 0.5 ไมโครเมตร จะมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 9.3 มากกว่าเมื่อใช้ A-152 SG ซึ่งมีขนาดอนุภาคเป็น 1.3 ไมโครเมตร และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 8.8

#### 4.3.5.6 ผลวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD

แสดงกราฟและข้อมูลผลจากการตรวจวิเคราะห์เฟสต่างๆของแผ่นที่ขึ้นรูปได้ในภาคผนวก ข พบว่า ในการทดลองที่ 1 ซึ่งไม่เติมสารปรับปรุงสมบัติใดๆ เมื่อผ่านการเผาที่ 1620 องศาเซลเซียสจะได้เฟสคอร์รันดัม เพราะ A-152 SG เป็นอลูมินาความบริสุทธิ์สูง ไม่มี MgO ที่จะทำให้เกิด spinel ( $MgO \cdot Al_2O_3$ ) อย่างเช่นในการทดลองที่ 2 ถึง 7

#### 4.3.5.7 จุดโครงสร้าง (microstructure)

ผลการวิเคราะห์จุดโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงในภาคผนวก ข เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิเผาที่แตกต่างกันพบว่า เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นขนาดอนุภาคจะเพิ่มขึ้นในขณะที่รูพรุนจะลดลง ในการทดลองที่ 6 ที่ 1550 และ 1620 องศาเซลเซียส และในการทดลองที่ 7 ที่ 1620 องศาเซลเซียสพบว่าที่บริเวณขอบเกรนบางส่วนมีเศษเล็กๆของอนุภาคซึ่งไม่ทราบชนิด ซึ่งน่าสนใจศึกษาต่อไป ส่วนเฟสของแก้วที่คาดว่าเกิดขึ้นจะอยู่ที่บริเวณขอบเกรน และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วย SEM Mislter (1989) ใช้ TEM เพื่อตรวจหาเฟสของแก้วที่ขอบเกรนของอลูมินา

#### 4.3.6 เปรียบเทียบสมบัติของแผ่นที่ตีที่สุดจากการทดลองกับแผ่นชนิดอื่นๆ

จากการตรวจสอบสมบัติต่างๆทำให้สรุปว่าแผ่นจากการทดลองที่ 6 มีสมบัติตีที่สุด ซึ่งเป็นแผ่นที่มีอัตราส่วนระหว่างอลูมินากับสารปรับปรุงสมบัติเป็น 93 ต่อ 7 และมีอัตราส่วนระหว่างสารปรับปรุงสมบัติสองชนิดคือดินขาวต่อทัลคัมเป็น 1 ต่อ 2 และมีอุณหภูมิเผาที่ตีที่สุดที่ 1550 องศาเซลเซียส

การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆกับแผ่นชนิดอื่นๆแสดงในตารางที่ 4.19 โดยจะเปรียบเทียบกับ - แผ่นจากการทดลองที่ 3 ซึ่งใช้อลูมินาผสมสารปรับปรุงสมบัติสำหรับขึ้นรูป

ด้วยกระบวนการค็อกเคอร์เบลคของบริษัท Isekyu

- แผ่นจากการทดลองของ Anderson, Marra และ Mistler (1997) ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างอลูมินากับสารปรับปรุงสมบัติเป็น 93 ต่อ 7 และมีอัตราส่วนระหว่างสารปรับปรุงสมบัติสองชนิดคือดินขาวต่อทัลคัมเป็น 2.5 ต่อ 4.5
- แผ่นของบริษัท Electro Ceramics (Thailand) จังหวัดลำพูน

ตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นจากการทดลองที่ 6 กับแผ่นชนิดอื่นๆ

สมบัติของ แผ่นรองวงจร	บริษัท Electro Ceramics Thailand จังหวัด ลำพูน	Anderson, Marra และ Mistler(1997)	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	96	94	94.59	93.80
sintering temperature (°C)	1500-1700	1550	>1620	1550
water absorption (%)	0	-	0.31	0.25
bending strength (kg/cm <sup>2</sup> )	3300	-	-	-
hardness (Mohs' scale)	9	-	-	-
fired bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	-	3.69	3.66	3.62
fraction of theoretical density (%)	-	95	-	-
fired shrinkage (%)				
cast direction	-	17.9	19.88*	19.08*
cross cast direction	-	17.9	19.40**	17.79**
thickness	-	16.0	16.79	16.59
apparent porosity (%)	-	3.0	1.01	0.92
average surface grain size (μm)	-	2.2	-	-
surface finish, (R <sub>a</sub> , μm)	-	0.28	-	-

ตารางที่ 4.19 (ต่อ)

สมบัติของ แผ่นรองวงจร	บริษัท Electro Ceramics Thailand จังหวัด ต่ำขุน	Anderson, Marral และ Mistler(1997)	การทดลอง ที่ 3	การทดลอง ที่ 6
thermal conductivity (cal/cm sec °C at 20 °C)	0.04	-	-	-
electrical resistivity (Ω-cm)				
20 °C	>10 <sup>15</sup>	-	-	-
100 °C	>10 <sup>15</sup>	-	-	-
200 °C	>10 <sup>14</sup>	-	-	-
300 °C	>10 <sup>11</sup>	-	-	-
volume resistivity(x10 <sup>11</sup> Ω-cm <sup>3</sup> /cm)	-	8.712	-	-
dielectric constant (1 MHz and 25 °C)	-	8.8	18.30	13.62
dissipation factor (1 MHz and 25 °C)	-	0.002	-	-
loss index (1 MHz and 25 °C)	-	0.018	-	-
coefficient of thermal expansion ( / °C)				
25-150 °C	3.4 x 10 <sup>-6</sup>	-	-	-
150-400 °C	8.4 x 10 <sup>-6</sup>	-	-	-
400-800 °C	9.1 x 10 <sup>-6</sup>	-	-	-

หมายเหตุ : “ \* ” คือการหาค่าในด้านกว้าง

“ \*\* ” คือการหาค่าในด้านยาว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย