

การขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนสำหรับใช้ในการกรอง

นางสาว ัญญฐิตา ชวนเกริกกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

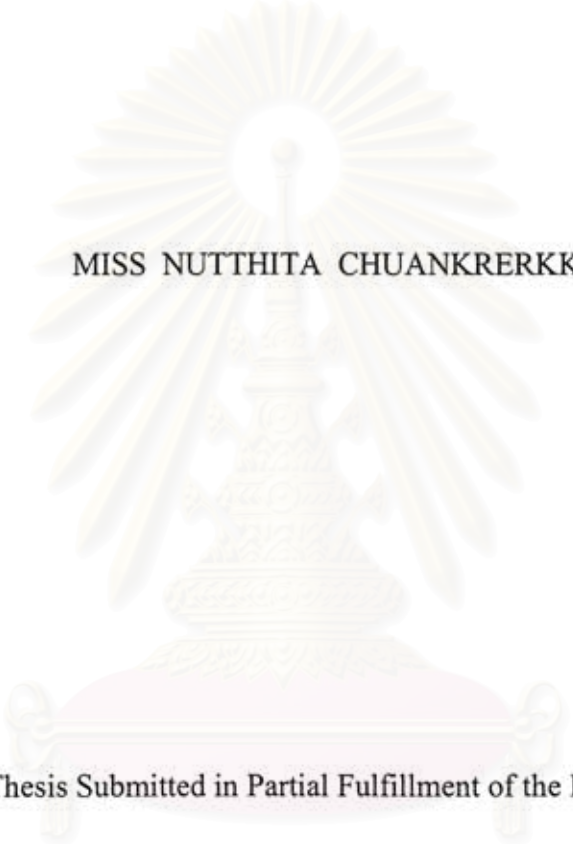
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-984-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1146650120

FABRICATION AND PROPERTIES OF POROUS SILICON CARBIDE  
FOR FILTER APPLICATIONS



MISS NUTTHITA CHUANKRERKKUL

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Graduate School


Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-332-984-6

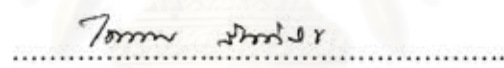
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนสำหรับใช้  
ในการกรอง  
โดย นางสาว ญัญฐิตา ชวนเกริกกุล  
ภาควิชา วัสดุศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัดน์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

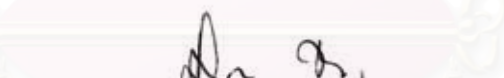
  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุชาดา กิระนันทน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)


ประธานกรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัดน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
.....  
(ดร. ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทิน กุหาเรืองรอง)

กรรมการ

ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล : การขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนสำหรับ  
ใช้ในการกรอง (FABRICATION AND PROPERTIES OF POROUS SILICON  
CARBIDE FOR FILTER APPLICATIONS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. สุพัตรา จินาววัฒน์,  
อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. ชูติมา เอี่ยมโชติชวลิต ; 119 หน้า. ISBN 974-332-984-6.

ซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดที่มีรูพรุนสามารถเตรียมได้โดยวิธี Polymeric Sponge โดยใช้อะลูมิเนียม  
ฟอสเฟตเป็นตัวประสานที่อุณหภูมิสูง ในอัตราส่วน 2.9 ส่วนต่อซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 ส่วน โดยน้ำหนัก  
มีดินและทัลคัมเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยที่ความแข็งแรงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตาม  
ปริมาณของดินและทัลคัมที่เพิ่มขึ้น ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานที่เตรียมได้ มีค่าสูงสุด 3.2 กิโลกรัม  
ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้จากชิ้นงานที่มีส่วนผสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 72.9 โดยน้ำหนัก  
อะลูมิเนียมฟอสเฟตร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก ดินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และทัลคัมร้อยละ 10 โดย  
น้ำหนัก เตรียมสเลอรี่ให้มีปริมาณของแข็งร้อยละ 70 มีค่าความหนืด 18 พอยซ์ และเผาที่อุณหภูมิ  
1250 ° ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีความพรุนตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 88 – 90 นอกจากนั้น  
จากการทดลองยังพบว่าค่าความทนแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น  
ชิ้นงานที่เตรียมได้จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นสามารถทนต่อความร้อนได้สูงถึง 1400 ° ซ โดยสภาพ  
ของชิ้นงาน ไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากการทดลองจุ่มในโลหะหลอมเหลว

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วัสดุศาสตร์ .....  
สาขาวิชา ..... เทคโนโลยีเซรามิก .....  
ปีการศึกษา ..... 2542 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... A. Th. ....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... ชูติมา เอี่ยมโชติชวลิต .....

# # 4072250523 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEY WORD: POROUS SILICON CARBIDE / CERAMIC FOAM FILTER / POLYMERIC SPONGE /  
MOLTEN METAL FILTRATION

NUTTHITA CHUANKRERKKUL : FABRICATION AND PROPERTIES OF POROUS SILICON CARBIDE  
FOR FILTER APPLICATIONS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SUPATRA JINAWATH, Ph.D. THESIS  
CO-ADVISOR : CHUTIMA EAMCHOTCHAWALIT, Ph.D. 119 pp. ISBN 974-332-984-6.

Silicon carbide ceramic foam filter was fabricated by polymeric sponge method, using aluminium phosphate as a high temperature binder, 2.9 parts to silicon carbide 100 parts by weight, with clay and talcum as additives to improve strength. It was observed that the strength of materials increased with increasing clay and talcum contents. The highest value of compressive strength was 3.2 kilograms per square centimeter. The sample was made from a slurry which was composed of 72.9 wt% silicon carbide, 2.1 wt% aluminium phosphate, 15 wt% clay, 10 wt% talcum and fired at 1250 °C for 3 hours. The silicon carbide slurry had a solid content of 70 wt% and a viscosity about 18 poises. The samples contained 88 – 90% porosity. It was noticed that the compressive strength of the samples was also increased with increasing sintering temperature and soaking time. These silicon carbide foam filters retain their shapes after dipping in molten metal (~ 1400 °C).



## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก.....

ปีการศึกษา..... 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต..... นัทธิตา ชวนกระกุล.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ผศ. สุ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... Chutima Eamchotchawalit.....



วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัทธา จินาวัดน์ และ ดร. ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยในทุก ๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำนวยความสะดวกในการใช้ เครื่องมือทดลองและวิเคราะห์ทดสอบตลอด โครงการงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร. ลดาวัลย์ โชติมงคล ดร. นงลักษณ์ ปานเกิดดี และ ดร. สุทธิพร ชีวสารณ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณคุณคุณวาสนา ฆ้องวงศ์ คุณชุมพล บุญบก คุณสมศรี ทวีถาวร และ คุณณรงค์ศักดิ์ บุญส่ง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการขึ้นรูป ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ ขอขอบคุณ คุณเฉลิมชัย จีระพันธุ์ คุณชินนทร์ สุรร้ายนาถ คุณประสงค์ เจริญพรพิทักษ์ และคุณสมหวัง บรรเทา ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ และทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ ขอขอบคุณ คุณแสงเดือน ดวงดาว คุณนิตยา แก้วแพรง คุณวิเชียร เอี่ยมโหมด และคุณนพฤทธิ์ แซ่เอ็ง ที่คอยถามไถ่ถึงความก้าวหน้าของงานวิจัยอยู่เสมอ ๆ ขอขอบคุณ คุณสุกัลยา ศรีอ่อน คุณโกสุม ไวยจิรา คุณอุบลวรรณ แผลงจันทิก และคุณวรรณงาม ธนวนิชนาม ในการช่วยจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการศึกษาและค่าใช้จ่าย ตลอดระยะเวลา 2 ปี

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกัน ด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ชมรมคนตรีสากล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเป็นกำลังใจและคอยไต่ถามถึงความก้าวหน้าของงานวิจัยอยู่เสมอ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ญ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	2
2.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	2
2.1.1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	2
2.1.2 กระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	4
2.1.3 ประเภทของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	7
2.2 เซรามิกที่มีรูพรุน .....	10
2.2.1 ประเภทของเซรามิกที่มีรูพรุน .....	10
2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกที่มีรูพรุน .....	11
2.2.3 การใช้ประโยชน์เซรามิกที่มีรูพรุน .....	15
2.3 การกรองโลหะหลอมเหลว .....	15
3 การทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบ .....	18
3.1 การเลือกฟองน้ำและการศึกษาการสลายตัวของฟองน้ำ .....	18
3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุคิบ .....	22
3.2.1 การวัดการกระจายขนาดอนุภาค .....	22
3.2.2 การศึกษาลักษณะอนุภาค .....	23
3.2.3 การวัดพื้นที่ผิวโดยวิธี BET .....	26
3.2.4 การหาอัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	32
3.2.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้างโดยเครื่อง X-ray diffractometer .....	33

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การเตรียมสเลอรี .....	36
3.4 การขึ้นรูปและเผาซินเทอร์ริง .....	38
3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของชิ้นงานหลังเผา .....	41
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	41
4 ผลการทดลอง .....	43
4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถดุคิบบ .....	43
4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....	43
4.1.2 ลักษณะอนุภาคของหัตถดุคิบบ .....	52
4.1.3 พื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	57
4.1.4 อัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	57
4.1.5 ลักษณะโครงสร้างโดย X-ray diffractometer .....	59
4.2 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุน โดยวิธี Polymeric sponge ...	62
4.2.1 ผลของตัวเติม .....	62
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาค .....	80
4.3 ผลการศึกษาภาวะการซินเทอร์ริงที่เหมาะสม .....	90
4.3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการเผาไล่สารอินทรีย์ .....	90
4.3.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ริง .....	92
4.4 ผลการศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผลิตได้ .....	96
4.5 ผลการทดลองใช้งานจริงในโรงงานหล่อโลหะ .....	99
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	102
รายการอ้างอิง .....	104
ภาคผนวก .....	109
ภาคผนวก ก .....	110
ภาคผนวก ข .....	111
ภาคผนวก ค .....	118
ประวัติผู้วิจัย .....	119



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงผลของการใช้เซรามิกที่มีรูพรุนในการกรองโลหะหลอมเหลว .....	16
2.2	แสดงการเลือกเซรามิกที่มีรูพรุนชนิดต่าง ๆ ไปใช้ในงานหล่อโลหะแต่ละประเภท .....	17
3.1	ส่วนผสมของสเลอรีซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	36
3.2	ส่วนผสมของสเลอรีซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	37
3.3	อัตราส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดต่าง ๆ ในสเลอรี .....	38
4.1	การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุชนิดต่าง ๆ .....	44
4.2	ค่าพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	57
4.3	อัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์ .....	58
4.4	ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดิน .....	66
4.5	ธาตุที่พบในชิ้นงาน .....	73
4.6	ผลวิเคราะห์ทางเคมีของทัลคัม .....	76
4.7	ร้อยละของน้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงหลังทำการเผา .....	85
4.8	ร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ .....	89
4.9	ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ .....	92
4.10	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ .....	92
4.11	ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตร G .....	95
4.12	ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ .....	96

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ ..... 2
2.2	การจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนคาร์ไบด์ในรูปแบบต่าง ๆ ..... 3
2.3	โครงสร้างของเตา Acheson ..... 4
2.4	เตา Acheson สร้างโดย Elektroschmelzwerk Kempten ..... 5
2.5	ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกที่มีรูพรุน โดยวิธี Polymeric Sponge ..... 11
2.6	รายละเอียดขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Polymeric Sponge ..... 12
3.1	ลักษณะของฟองน้ำที่ใช้ในการทดลอง ..... 18
3.2	เครื่อง TG-DTA ..... 19
3.3	แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง DTA ..... 20
3.4	ตัวอย่างผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง DTA ..... 20
3.5	แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง TGA ..... 21
3.6	ตัวอย่างผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง TGA ..... 21
3.7	เครื่อง Particle Size Analyzer ..... 22
3.8	เครื่อง SEM ..... 23
3.9	ส่วนประกอบของเครื่อง SEM ..... 24
3.10	ส่วนประกอบของปืนอิเล็กตรอน ..... 25
3.11	สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิววัสดุ ..... 25
3.12	ชนิดของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ความลึกระดับต่าง ๆ ..... 26
3.13	เครื่อง Surface Area Analyzer ..... 27
3.14	กราฟ adsorption isotherm ..... 28
3.15	กราฟแลงเมียร์ ..... 30
3.16	กราฟ BET ..... 31
3.17	เตาเผา ..... 32
3.18	เครื่อง XRD รุ่น XD-610 ..... 33
3.19	เครื่อง XRD รุ่น XRD-6000 ..... 33
3.20	รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบบนผิววัสดุทำมุม $\theta$ ..... 34
3.21	หลักการเคลื่อนที่ของ Diffractometer ..... 35
3.22	การ์ด JCPDS ..... 36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.23	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุน .....	38
3.24	ฟองน้ำที่มีสเลอร์ของซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่เต็ม.....	39
3.25	การรีดสเลอร์ส่วนเกินออกจากฟองน้ำ.....	39
3.26	ฟองน้ำที่ผ่านการกำจัดสเลอร์ส่วนเกินแล้ว.....	40
3.27	เตาอบ .....	40
3.28	เครื่อง Electromechanical Testing Machine .....	42
4.1	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ....	45
4.2	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 .....	45
4.3	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 .....	46
4.4	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 .....	46
4.5	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 .....	47
4.6	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 .....	47
4.7	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของดิน SPC .....	48
4.8	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของดิน SPC .....	48
4.9	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของทลคัมชนิดที่ 1 .....	49
4.10	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของทลคัมชนิดที่ 1 .....	49
4.11	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของทลคัมชนิด 2 .....	50
4.12	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของทลคัมชนิดที่ 2 .....	50
4.13	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ .....	51
4.14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 .....	52
4.15	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320	53
4.16	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200	53
4.17	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดิน .....	54
4.18	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทลคัมชนิดที่ 1 .....	55
4.19	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทลคัมชนิดที่ 2 .....	56
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดออกซิเดชันกับอุณหภูมิ .....	58
4.21	กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 .....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ..... 60
4.23	กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ..... 61
4.24	ลักษณะชั้นงานหลังเผาสุตร A1 และ B1..... 62
4.25	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร A1 ..... 63
4.26	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร B1 ..... 64
4.27	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร A1..... 65
4.28	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร B1..... 65
4.29	ลักษณะชั้นงานหลังเผาสุตร B2 และ B3..... 66
4.30	ลักษณะชั้นงานหลังเผาสุตร A1C1 A1C2 และ A1C3 ..... 67
4.31	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร A1C1 ... 68
4.32	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร A1C2 ... 69
4.33	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร A1C3 ... 70
4.34	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร A1C1 ..... 71
4.35	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร A1C2 ..... 71
4.36	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร A1C3 ..... 72
4.37	ลักษณะชั้นงานหลังเผาสุตร B1C3 และ E3 ..... 73
4.38	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร B1C3 ... 74
4.39	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร E3 ..... 74
4.40	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร B1C3 ..... 75
4.41	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร E3 ..... 75
4.42	ลักษณะชั้นงานหลังเผาสุตร E2T1 E2T2 และ E2T3 ..... 76
4.43	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร E2T2 ... 77
4.44	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร E2T3 ... 77
4.45	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร E2T1 ..... 78
4.46	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร E2T2 ..... 78
4.47	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร E2T3 ..... 79
4.48	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร E2TT3 . 79
4.49	กราฟ XRD ของชั้นงานสุตร S ..... 80
4.50	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสุตร S ..... 81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51	กราฟ XRD ของชั้นงานสูตร G ..... 82
4.52	กราฟ XRD ของชั้นงานสูตร H ..... 82
4.53	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร G ..... 83
4.54	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร H ..... 84
4.55	กราฟ XRD ของชั้นงานสูตร SG ..... 86
4.56	กราฟ XRD ของชั้นงานสูตร GH ..... 86
4.57	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร SG ..... 87
4.58	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร GH ..... 88
4.59	กราฟ TG-DTA ของฟองน้ำชนิด C ..... 90
4.60	กราฟ TG-DTA ของฟองน้ำชนิด J ..... 90
4.61	ตัวอย่างชั้นงานที่ชุบด้วยฟองน้ำชนิด C และ ชนิด J ..... 91
4.62	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ..... 93
4.63	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 94
4.64	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ..... 94
4.65	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสูตร G ..... 97
4.66	กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสูตร H ..... 98
4.67	ชั้นงานสูตร S ก่อนและหลังการทดสอบ กับ โลหะหลอมเหลว ..... 99
4.68	ชั้นงานสูตร SG ก่อนและหลังการทดสอบ กับ โลหะหลอมเหลว ..... 99
4.69	ชั้นงานสูตร G ก่อนและหลังการทดสอบ กับ โลหะหลอมเหลว ..... 100
4.70	ชั้นงานสูตร GH ก่อนและหลังการทดสอบ กับ โลหะหลอมเหลว ..... 100
4.71	ชั้นงานสูตร H ก่อนและหลังการทดสอบ กับ โลหะหลอมเหลว ..... 101



ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารเซรามิกที่มีสมบัติที่ดีคือ มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง และมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและกัดกร่อนดี จึงมีการนำซิลิกอนคาร์ไบด์ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นวัสดุทนไฟ วัสดุขัดถู ตลอดจนเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆในรถยนต์ หรือเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เซรามิกที่ใช้กันในปัจจุบันมีทั้งชนิดขึ้นรูปให้มีเนื้อแน่นและชนิดที่มีรูพรุน สมบัติเด่นของชนิดที่มีรูพรุนคือ มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ และมีความสามารถในการซึมผ่านสูง สามารถนำไปพัฒนาใช้ประโยชน์ได้กับงานหลายประเภท เช่น เป็นตัวกรองที่อุณหภูมิสูงในโรงงานหล่อโลหะ เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ภายในรถยนต์ หรือบางชนิดใช้ในโรงงานทางการแพทย์เพื่อทดแทนกระดูก และพวกที่มีโครงสร้างแบบ honeycomb สามารถใช้เป็น catalyst carrier สำหรับกระบวนการทางเคมีในโรงงานต่างๆ

สำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะในประเทศไทย ส่วนมากเป็นการหลอมโลหะที่ใช้แล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จึงมักจะมีสิ่งเจือปนอยู่ในโลหะหลอมเหลว เมื่อใช้เซรามิกที่มีรูพรุนสำหรับกรองโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อโลหะ จะช่วยให้ชิ้นงานโลหะหลอมมีคุณภาพดีขึ้นและลดการทำงานซ้ำในการซ่อมแซมชิ้นงาน เซรามิกที่มีรูพรุนที่นำมาใช้กรองโลหะหลอมเหลวนั้นจะต้องทนทานต่ออุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี และมีความแข็งแรงเหมาะกับการใช้งาน ดังนั้นการเลือกวัสดุเซรามิกที่มีรูพรุนจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของอุณหภูมิที่จะนำไปใช้งาน ปัจจุบันนี้เซรามิกที่มีรูพรุนที่มีการใช้ในโรงงานหล่อโลหะ ได้แก่ซิลิกอนคาร์ไบด์และอะลูมินา ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด

สำหรับขอบเขตการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษากระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดที่มีรูพรุน โดยวิธี Polymeric sponge และทำการศึกษาผลของตัวเติม ผลของขนาดอนุภาค และผลของอุณหภูมิในการเผาซินเทอริงที่มีต่อสมบัติของชิ้นงาน หลังจากนั้นทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ และทดลองนำไปใช้งานจริงในโรงงานหล่อโลหะ

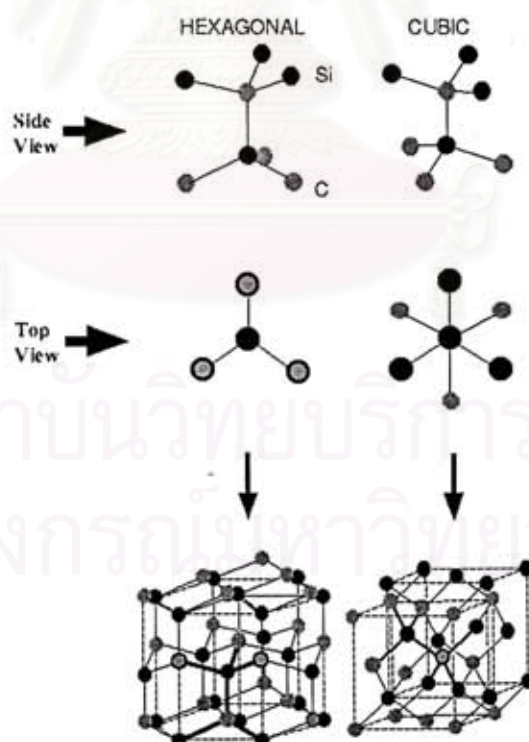
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ซิลิกอนคาร์ไบด์

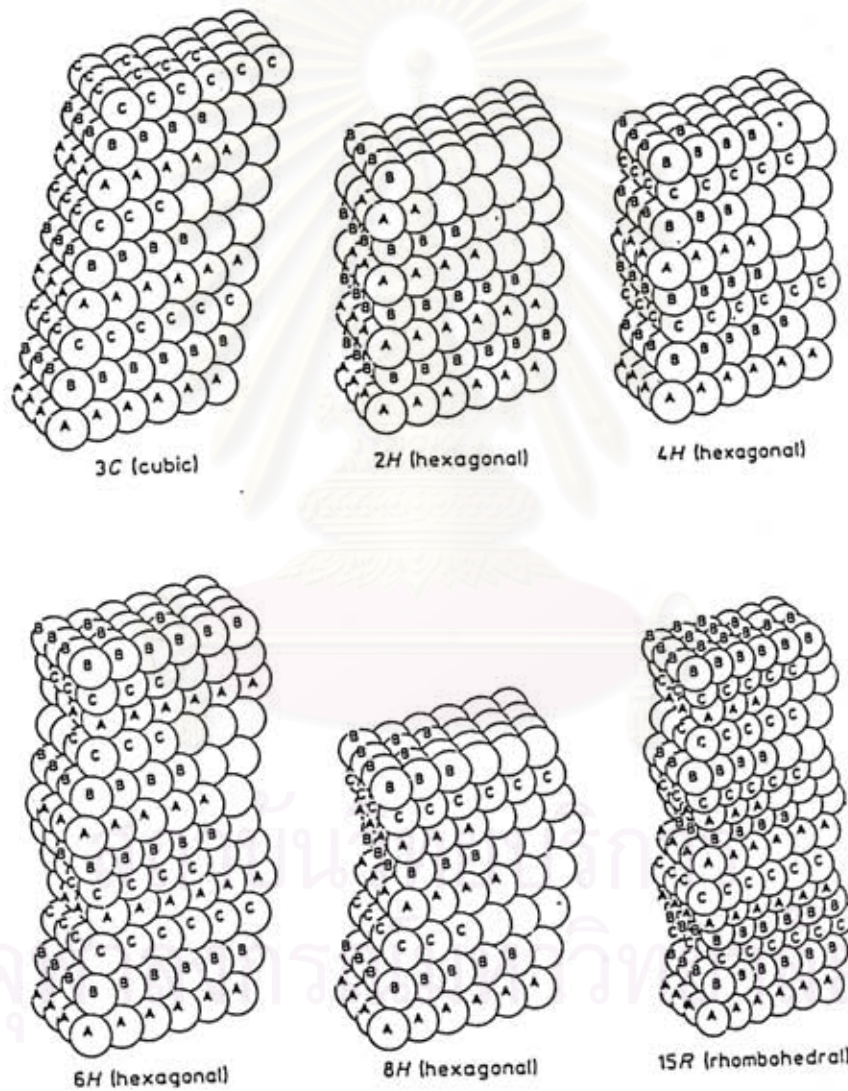
##### 2.1.1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ (Crystal Structure of Silicon Carbide)

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีโครงสร้างผลึกอยู่หลายรูปแบบ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ชนิดที่มีโครงสร้างเป็นคิวบิก (cubic) เรียกว่าเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ และชนิดที่มีโครงสร้างเป็นนอนคิวบิก (non-cubic) เรียกว่า แอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ พวกนอนคิวบิก ได้แก่ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบ เฮกซะโกนอล (hexagonal) และ รอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ได้จากการสังเคราะห์สารโดยวิธีเพาไรต์กซันทรายแก้วที่อุณหภูมิสูง ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก หรือ เบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยทั่วไปจะได้จากกระบวนการผลิตที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นพวกพอลิเมอร์ โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้ง 2 ชนิดแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์

สำหรับซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดคิวบิก อะตอมของคาร์บอนจะอยู่ที่มุมทั้งสี่ ของเตตระฮีดรอน (tetrahedron) โดยมีอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลาง ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เป็นเฮกซะโกนอลและรอมโบฮีดรอล การจัดเรียงตัวของอะตอมซิลิกอนและคาร์บอนจะเกิดการหมุนไปในลักษณะต่างๆ ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างรูปแบบต่างๆขึ้น รูปแบบที่พบบ่อยคือ 6H ตัวเลขด้านหน้าจะแสดงถึงจำนวนชั้นที่อะตอมจัดเรียงเป็นระบบเดียวกันเข้าไปเรื่อยๆ ตัวอักษรด้านหลัง ได้แก่ H R และ C จะแสดงถึงรูปแบบว่าเป็น เฮกซะโกนอล รอมโบฮีดรอล หรือ คิวบิก ตามลำดับ การจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนคาร์ไบด์รูปแบบต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 <sup>(1)</sup>



รูปที่ 2.2 การจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนคาร์ไบด์ในรูปแบบต่างๆ

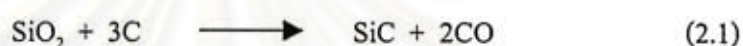


## 2.1.2 กระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์

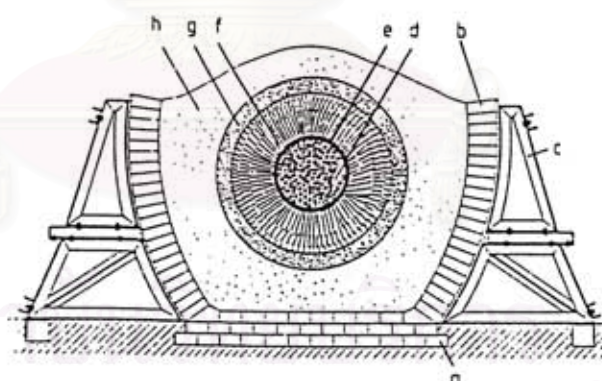
กระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์มีหลายวิธี แต่ละวิธีจะทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์ ขนาด รูปร่าง และการกระจายของอนุภาคแตกต่างกัน โดยทั่วไปจะแบ่งกระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ ได้เป็น 3 วิธี คือ Carbothermic Reduction, Polymer Conversion และ Gas Phase Synthesis

### 2.1.2.1 Carbothermic Reduction

เป็นวิธีการเตรียมซิลิกอนคาร์ไบด์จากการทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างซิลิกาับคาร์บอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1



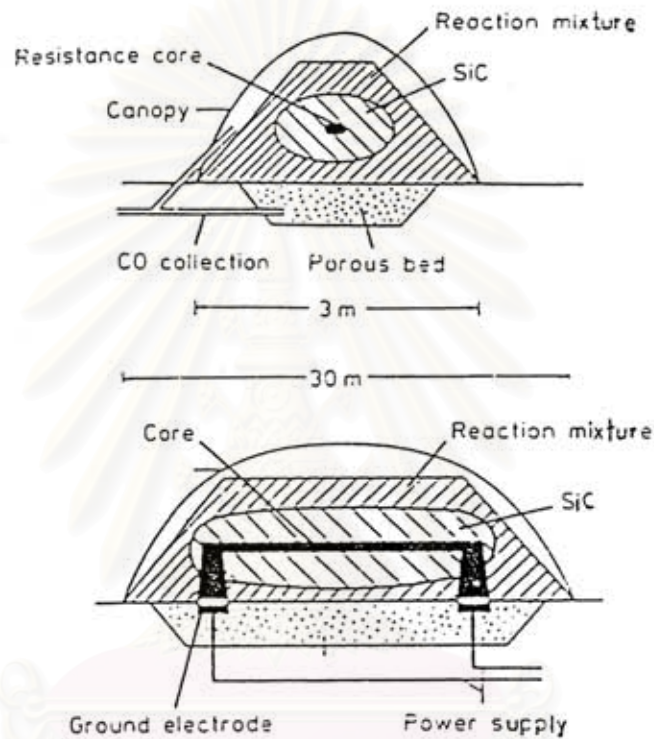
ซิลิกาที่ใช้มักจะอยู่ในรูปของทรายแก้ว (silica sand) (ควอทซ์) และคาร์บอนที่ใช้มักจะอยู่ในรูปของถ่านปิโตรเลียม (petroleum coke) ทำปฏิกิริยาภายในเตาไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.3<sup>(2)</sup> ใช้ อุณหภูมิประมาณ 2400 °ซ – 2600 °ซ วิธีนี้รู้จักในอีกชื่อหนึ่งคือ Acheson Process



- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| a, b : bottom and wall construction with refractory bricks | d : graphite electrode            |
| c : wall support   | e : SiC rim for electric coupling |
| f : inner reaction zone                                    | g : outer shell of reaction zone  |
| h : unreacted raw material mixture                         |                                   |

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเตา Acheson

ลักษณะเตาจะสร้างจากอิฐทนไฟ มีความยาวประมาณ 10 - 20 เมตร มีความกว้างและความสูงประมาณ 3 - 4 เมตร ส่วนท้ายของเตาจะมีอิเล็กโทรดที่ทำจากกราไฟต์ต่ออยู่ แสดงดังรูปที่ 2.4<sup>(3)</sup> ต่อเนื่องเข้ามาบริเวณแกนกลาง ซึ่งเป็นถ่านปิโตรเลียมและกราไฟต์ เมื่อให้ความร้อนที่บริเวณแกน ปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดขึ้นจากด้านใน แล้วค่อยๆ ขยายออกไปยังด้านนอก ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นที่ด้านในมีความบริสุทธิ์สูง และมีสีเขียว ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นห่างจากแกนออกไป มีสิ่งเจือปนเพิ่มขึ้น และมีสีดำ



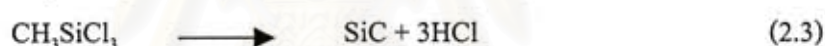
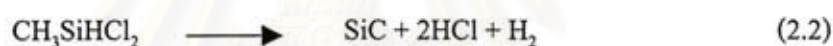
รูปที่ 2.4 เตา Acheson สร้างโดย Elektroschmelzwerk Kempten

หลังจากควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดเป็นเวลา 40 ชั่วโมง<sup>(4)</sup> ปล่อยให้เตาเย็นลง ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้ จะถูกแบ่งออกตามคุณภาพ เป็น 3 - 5 กลุ่ม นำไปบดหยาบและบดละเอียด เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้งานทางเซรามิก นิยมขนาดเล็กและมีความบริสุทธิ์สูง เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการซินเทอริง หลังจากนั้นนำไปล้าง (washing) และกั้ดด้วยกรด (leaching) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะออก ส่วนกราไฟต์ ที่ตกค้าง (graphite residue) จะถูกออกซิไดส์ที่อุณหภูมิประมาณ 400 ° ซ และบริเวณผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เกิดออกซิเดชัน จะถูกกำจัดโดยการกั้ดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก<sup>(5)</sup>

การผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์โดยวิธีนี้ จะได้เป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ แต่ได้มีผู้ทำการทดลองผลิตเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์โดยวิธีนี้ได้เป็นผลสำเร็จ โดยใช้อุณหภูมิประมาณ  $1500^{\circ}\text{C}$  –  $1600^{\circ}\text{C}$  <sup>(6)</sup> นอกจากนั้นยังมีผู้ทำการทดลองผลิตเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นสารละลายของน้ำตาลกับซิลิกาเจล เมื่อเกิดปฏิกิริยาการกำจัดโมเลกุลน้ำ (dehydration) จะเกิดการผสมกันของคาร์บอนกับซิลิกา อุณหภูมิที่ใช้ในวิธีนี้ จะต่ำกว่า  $1800^{\circ}\text{C}$  <sup>(7)</sup>

### 2.1.2.2 Polymer Conversion

วิธีนี้เป็นการสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์โดยให้ความร้อนแก่สารพอลิเมอร์ชนิดออกแกโนซิลิกอน (organosilicon polymer) ที่มีธาตุซิลิกอนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ในบรรยากาศไฮโดรเจน แก๊สเฉื่อย หรือสุญญากาศ เพื่อสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์โดยที่ไม่มีคาร์บอนเป็นสิ่งเจือปน สิ่งที่สำคัญในการเตรียมซิลิกอนคาร์ไบด์โดยวิธีนี้คือ สารตั้งต้นที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนของซิลิกอนต่อคาร์บอนใกล้เคียงกัน ตัวอย่างสารพอลิเมอร์ที่ใช้เช่น ไคคลอโรเมทิลไซเลน หรือ ไตรคลอโรเมทิลไซเลน <sup>(8)</sup> ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3



นอกจากนั้นยังมีการใช้สารพอลิเมอร์ตัวอื่น ๆ เช่น พอลิคาร์โบไซเลน พอลิไซเลน และ พอลิคาร์โบไซโลเซน เป็นต้น <sup>(9,10)</sup>

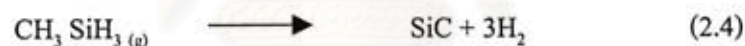
วิธีนี้สามารถผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและสามารถควบคุมให้มีขนาดอนุภาคตามต้องการได้โดย การรักษาอุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ไว้ระยะเวลาหนึ่ง (annealing treatment) <sup>(11)</sup> แต่การผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์โดยวิธีนี้มักจะได้แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by product) เช่น มีเทน ไฮโดรเจน กรดไฮโดรคลอริก แอมโมเนีย เป็นต้น ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการแยกสิ่งเจือปนเหล่านี้ โดยใช้กระบวนการทางความร้อนและปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตามจนถึงปัจจุบันนี้ ยังไม่มีผู้ที่ประสบความสำเร็จอย่างเป็นที่น่าพอใจ และยังมีการทำวิจัยกันอยู่เป็นจำนวนมาก

### 2.1.2.3 Gas Phase Synthesis

วิธีนี้เป็นการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารในสถานะที่เป็นแก๊ส Venkateswuran และคณะ และ Halstead และคณะ<sup>(12,13)</sup> ได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ จากการสลายตัวของพลาสมา (plasma decomposition) ของสาร 3 ชนิด คือ ซิลิกอนเตตราคลอไรด์, ไดมethylไดคลอโรไซเลน และ เมทิลไตรคลอโรไซเลน ซึ่งเป็นแหล่งซิลิกอน และใช้มีเทนเป็นตัวกำเนิดคาร์บอนพบว่าเมื่อนำซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้ไปทำการเผาซินเทอร์ริงโดยไม่ใช้ความดันจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นเป็นร้อยละ 89 – 92 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี

นอกจากนั้นยังมีการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ได้จากการผสมแก๊สไซเลน โพรเทน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนคลอไรด์<sup>(14)</sup> ผ่านการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °ซ

หลังจากนั้นได้มีผู้ทำการผลิตเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์<sup>(15)</sup> จากการสลายตัวของเมทิลไซเลน เจือจางในบรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1000 °ซ – 1800 °ซ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในสมการ 2.4



ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำ มีขนาดเล็กกว่าไมครอน และสามารถทำการเผาซินเทอร์ริงได้ง่าย White และคณะ<sup>(16,17)</sup> สามารถผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีพื้นที่ผิว 600 ตารางเมตรต่อกรัม ได้จากวิธีโซลเจล (Sol gel method) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นกระบวนการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิต่ำและมีพื้นที่ผิวสูง

### 2.1.3 ประเภทของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์

ปัจจุบันได้มีการนำเอาซิลิกอนคาร์ไบด์ไปใช้ในงานต่างๆมากมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิกต่างๆ ใช้ทำหัวสำหรับพ่นไอร้อนที่ใช้ในการขับเคลื่อนจรวด ทำบ้ำ หลอมโลหะ ตัวต้านทานไฟฟ้า เป็นส่วนประกอบในเตาเผา เป็นต้น เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารที่ทำการซินเทอร์ริงยาก เพราะมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้นการจำแนกซิลิกอนคาร์ไบด์จึงจำแนกจากกระบวนการซินเทอร์ริง ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ได้เป็น 4 ประเภทคือ

### 2.1.3.1 Reaction – Sintered Silicon Carbides

### 2.1.3.2 Hot – Pressed Silicon Carbides

### 2.1.3.3 Sintered Silicon Carbides

### 2.1.3.4 Sintered Silicon Carbide Composites

#### 2.1.3.1 Reaction – Sintered Silicon Carbides

ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เรียกว่า reaction-sintered เนื่องจาก การเกิดซิลิกอนคาร์ไบด์จะเกิดขึ้นพร้อมกับเกิดการซินเทอริง พบว่ามีการทดลองใช้ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ผสมผงกราไฟต์<sup>(18)</sup> และให้ความร้อนขณะที่ส่วนผสมนั้นอยู่ในซิลิกอนเหลว จะเกิดการจับตัวกันเอง นอกจากนั้นยังมีการใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ผสมกับเรซินเพื่อให้เรซินเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะชั่วคราว<sup>(19)</sup> ทำให้ได้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ และเมื่อให้ความร้อนกับชิ้นงาน เรซินจะสลายตัวทำให้มีคาร์บอนจับอยู่บริเวณขอบเกรนของซิลิกอนคาร์ไบด์ เกิดเป็นชิ้นงานที่มีรูพรุน เมื่อเติมซิลิกอนและคาร์บอนแล้วให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่ง ซิลิกอนและคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์โมเลกุลใหม่ เกาะอยู่ตามช่องว่างของรูพรุน และยึดติดกับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีอยู่เดิม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุนลดลง ชนิดของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นได้ทั้งแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ และเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ ความแข็งแรงของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์จะขึ้นกับขนาดของอนุภาค โดยทั่วไปจะนิยมใช้ในช่วงประมาณ 5 – 100 ไมครอน กระบวนการนี้ได้มีผู้ทำการทดลองอีกจำนวนมาก<sup>(20-22)</sup>

#### 2.1.3.2 Hot Pressed Silicon Carbides

ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดและให้ความร้อนพร้อมๆกัน เตรียมได้โดยการอัดภายใต้ความดันประมาณ 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิมากกว่า 2000 ° ซ วิธีกรนี้มีกรใช้ในโรงงานเซรามิกมานานหลายปีแล้ว<sup>(23)</sup> มีข้อดีคือสามารถควบคุมให้ได้ผิวที่เรียบสม่ำเสมอ ซึ่งการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอจะเป็นผลมาจากกระบวนการผสมตัวเติมต่างๆ ก่อนการขึ้นรูปและการควบคุมอุณหภูมิในการเผา แต่มีข้อจำกัดคือจะขึ้นรูปได้เฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างธรรมดาไม่สลับซับซ้อน เช่น เป็นแผ่นหรือแท่ง ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีนี้ คือ NC-203 ของบริษัท Norton จะมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเสียดสีและการกัดกร่อนได้ดี โดยเฉพาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ<sup>(24)</sup> ตัวเติมที่นิยมใช้เพื่อช่วยในการซินเทอริงให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง เช่น อะลูมิเนียม<sup>(25)</sup> โบรอน<sup>(26,27)</sup> คาร์บอน<sup>(27)</sup> โบรอนคาร์ไบด์<sup>(28)</sup> และ อะลูมินา<sup>(29)</sup> เป็นต้น

### 2.1.3.3 Sintered Silicon Carbides

จากการที่สารซิลิกอนคาร์ไบด์มีพันธะโควาเลนต์ จึงทำให้งานวิจัยในช่วงแรกไม่สามารถทำการซินเทอริงซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ ถ้าไม่ให้ความดันในขณะที่ให้ความร้อน แต่ได้มีนักวิจัยจำนวนมาก ให้ความสนใจในการพัฒนากระบวนการซินเทอริงซิลิกอนคาร์ไบด์โดยไม่ใช้ความดัน ซึ่งจะทำได้โดยการควบคุมขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้รวมทั้งชนิดของตัวเติมสำหรับการซินเทอริง ในช่วงแรกมีผู้ที่ทำการศึกษาการซินเทอริงของเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่าการเติมโบรอนและคาร์บอน สามารถช่วยในการซินเทอริงได้<sup>(27)</sup> โดยที่คาร์บอนจะไปลดพื้นผิวที่เป็นซิลิกาโดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ผิวซิลิกอนคาร์ไบด์ นอกจากนั้นยังทำการศึกษาอิทธิพลของบรรยากาศที่ใช้ในการซินเทอริงเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์<sup>(28)</sup> พบว่าไอของซิลิกอนในบรรยากาศและบรรยากาศที่เป็นไนโตรเจน จะทำให้อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์จับตัวกันยาก และจะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนบรรยากาศที่เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์จะกำจัดโบรอนออกไปจากระบบ ทำให้สารซิลิกอนคาร์ไบด์รวมตัวกันได้ง่าย

เนื่องจากสารตั้งต้นที่เป็นเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลองมีราคาแพง ต่อมาจึงมีผู้ทำการศึกษาการซินเทอริงของแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ และพบว่าสามารถใช้โบรอนเป็นตัวช่วยในการซินเทอริงได้<sup>(26)</sup> นอกจากนั้นยังสามารถใช้อะลูมิเนียมหรือสารประกอบที่เป็นอะลูมิเนียมทำการซินเทอริงแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ โดยที่ใช้ร่วมกับโบรอนหรือไม่มีโบรอนก็ได้<sup>(25,30,31)</sup> มีการทดลองใช้อะลูมินาในปริมาณร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการซินเทอริงซิลิกอนคาร์ไบด์โดยไม่ใช้ความดัน<sup>(29)</sup> และยังสามารถใช้สารตัวอื่นที่เป็นแหล่งกำเนิดอะลูมิเนียม เช่น อะลูมิเนียมไนไตรด์ อะลูมิเนียมคาร์ไบด์ อะลูมิเนียมไดโบไรด์ และอะลูมิเนียมฟอสไฟด์ อีกด้วย

### 2.1.3.4 Sintered Silicon Carbide Composites

การซินเทอริงผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ผสมกับธาตุหรือสารประกอบอื่น เพื่อช่วยในการซินเทอริง และได้สารที่มีสมบัติเฉพาะสำหรับงานแต่ละประเภท

วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดโบไรด์กับซิลิกอนคาร์ไบด์ เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ได้มีผู้ทำการทดลองผสมสารทั้งสองชนิดในอัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการซินเทอริงโดยไม่ใช้ความดัน<sup>(32)</sup> วัสดุเชิงประกอบโบรอนคาร์ไบด์กับซิลิกอนคาร์ไบด์ เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงแล้วอัดขึ้นรูป หลังจากนั้นทำการเผาซินเทอริงที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 2090 ° ซ - 2160 ° ซ เปลี่ยนแปลง

ส่วนผสมที่เป็นโบรอนคาร์ไบด์ตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วงร้อยละ 80.6 ถึง ร้อยละ 97 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ซึ่งจะขึ้นกับปริมาณของโบรอนคาร์ไบด์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเทอริง<sup>(28)</sup> หลังจากนั้นก็มีผู้ประสบความสำเร็จในการนำอะลูมิเนียมร้อยละ 10 มาเป็นตัวช่วยในการซินเทอริงวัสดุเชิงประกอบโบรอนคาร์ไบด์กับซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่ร้อยละ 40 โดยสามารถซินเทอริงได้ โดยไม่ต้องใช้ความดัน<sup>(33)</sup>

นอกจากนั้นยังมีการทำวัสดุเชิงประกอบที่ผสมคาร์บอนกับซิลิกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากคาร์บอนจะช่วยลดพื้นผิวที่เป็นซิลิกา และป้องกันการขยายตัวของอนุภาค ได้มีผู้ทดลองผสมซิลิกอนคาร์ไบด์กับคาร์บอนในรูปแบบต่างๆกัน เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์กับคาร์บอนในรูปของเส้นใยกราฟไฟต์<sup>(34)</sup> ทำการขึ้นรูปโดยการอัดและให้ความร้อน จะได้ผลิตภัณฑ์ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อการเสียดสี หรือใช้คาร์บอนที่อยู่ในถ่านหิน หรือน้ำมันดินที่ได้จากการกลั่นสลายถ่านหิน<sup>(35)</sup> ทำการซินเทอริงที่อุณหภูมิในช่วง  $1900^{\circ}\text{C}$  -  $2300^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศที่เป็นแก๊สเฉื่อยโดยไม่ใช้ความดัน ใช้โบรอนกับซิลิกอนเป็นตัวช่วยในการซินเทอริงตลอดจนมีการใช้คาร์บอนที่อยู่ในรูปของผงเพชร<sup>(36)</sup> ผสมกับซิลิกอนและซิลิกอนคาร์ไบด์อัดขึ้นรูปและให้ความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า  $1500^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศที่เป็นแก๊สเฉื่อย จะได้เป็นวัสดุเชิงประกอบของซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอน และคาร์บอน

## 2.2 เซรามิกที่มีรูพรุน

### 2.2.1 ประเภทของเซรามิกที่มีรูพรุน

เซรามิกที่มีรูพรุน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท<sup>(37)</sup> คือ “reticulate ceramic” และ “foam ceramic” ลักษณะ reticulate ceramic เป็นวัสดุที่มีรูพรุนแบบเปิดอย่างต่อเนื่อง โดยมีเนื้อสารเซรามิกอยู่ในลักษณะที่เป็นตาข่ายคล้าย โครงสร้างของฟองน้ำ ในขณะที่ foam ceramic จะประกอบด้วยรูพรุนที่เป็นรูปิด ภายในเนื้อสารเซรามิก การที่สารเซรามิกมีโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นน้อย และความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นจึงได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานได้หลายด้าน ดังจะกล่าวถึงต่อไป

ข้อแตกต่างระหว่าง reticulate ceramic และ foam ceramic อยู่ที่ลักษณะของรูพรุน reticulate ceramic มีรูพรุนแบบเปิดและมีความสามารถในการซึมผ่านสูง ส่วน foam ceramic มีรูพรุนภายในทั้งแบบเปิดและปิด และมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ

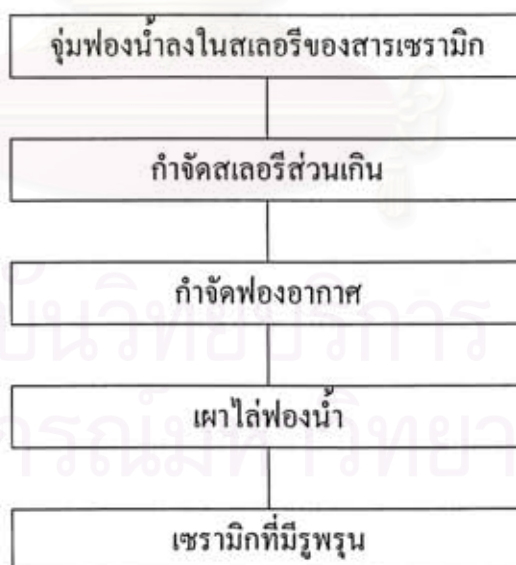
การเลือกใช้สารเซรามิก และวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม จะทำให้ได้เซรามิกชนิดที่มีรูพรุน มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่ออุณหภูมิสูงและการกัดกร่อนได้ดี น้ำหนักเบา สามารถนำไปใช้กรอง โลหะหลอมเหลว หรือกรองแก๊สที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังสามารถใช้เป็น ฉนวนความร้อน และวัสดุทนไฟ ได้อีกด้วย

### 2.2.2 การขึ้นรูปเซรามิกที่มีรูพรุน

วิธีการขึ้นรูปเซรามิกให้มีรูพรุน โดยทั่วไปมี 2 วิธีหลัก คือ polymeric sponge เป็นการจุ่ม ฟองน้ำลงในสเลอรีของสารเซรามิก เมื่อทำการเผาฟองน้ำก็จะสลายตัวออกไป เหลือแต่สารเซรามิก ที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับฟองน้ำที่ใช้ วิธีนี้จะทำให้ได้เซรามิกที่มีรูพรุนแบบเปิด (reticulate) ส่วน อีกวิธีหนึ่งคือ foaming เป็นการเตรียมสารเซรามิกที่มีรูพรุนโดยผสมสารเซรามิกกับพอลิเมอร์ เมื่อ ทำการเผา พอลิเมอร์จะสลายออกจากเนื้อสารเซรามิกไป ทำให้เหลือเป็น โครงสร้างที่มีรูพรุน วิธีนี้ สามารถใช้ผลิตได้ทั้ง ชนิดที่มีรูพรุนแบบเปิดและแบบปิด

#### 2.2.2.1 การขึ้นรูปโดยวิธี Polymeric Sponge

Schwartzwalder และคณะ ได้อธิบายวิธีการขึ้นรูปเซรามิกให้มีรูพรุนดังแสดงในรูปที่ 2.5<sup>(38)</sup>



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกที่มีรูพรุน โดยวิธี Polymeric Sponge



กระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาปรับเปลี่ยนจนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งพอจะอธิบายได้เป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้ <sup>(37)</sup>



รูปที่ 2.6 รายละเอียดขั้นตอนการขึ้นรูปโดยวิธี Polymeric Sponge

ขั้นตอนที่ 1 การเลือกฟองน้ำ โดยทั่วไปจะเลือกใช้ฟองน้ำชนิดที่มีรูพรุน 2-50 รูต่อความยาว 1 เซนติเมตร หรือ 5-50 รูต่อความยาว 1 นิ้ว ฟองน้ำจะต้องเป็นชนิดที่จะสลายตัวออกไปได้ก่อนที่จะถึงอุณหภูมิที่สารเซรามิกเกิดการซินเทอริง ฟองน้ำที่นำมาใช้มีหลายชนิดเช่น พอลิยูรีเทน เซลลูโลส พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิสไตรีน และลาเทกซ์ <sup>(37)</sup> ที่นิยมใช้กันคือ พอลิยูรีเทน เนื่องจากมี softening temperature ต่ำ สลายตัวออกไปได้ง่ายเมื่อให้ความร้อน ขนาดของฟองน้ำที่ใช้มีความกว้างตั้งแต่ 10-100 เซนติเมตร และหนา 1-10 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมสเลอรี่ของเซรามิก โดยทั่วไปสเลอรี่จะประกอบด้วย สารเซรามิก น้ำ และตัวเติม สารเซรามิกแต่ละชนิดที่เลือกใช้ก็จะขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการเช่น ถ้าใช้สำหรับการกรองโลหะหลอมเหลว เซรามิกต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี และมีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ <sup>(39)</sup>

นอกจากนี้ยังมีสารเซรามิกที่ใช้ในงานอื่นๆอีก เช่นอะลูมินา, ซิลิกา, แมกนีเซียม, เซอร์โคเนีย, มัลไลต์ <sup>(38,40)</sup> หรือแม้กระทั่งสารพวกเพียโซอิเล็กทริก เช่น สารเลดเซอร์โคเนตไททานเนต <sup>(41)</sup> เป็นต้น

ขนาดอนุภาคของเซรามิกที่ใช้ จะเล็กกว่า 200 ไมครอน โดยเฉพาะจะนิยมให้เล็กกว่า 45 ไมครอน ปริมาณน้ำที่ใช้ ก็จะต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก<sup>(37)</sup>

ขั้นตอนที่ 3 การเลือกตัวเติม เพื่อปรับให้สเลอรีมีสมบัติตามต้องการ ประกอบด้วย ตัวช่วยในการยึดเกาะ เช่น โซเดียมซิลิเกต<sup>(38,42)</sup> อะลูมิเนียมอโทฟอสเฟต<sup>(42)</sup> และคอลลอยด์คอลลซิกา<sup>(43)</sup> ซึ่งสารเหล่านี้นอกจากเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะแล้วยังช่วยเพิ่ม wettability ของตัวกรองเซรามิกในการกรองโลหะอัลลอยด์ของเหล็กอีกด้วย สารที่ช่วยกระจายลอยตัว จะทำให้สเลอรีมีการไหลที่เหมาะสมที่จะสามารถใช้ฟองน้ำชุบได้ สารในกลุ่มนี้ได้แก่ ดิน เบนโทไนต์<sup>(38,42)</sup> หรือมอนต์มอริลโลไนต์<sup>(44)</sup> ซึ่งจะเติมลงไปนในสเลอรีเป็นปริมาณร้อยละ 0.1 ถึงร้อยละ 12 ของน้ำหนักสเลอรีทั้งหมด สารอื่นๆที่เติมลงไปเช่น สารที่ป้องกันการเกิดฟอง (antifoaming agent) สารที่ทำให้เกาะตัว (flocculating agent) และสารที่ช่วยให้แข็งตัว (air-setting agent) สารที่นิยมใช้เป็นสารที่ช่วยให้แข็งตัวคืออะลูมิเนียมอโทฟอสเฟต<sup>(42)</sup> แมกนีเซียมอโทฟอสเฟต และ อะลูมิเนียมไฮดรอกซีคลอไรด์<sup>(37)</sup> เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 การจุ่มฟองน้ำลงในสเลอรี ทำการบีบฟองน้ำก่อนที่จะจุ่มลงไป เมื่อฟองน้ำลงไปนในสเลอรีแล้วจะคืนรูปร่างเดิม สเลอรีของสารเซรามิกจะแทรกเข้าไปตามโครงสร้างของฟองน้ำ ทำการบีบฟองน้ำและปล่อยให้ฟองน้ำกลับคืนสู่รูปร่างเดิมซ้ำกันหลายๆครั้ง เพื่อเพิ่มให้ได้ความหนาแน่นของชิ้นงานตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 5 การกำจัดสเลอรีส่วนเกินออกจากฟองน้ำ หลังจากที่จุ่มฟองน้ำลงในสเลอรีแล้ว สารเซรามิกจะแทรกอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของฟองน้ำ จะทำการกำจัดสเลอรีส่วนเกินออกในปริมาณ ร้อยละ 25 ถึง ร้อยละ 75 ของสเลอรีที่อยู่ในฟองน้ำ วิธีการกำจัดสเลอรีอาจจะทำได้โดยการใช้แผ่นไม้บีบอัด<sup>(45)</sup> การใช้แรงเหวี่ยง (centrifuging)<sup>(46)</sup> ตลอดจนการรีดฟองน้ำผ่านแท่งทรงกระบอก เพื่อกำจัด สเลอรีส่วนเกินออกไป<sup>(42,47)</sup>

การกำหนดรูปร่างของชิ้นงานเซรามิกที่มีรูพรุนสามารถทำได้ในขั้นตอนนี้ เนื่องจากการที่ฟองน้ำยังหยึดหยุ่นอยู่ สามารถดัดให้เป็นรูปร่างให้เหมาะกับการนำไปใช้งานได้ หลังจากนั้นรูปร่างของชิ้นงานจะคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดกระบวนการเผา

ขั้นตอนที่ 6 การอบแห้ง สามารถทำได้ทั้งในอากาศและในเตาอบ ซึ่งการทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศจะใช้เวลาประมาณ 8-24 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งในเตาอบ จะใช้อุณหภูมิในช่วง 100 ° ซ – 700 ° ซ และใช้เวลาตั้งแต่ 15 นาที จนถึง 6 ชั่วโมง<sup>(37)</sup>

ขั้นตอนที่ 7 การเผาไล่ฟองน้ำและสารอินทรีย์ออกจากชิ้นงาน ใช้อุณหภูมิในช่วง  $350^{\circ}\text{C}$  –  $800^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาดังแต่ 15 นาที จนถึง 6 ชั่วโมง<sup>(37)</sup> ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นกับชนิดของฟองน้ำ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะทำไปอย่างช้าๆ ขั้นตอนนี้สามารถทำรวมกับขั้นตอนการเผาซินเทอริงสารเซรามิกได้

ขั้นตอนที่ 8 การเผาซินเทอริงสารเซรามิก เป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของสารเซรามิก อุณหภูมิในการซินเทอริงจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเซรามิกที่ใช้ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง  $1000^{\circ}\text{C}$  –  $1700^{\circ}\text{C}$ <sup>(37)</sup> เช่น Pryor และคณะ<sup>(48)</sup> ทำการเผาซินเทอริงอะลูมินา โดยใช้อุณหภูมิ  $1350^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หรือ Brockmeyer และคณะ<sup>(39)</sup> ทำการเผาเซรามิกที่มีรูพรุนชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์ - อะลูมินา ที่อุณหภูมิ  $1150^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นต้น

#### 2.2.2.2 การขึ้นรูปโดยวิธี Foaming

เป็นการเตรียมสารเซรามิกตามชนิดที่ต้องการนำไปใช้ ผสมกับสารพอลิเมอร์ เมื่อทำการเผา สารพอลิเมอร์จะสลายออกจากเนื้อสารเซรามิกไป ทำให้เหลือเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนอยู่ วิธีนี้สามารถผลิตได้ทั้ง แบบรูพรุนเปิดและปิด ข้อดีที่แตกต่างจากวิธี polymeric sponge คือ สามารถขึ้นรูปเป็นเซรามิกที่มีรูพรุนแบบปิดขนาดเล็กมากได้

วิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีขึ้นรูปเซรามิกทั่วไปได้ เช่น เมื่อต้องการชิ้นงานที่มีภาคตัดขวางคงที่ จะใช้วิธีการรีด (extrusion) โดยการนำสารเซรามิกผสมกับตัวเติมต่างๆที่เป็นสารอินทรีย์ แล้วทำการรีดออกมา เผาไล่ตัวเติมและสารอินทรีย์ต่างๆออกไป แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือเกิดการแยกชั้น (lamination) ในเนื้อชิ้นงาน ตัวอย่างการขึ้นรูปโดยวิธีนี้ ได้แก่การขึ้นรูปคอร์รันดัมให้มีรูพรุนสำหรับใช้เป็นตัวนำของตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (carrier of oxidation catalyst)<sup>(49)</sup> โดยใช้อลูมินัมไฮดรอกไซด์กับอะลูมินาที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว เติมแนฟทาลินเพื่อให้เกิดรูพรุน และเติม kaolinite กรดอะซิติก และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้เกิดความเหนียว

นอกจากนั้นยังมีการอัดแบบให้ความร้อน (Hot Pressing) ซึ่งสามารถขึ้นรูปซิลิกาที่มีรูพรุนได้ โดยสารตั้งต้นที่ใช้คือซิลิกาเจล<sup>(50)</sup> หรือสามารถขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูพรุนถึงร้อยละ 45 ได้โดยการเตรียมจาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ กับ แอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต<sup>(51)</sup> ส่วนการอัดแบบให้ความร้อนและแรงดันในทุกทิศทาง (Hot Isostatic Pressing) พบว่ามีการใช้ขึ้นรูปอะลูมินาที่มีรูพรุน<sup>(52)</sup> ซึ่งชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรง มากกว่าชิ้นงานอะลูมินาที่มีรูพรุนเท่ากันซึ่งขึ้นรูปโดยการอัดแบบให้ความร้อน สำหรับวิธีการ ขึ้นรูปแบบเทให้เป็นแผ่นบาง (Tape casting)

สามารถทำได้ทั้งระบบที่ใช้ น้ำ และ ใช้ สารละลายอินทรีย์ เมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นบางได้แล้ว นำไปทำการเผาไล่สารอินทรีย์ที่เป็นตัวเติมออกไปจะได้ฟิล์มบางที่มีรูพรุนสูง เช่นการทำไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูพรุน<sup>(53)</sup> ซึ่งได้จากการผสม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต กับ แคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนที่จะทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ เมื่อนำไปเผาจะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้น

### 2.2.3 การใช้ประโยชน์เซรามิกที่มีรูพรุน

การนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของสารเซรามิก เช่นสารเซรามิกพวก อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ มัลไลต์ คอเดียไรต์ สามารถใช้เป็นตัวกรองที่อุณหภูมิสูง เป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ภายในรถยนต์ และพวกที่มีโครงสร้างแบบ honeycomb สามารถใช้เป็น catalyst carrier สำหรับการบวนการทางเคมีในโรงงานต่างๆ เซรามิกที่มีรูพรุนสามารถกรองได้ทั้งฝุ่นละออง หรือแก๊สพิษในโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนกรองโลหะหลอมเหลวในโรงงานหล่อโลหะได้ นอกจากนั้นยังใช้เป็นฉนวนกันความร้อน อิเล็กโทรด โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา และวัสดุทนไฟสำหรับใช้ในเตาเผาได้อีกด้วย<sup>(54)</sup>

สำหรับในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ<sup>(55)</sup> มีการนำเซรามิกที่มีรูพรุนไปใช้ เช่น ไดอะทอมไมต์ หรือ แมกนีเซีย - ซิลิกา เป็น ceramic carriers และใช้เป็น bioreactors ในกระบวนการหมัก ซึ่งจะช่วยลดเวลาการเกิดปฏิกิริยาคั่ว และทางการแพทย์สามารถใช้เซรามิกที่มีรูพรุนทดแทนกระดูก ได้ แก่สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ร่วมกับ partially stabilized zirconia

จะเห็นได้ว่า เซรามิกที่มีรูพรุนมีประโยชน์ในหลายด้าน แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเซรามิกที่มีรูพรุนสำหรับการกรองโลหะหลอมเหลว

### 2.3 การกรองโลหะหลอมเหลว

การใช้เซรามิกที่มีรูพรุนในการกรองโลหะหลอมเหลวจะช่วยเพิ่มคุณภาพของงานโลหะหล่อ โดยการกำจัด inclusions ตารางที่ 2.1<sup>(56)</sup> แสดงผลของการใช้ partially stabilized zirconia ที่มีจำนวนรู 10 รูต่อความยาว 1 นิ้ว ในการกรองโลหะหลอมเหลว เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนทางวิศวกรรม เพราะปัญหาที่มักพบในชิ้นงานโลหะหล่อ คือ มักจะเกิด oxide inclusions ที่บริเวณผิวของชิ้นงาน แต่เมื่อใช้เซรามิกที่มีรูพรุนกรองโลหะหลอมเหลวขณะทำการหล่อโลหะ จะทำให้ได้ผลที่ดีขึ้นมากกว่าร้อยละ 10 และลดการทำงานซ้ำในการซ่อมแซมชิ้นงาน เช่นสามารถ

ลดการทำงานซ้ำจาก 4.5 welds/part ได้เป็น 1.5 welds/part สำหรับชิ้นงานส่วนที่เป็น Jet engine swirl plat หรือลดการทำงานซ้ำจาก 6 welds/part เป็น 2.5 welds/part สำหรับชิ้นส่วนที่เป็น Jet engine bearing hub เป็นต้น

ตัวกรองที่ใช้งานการกรองโลหะหลอมเหลว มักจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบตาข่าย และโครงสร้างสม่ำเสมอซึ่งได้มาจากการรีด รูปร่างของรูพรุนเป็นได้ทั้งสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม ขึ้นอยู่กับการออกแบบหัวรีด สมบัติของเซรามิกที่มีรูพรุนเหล่านี้ จะขึ้นกับโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยความหนาแน่นและขนาดของรูพรุน และชนิดของสารเซรามิก ข้อดีของเซรามิกที่มีรูพรุนคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และทนต่อการกัดกร่อนและสึกกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดี ตัวอย่างการเลือกเซรามิกที่มีรูพรุนชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในงานหล่อโลหะแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.2 <sup>(57)</sup>

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของการใช้เซรามิกที่มีรูพรุนในการกรองโลหะหลอมเหลว

Part	Damper seal	Jet engine swirl plat	Engine shroud	Jet engine bearing hub
Problem	Unrepairable	Oxide inclusions at surface	Oxide inclusions at surface	Oxide inclusions at surface
Results	13% increase in yield	Decrease in rework : 4.5 welds/part vs 1.5 welds/part	10% increase in yield	Decrease in rework : 6 welds/part vs 2.5 welds/part

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงการเลือกเซรามิกที่มีรูพรุน ชนิดต่างๆ ไปใช้ในงานหล่อโลหะแต่ละประเภท

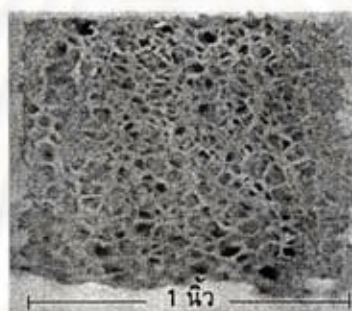
Company	Tradename	Composition	Applications	Benefits
Corning Inc. Foseco Inc.	Celtrex	55% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 38% SiO <sub>2</sub> , 7% MgO	Iron alloys	Reduction in scrap rate
Corning Inc.	None	77% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 23% SiO <sub>2</sub>	Carbon , low alloy , stainless steel	Pouring temperatures up to 1675 °C
Drackekeramick Productions GmbH	Cerapor	Alumina , SiC , cordierite , ZrO <sub>2</sub>	Aluminum , iron , copper , bronze , steel , zinc	Laminated duplex and triplex construction
Hi-tech ceramics	Udicell	Alumina , mullite , ZTA , PSZ	Superalloys , low carbon stainless steel	Large volume up to 120 tons
	Alucell	92% alumina with mullite phase	Nonferrous alloys	Improved thermal shock resistance , smaller filters required
Selee Corp.	Selee	Alumina , PSZ , others	Aluminum , iron , steel , others	High flow rate

### บทที่ 3

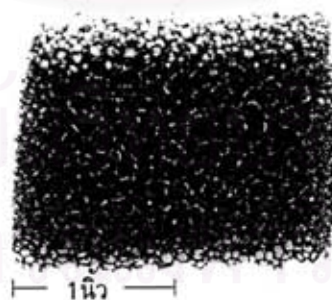
#### การทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบ

##### 3.1 การเลือกฟองน้ำและการศึกษาการสลายตัวของฟองน้ำ

ฟองน้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นพอลิยูรีเทน มี 2 ชนิดคือ ฟองน้ำชนิด C และชนิด J ฟองน้ำชนิด C มีสีเหลืองเป็นฟองน้ำที่ใช้ในงานทำความสะอาดทั่วไป หาซื้อได้ตามท้องตลาด มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) มีจำนวนรูประมาณ 9-11 รูต่อความยาว 1 นิ้ว ความหนาแน่น 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนฟองน้ำชนิด J มีสีดำ ได้จากประเทศญี่ปุ่น มีความหนาแน่น 0.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจำนวนรูประมาณ 8-10 รูต่อความยาว 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) ทำการศึกษาการสลายตัวของฟองน้ำ โดยเครื่อง TG-DTA รุ่น TG/DTA 200 ผลิตโดยบริษัท SEIKO ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.2



(ก)

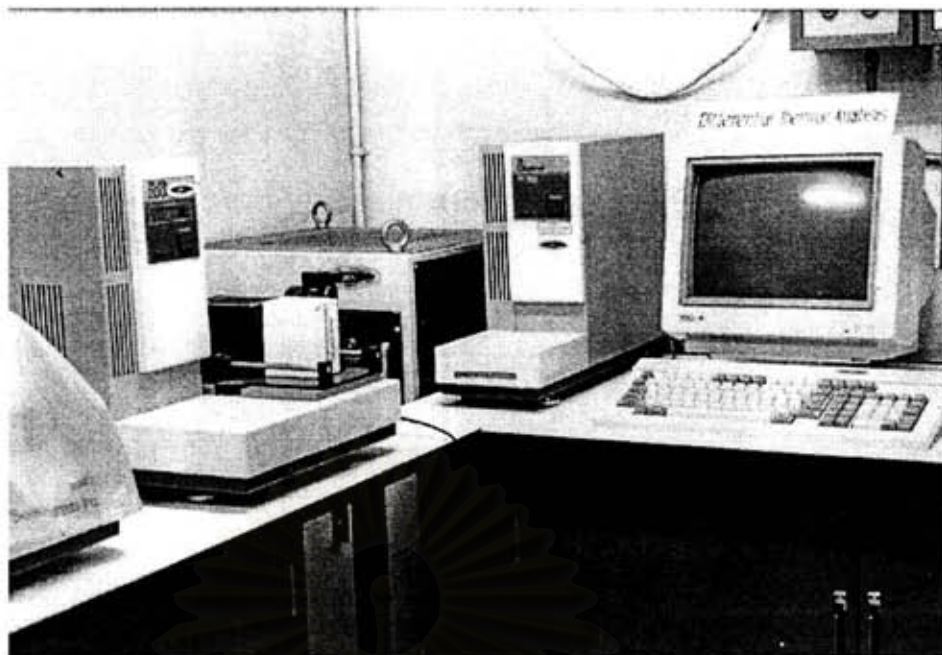


(ข)

รูปที่ 3.1 ลักษณะของฟองน้ำที่ใช้ในการทดลอง

(ก) ฟองน้ำชนิด C

(ข) ฟองน้ำชนิด J



รูปที่ 3.2 เครื่อง TG-DTA

### การศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิง

DTA (Differential Thermal Analysis) เป็นการตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างสารตัวอย่าง กับสารอ้างอิงอะลูมินา สารทั้งสองชนิด จะถูกใส่ไว้ในภาชนะ (crucible) แพลททินัม และวางในส่วนของแต่ละอุณหภูมิ โดยมีที่วัดอุณหภูมิ (thermocouple) ติดไว้ที่ด้านล่างของ crucible นั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารอ้างอิงแตกต่างกัน เมื่อนำอุณหภูมิที่ต่างกันไปสร้างเป็นเส้นกราฟ จะได้รูปร่างลักษณะคล้ายพาราโบลาทั้งแบบคว่ำและหงาย แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน หรือปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งจะแตกต่างกันไปในเครื่องแต่ละรุ่น รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องDTA <sup>(58)</sup> และรูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง DTA <sup>(59)</sup>

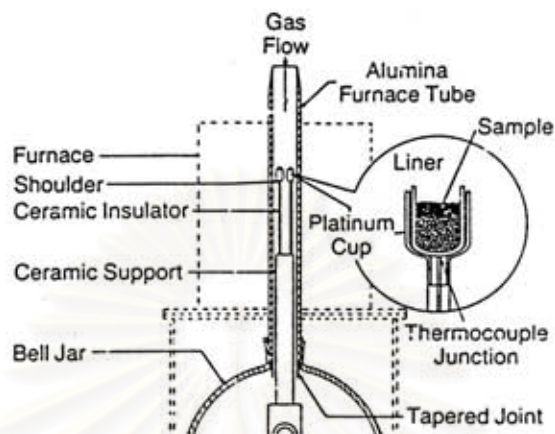
### การเตรียมตัวอย่าง

ผงตัวอย่างควรมีขนาดตั้งแต่ 45 – 150 ไมโครเมตร เพราะถ้าผงมีขนาดเล็กเกินไป จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอุณหภูมิของปฏิกิริยาไป

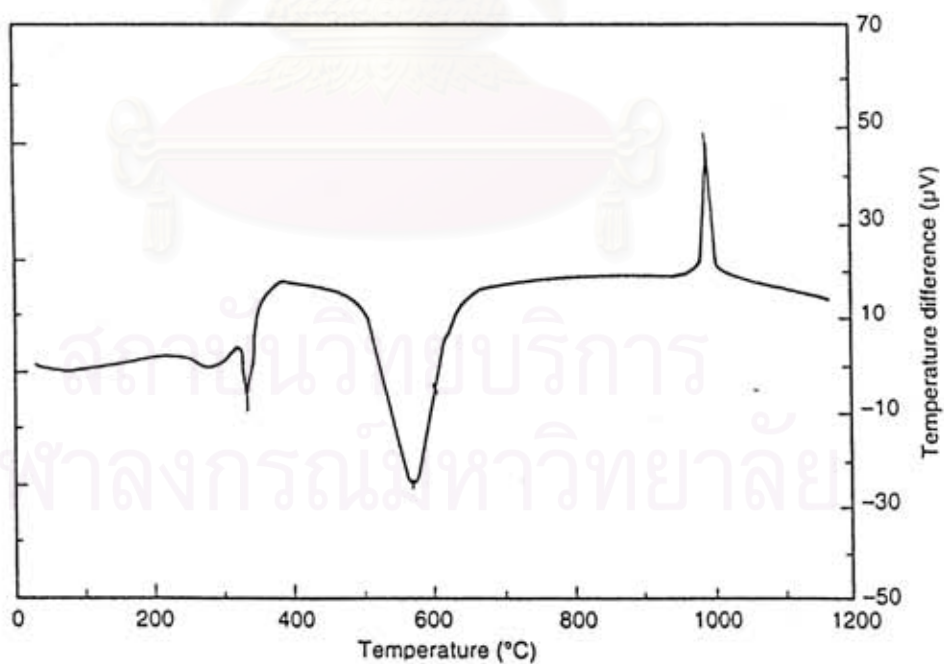


### HIGH TEMPERATURE CELL CROSS SECTION

DTA



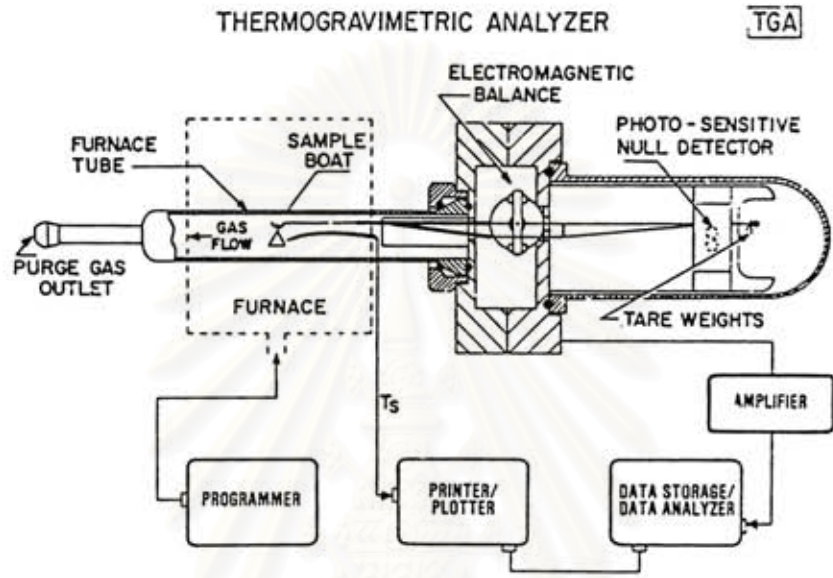
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง DTA



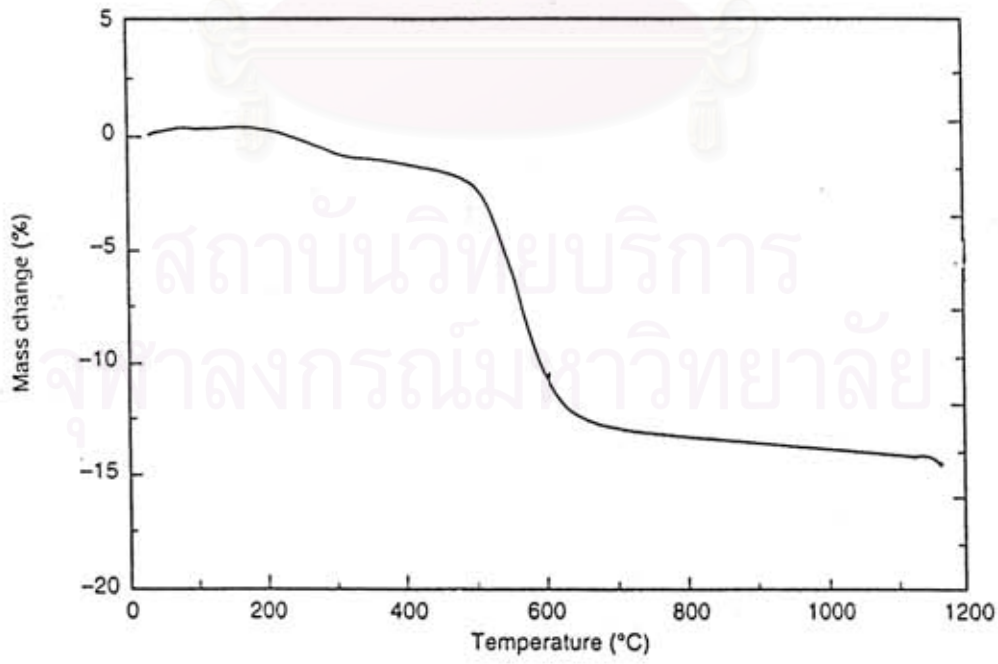
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง DTA

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงมวลสารเนื่องจากอุณหภูมิ

TGA (Thermogravimetric Analysis) เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษาและตรวจสอบน้ำหนักของสารตัวอย่างขณะเผาโดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิกงที่ สามารถใช้วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างที่เกิดขึ้นในขณะที่ให้ความร้อน รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง TGA <sup>(58)</sup> และรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างของผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง TGA <sup>(59)</sup>



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องTGA



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง TGA

### 3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 ชนิด คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.06 ไมโครเมตร มีสีน้ำตาล ผลิตโดยบริษัท Lonza ประเทศเยอรมัน อีก 2 ชนิด คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จากประเทศนอร์เวย์ จะมีสีเทา ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 26 ไมโครเมตร และ 60 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนตัวเติมที่ใช้ คืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 64-66 ผลิตโดยบริษัท Fluka กรดฟอสฟอริก ความบริสุทธิ์ร้อยละ 85 ผลิตโดยบริษัท Merck ดิน จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ประเทศไทย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7.46 ไมโครเมตร ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินแสดงดังตารางที่ 4.4 ทดกัม 2 ชนิด คือ ทดกัมชนิดที่ 1 ได้จากแหล่งจังหวัดอุดรดิตถ์และทดกัมชนิดที่ 2 จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ประเทศไทย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 8.45 และ 13.64 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลวิเคราะห์ทางเคมีของทดกัมทั้ง 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.6 ก่อนกระบวนการขึ้นรูปและเผาซินเทอร์ริง จะมีการวิเคราะห์สมบัติต่างๆดังนี้

#### 3.2.1 การวัดการกระจายขนาดอนุภาค

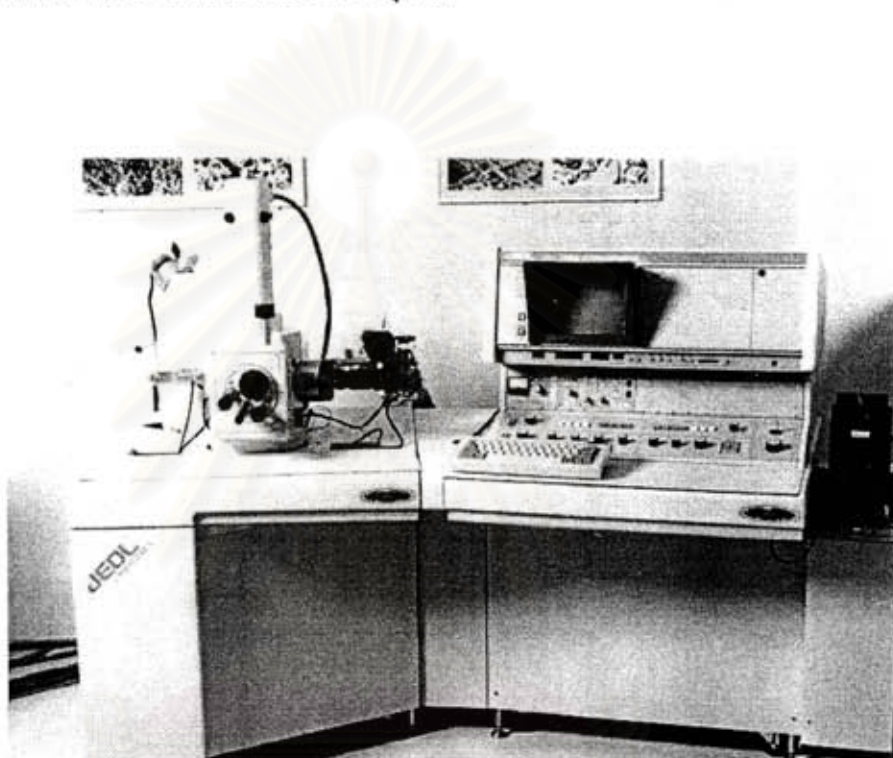
วัดโดยเครื่อง Centrifugal Particle Size Analyzer รุ่น SA-CP3 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu Corporation ดังรูปที่ 3.7 นำสารมาทำให้เกิดการกระจายตัว โดยใช้สารละลายโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต เป็นตัวช่วยในการกระจายตัว (dispersing agent) และกวนโดยใช้ magnetic stirrer เพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นำไปเข้าเครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาค



รูปที่ 3.7 เครื่อง Particle Size Analyzer

### 3.2.2 การศึกษาลักษณะอนุภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM- T330A ผลิตโดยบริษัท JEOL ดังรูปที่ 3.8 ถูกใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาค การเตรียมตัวอย่างทำได้โดยการโรยผงตัวอย่างลงบนแท่นรอง (sample holder) ที่มีการเคลือบด้วยคาร์บอน ให้ผงกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้า แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะอนุภาค



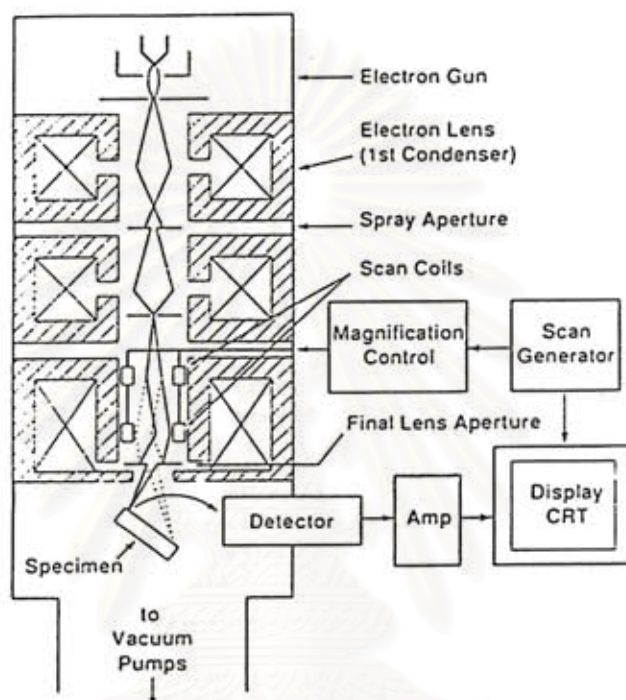
รูปที่ 3.8 เครื่อง SEM

#### กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

SEM (Scanning Electron Microscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะและรายละเอียดโครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุ เนื่องจากมีกำลังขยายสูงกว่า กล้องจุลทรรศน์ทั่วไป นอกจากนี้การนำเครื่อง Wavelength Dispersive Spectrometer (WDS) และเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer (EDS) มาประกอบเข้ากับเครื่อง SEM ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุได้

ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง SEM คือ ถ้าเป็นสารตัวอย่างผง จะบอกรูปร่างของอนุภาค รวมทั้งขนาดและการกระจายของอนุภาค และถ้าเป็นชิ้นงานที่ผ่านการเผามาแล้ว ก็จะสามารถใช้อธิบายกระบวนการซินเทอริง และบทบาทของตัวเติม รวมทั้งขนาดและจำนวนของรูพรุน ซึ่งจะมีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานด้วย

### หลักการทำงานของเครื่อง SEM

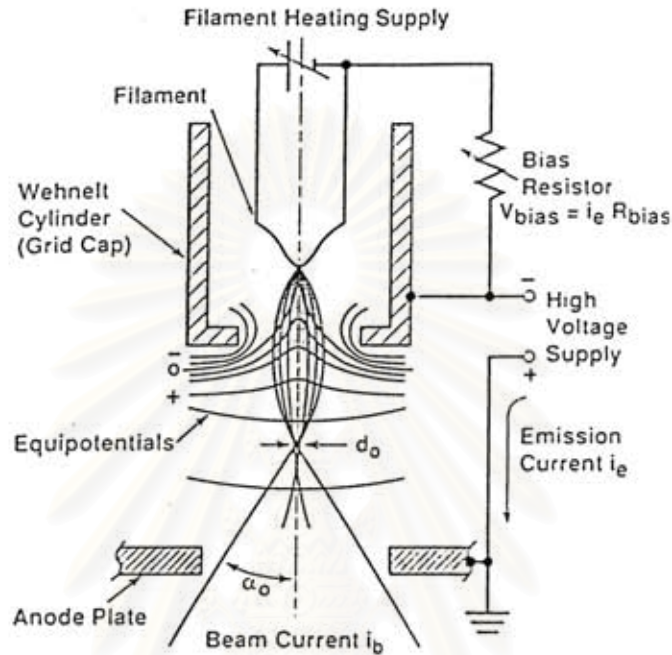


รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

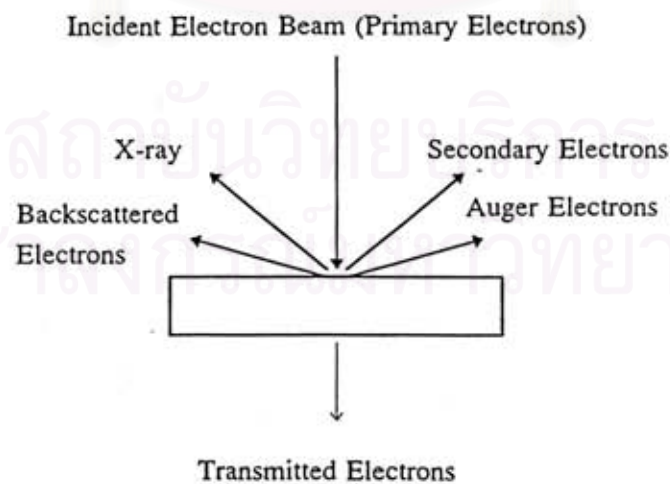
ถ้าอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นในส่วนของปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ส่วนประกอบของปืนอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จะประกอบด้วยไส้หลอด (filament) โดยทั่วไปจะใช้โลหะทังสเตน ต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นคาโทด และมี Wehnelt Cylinder ทำหน้าที่เป็นอานอด เมื่อให้ความต่างศักย์เข้าไป อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากไส้หลอด จากนั้นจะถูกบังคับให้วิ่งไปยังชิ้นงานที่จะวิเคราะห์ โดย condenser lens<sup>(60)</sup>

เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ไปเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานส่วนที่เหลือจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณต่างๆ ตามความลึกของอิเล็กตรอนที่กระทบกับวัสดุ แสดงดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12

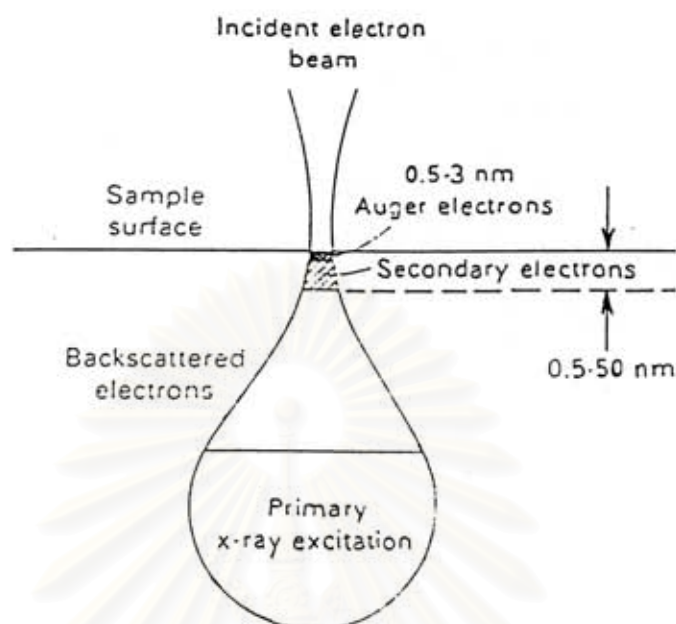
สัญญาณที่นำมาใช้สร้างภาพโดยเครื่อง SEM เป็นสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ซึ่งมีพลังงานในช่วง 0-50 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนมากประมาณ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ ภาพที่เกิดจาก SEM จะเป็นภาพที่เกิดจากการส่องกราด (scan) บนวัสดุที่นำมาทดสอบแต่ละจุด แล้วนำจุดเหล่านั้นมาต่อๆกัน โดยแต่ละภาพที่สร้างขึ้น จะใช้จุดสัญญาณไม่ต่ำกว่า 4 ล้านจุด การส่องกราดจะเร็วมากจนทำให้เห็นเป็นภาพต่อเนื่อง ไม่เป็นจุด



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของปืนอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.11 สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิววัสดุ



รูปที่ 3.12 ชนิดของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ความลึกระดับต่างๆ

### การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ถ้าเป็นชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว นำมาวางบนแท่นรอง (sample holder) แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าก่อนนำเข้าไปวิเคราะห์ ส่วนตัวอย่างที่เป็นผง เตรียมโดยการโรยผงตัวอย่างลงบนแท่นรอง ซึ่งทำด้วย carbon paint ให้ผงกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นำไปเคลือบผิวด้วยทอง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาค

### 3.2.3 การวัดพื้นที่ผิวโดยวิธี BET

โดยใช้เครื่อง Surface Area Analyzer รุ่น ASAP 2000 แสดงดังรูปที่ 3.13 นำผงตัวอย่างไปอบให้แห้ง หลังจากนั้นจึงนำไปใส่ในกระเปาะ แล้วนำไปหาค่าพื้นที่ผิว



รูปที่ 3.13 เครื่อง Surface Area Analyzer

### การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface Area Analysis)

วิเคราะห์โดยการคำนวณหาพื้นที่ผิวโดยรวม (total surface area) <sup>(61)</sup> ซึ่งง่ายกว่าการวัดขนาดอนุภาคแล้วนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิว เนื่องจากลักษณะอนุภาคไม่ได้เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์เสมอไป ในการวัดจะพิจารณาจากการดูดซับก๊าซบนผิวของของแข็ง โดยอาศัยกราฟของ adsorption isotherm ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทตามลักษณะของสาร

ประเภทที่ 1 มักพบกับตัวอย่างที่มีความพรุนระดับจุลภาค ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย ทำให้การดูดซับของสารประเภทนี้อิ่มตัวอย่างรวดเร็วที่ความดันต่ำเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ก

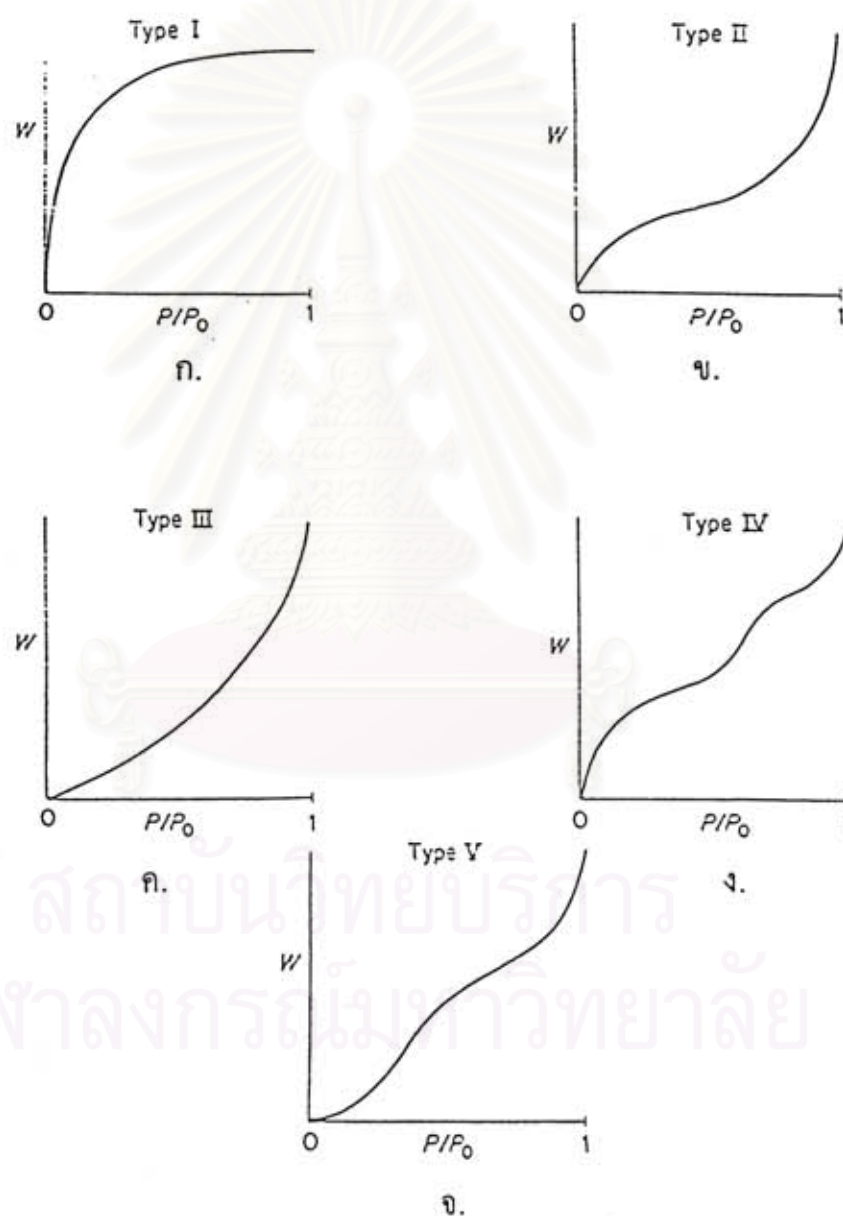
ประเภทที่ 2 พบได้กับตัวอย่างที่ไม่มีความพรุนหรือผงที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดจุลภาค จุดหักของกราฟมักเกิดเมื่อมีการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งแล้วอย่างสมบูรณ์ และเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นก็จะเกิดการดูดซับก๊าซในชั้นที่สองและชั้นถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ข

ประเภทที่ 3 เป็นประเภทซึ่งความร้อนของการดูดซับต่ำกว่าความร้อนของการเป็นของเหลวของตัวถูกดูดซับ ดังนั้นขณะที่การดูดซับดำเนินไป ปฏิสัมพันธ์ชั้นของเหลวกับตัวถูกดูดซับจะมีค่าสูงกว่าปฏิสัมพันธ์กับพื้นผิวของแข็ง การดูดซับจึงเกิดได้สูง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ค



ประเภทที่ 4 เกิดกับสารที่มีความพรุนตัวสูง มีขนาดรูพรุนในช่วง 15 – 1000 อังสตรอม และจุดหักของกราฟจะเกิดเมื่อมีการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งอย่างสมบูรณ์ แล้วมีการดูดในชั้นถัดไปอีก เมื่อเพิ่มความดัน เช่นเดียวกับกราฟ isotherm ประเภทที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ง

ประเภทที่ 5 เป็นผลมาจากศักยภาพการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่ำ เช่นเดียวกับประเภทที่ 3 อย่างไรก็ตามประเภทที่ 5 มีขนาดรูพรุนเช่นเดียวกับประเภทที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จ



รูปที่ 3.14 กราฟ adsorption isotherm

การคำนวณหาพื้นที่ผิวทั้งหมดของของแข็ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.1

$$S_T = N_m A_{cs} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $S_T$  = พื้นที่ผิวทั้งหมด  
 $N_m$  = จำนวน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับทั้งหมดบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียว  
 $A_{cs}$  = พื้นที่ตัดขวางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (สำหรับไนโตรเจน โดยทั่วไป  
 ใช้ค่า  $16.2 \times 10^{-20}$  ตารางเมตร)

เมื่อแทนที่ค่า  $N_m$  ดังสมการที่ 3.2 ลงไปในสมการ 3.1 จะได้เป็นดังสมการ 3.3

$$N_m = \frac{W_m N}{M} \quad (3.2)$$

$$S_T = \frac{W_m N A_{cs}}{M} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W_m$  = น้ำหนักสารถูกดูดซับทั้งหมด บนพื้นผิวชั้นเดียว  
 $N$  = เลขอวกาโด ( $6.023 \times 10^{23}$  โมเลกุล/โมล)  
 $M$  = มวลโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการหา  $S_T$  จะต้องทราบค่า  $W_m$  ซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir) หรือแบบจำลองการดูดซับของ BET

แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

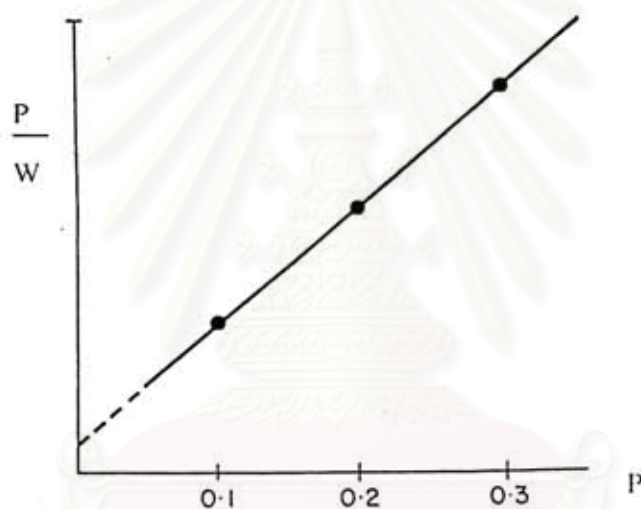
พิจารณาว่าหลังจากมีการดูดซับบางส่วน ( $W/W_m$ ) แล้ว โมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของส่วนที่ยังไม่ได้ปกคลุมเท่านั้น ( $1 - W/W_m$ ) สามารถเขียนได้เป็นดังสมการที่ 3.4

$$\frac{P}{W} = \frac{1}{KW_m} + \frac{P}{W_m} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $P =$  ความดันดูดซับ  
 $W =$  น้ำหนักสารถูกดูดซับที่ดูดซับ  
 $K =$  ค่าคงที่แลงเมียร์

เมื่อเขียนกราฟสมการ  $\frac{P}{W}$  กับ  $P$  จะได้กราฟเส้นตรง โดยที่จุดตัดแกนคือ  $\frac{1}{KW_m}$  และมีความ

ชันเป็น  $\frac{1}{W_m}$  ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า  $W_m$  และ  $K$  ได้



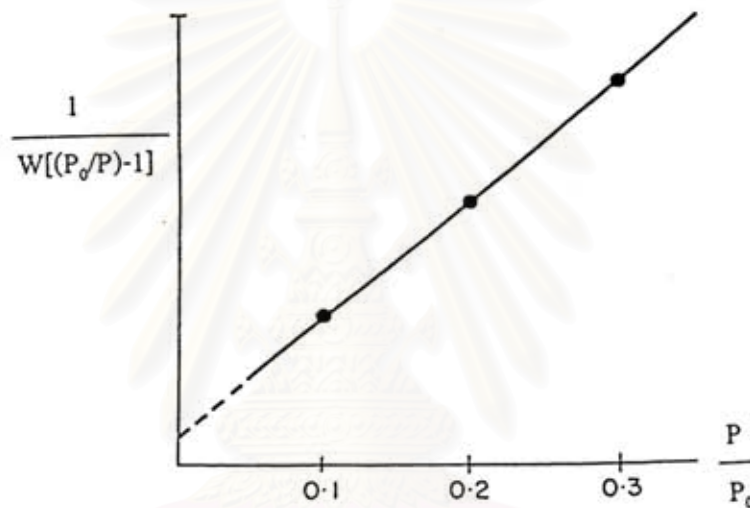
รูปที่ 3.15 กราฟแลงเมียร์

#### แบบจำลองการดูดซับของ BET

จะพิจารณาว่าโมเลกุลของแก๊สยังสามารถถูกดูดซับด้วยโมเลกุลที่ถูกพื้นที่ผิวดูดซับก่อนหน้านี้ไปแล้วได้ ดังนั้นก่อนที่พื้นที่ผิวของของแข็งจะถูกปกคลุมจนหมด จะมีชั้นของตัวถูกดูดซับหนาสองหรือมากกว่าสองชั้นขึ้นไปแล้ว ทฤษฎีของ BET นี้ ใช้ในการประมาณค่า  $W_m$  จากสมการที่ 3.4

$$\frac{1}{W[(P_0/P)-1]} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{W[(P_0/P)-1]}$  กับ  $\frac{P}{P_0}$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีจุดตัดแกนเป็น  $\frac{1}{W_m C}$  และมีความชันเป็น  $\frac{C-1}{W_m C}$



รูปที่ 3.16 กราฟ BET

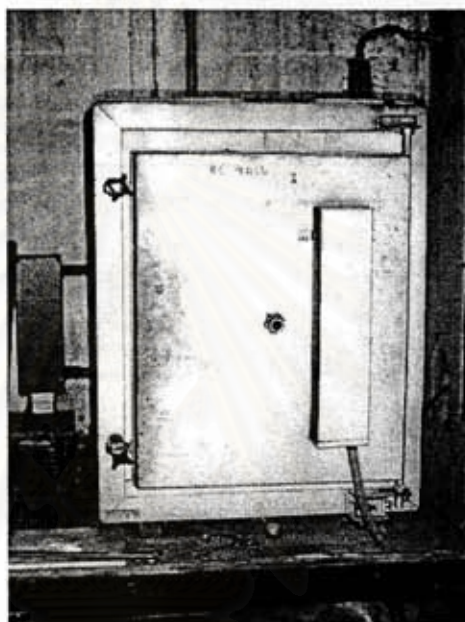
นอกจากนี้ยังสามารถทำสมการ BET ให้ง่ายขึ้นโดยการสมมติให้ค่า  $C$  มีค่าสูงมากจะได้สมการ BET ดังนี้

$$\frac{1}{W[(P_0/P)-1]} = \frac{P}{W_m P_0} \quad (3.6)$$

ซึ่งสามารถหาค่า  $W_m$  ได้ทันทีเมื่อทราบค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวเพียงจุดเดียว วิธีการนี้เรียกว่า "Single-point BET"

### 3.2.4 การหาอัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์

วัดเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เทียบกับน้ำหนักของสารก่อนเผา โดยการเตรียมผงซิลิกอนคาร์ไบด์ใส่ในถ้วยรองเผาที่ทำด้วยอะลูมินา ทำการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่  $800^{\circ}\text{C}$  –  $1,200^{\circ}\text{C}$  รักษาที่อุณหภูมินี้นาน 3 ชั่วโมง โดยใช้เตาไฟฟ้า Naber รุ่น N150/H จากประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.17 อัตราการให้ความร้อน เป็น  $2^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที หลังจากนั้นทำการคำนวณและนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อดูแนวโน้มของการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 3.17 เตาเผา

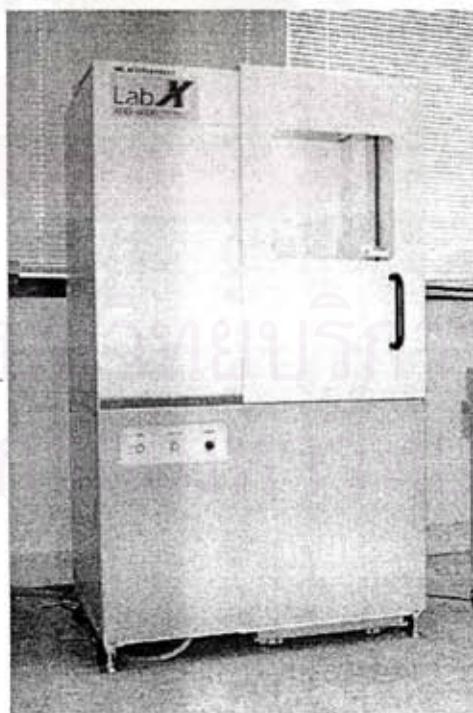
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้างโดยเครื่อง X-ray Diffractometer

ใช้เครื่อง X-ray Diffractometer ผลิตโดยบริษัท Shimadzu Corporation รุ่น XD-610 ดังรูปที่ 3.18 และ รุ่น XRD-6000 ดังรูปที่ 3.19 เตรียมตัวอย่างโดยอัดสารตัวอย่างให้แน่นบนแผ่นรอง แล้วนำไปวัดโดยใช้ช่วงมุม  $2\theta$  ตามที่กำหนด ศึกษาโครงสร้างจาก กราฟ XRD ที่บันทึกได้ เทียบกับ การ์ดมาตรฐาน JCPDS



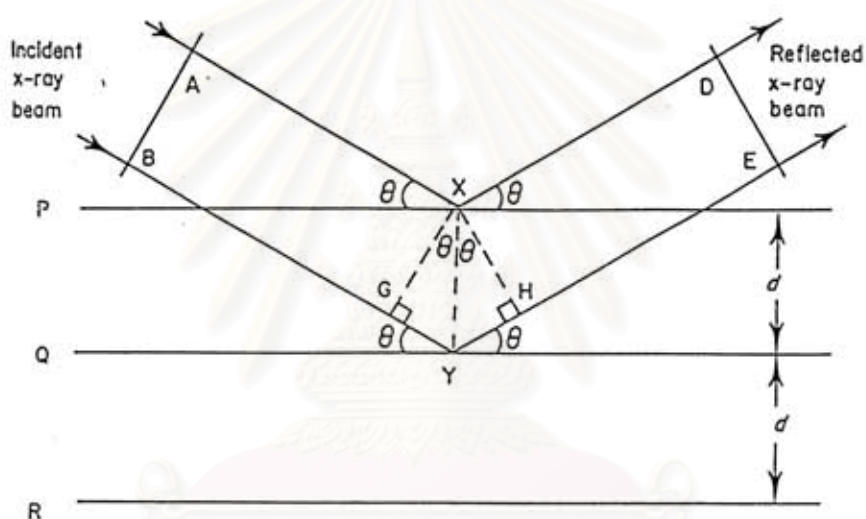
รูปที่ 3.18 เครื่อง XRD รุ่น XD - 610



รูปที่ 3.19 เครื่อง XRD รุ่น XRD - 6000

### X-ray Diffractometer (XRD)

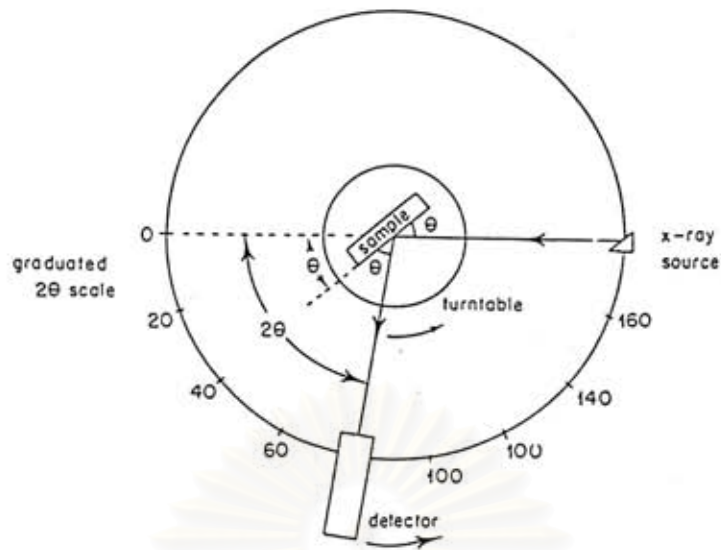
เครื่อง X-ray diffractometer <sup>(62)</sup> เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารเซรามิก โดยใช้รังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.5 – 2.5 อังสตรอม และมีพลังงานในช่วง 0.1-100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง ยิ่งไปกระทบบนวัสดุที่มุมต่างๆ และให้สัญญาณเป็น peak ออกมาเมื่อมุมที่รังสีเอกซ์ไปกระทบแล้วเป็นไปตามกฎของแบรค (Bragg 's Law) จากนั้นจึงนำ peak ที่ได้ มาวิเคราะห์หาโครงสร้างของสารตัวอย่าง การเกิด peak ในการวิเคราะห์สารด้วย เครื่อง X-ray Diffractometer ใช้หลักการเดียวกับการหักเหของแสง แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบบนผิววัสดุทำมุม  $\theta$

การวัดการหักเหของรังสีเอกซ์ด้วย diffractometer

สารตัวอย่างจะวางอยู่บนจานหมุน เมื่อหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ตัวจับ (detector) จะหมุนไปเป็นมุม  $2\theta$  และเมื่อการแทรกสอดเป็นไปตามกฎของแบรค รังสีเอกซ์จะถูกตรวจจับด้วยตัว detector ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หลักการเคลื่อนที่ของ diffractometer

Diffractometer จะถูกควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมในการสแกนที่พิกัดมุมต่างๆ ที่ต้องการได้

#### การเตรียมตัวอย่าง

สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง ทำได้โดยนำสารมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 50 (ขนาด 300 ไมโครเมตร) นำสารตัวอย่างที่บดแล้ว มาใส่ใน holder ซึ่งทำจากอะลูมิเนียม ที่ได้ผ่านการทำความสะอาดด้วยอะซิโตนมาแล้ว ปาดผิวหน้าให้เรียบ แล้วจึงนำไปเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer

#### การวิเคราะห์การหักเหของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์สารตัวอย่าง สามารถเปรียบเทียบกับ การ์ด JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งทำได้โดยการหาค่า d-spacing และค่า intensity ของ peak หลัก อย่างน้อย 3 peak



46-1045 \*

SiO <sub>2</sub>	dÅ	Int	hkl	dÅ	Int	hkl
Silicon Oxide	4.2550	16	100	1.1530	1	311
	3.3435	100	101	1.1407	<1	304
Quartz, syn	2.4569	9	110	1.1145	<1	303
	2.2815	8	102	1.0816	2	312
	2.2361	4	111	1.0638	<1	400
Rad. CuKα <sub>1</sub> λ 1.540598 Filter Ge Mono. d-sp Diff. Int. Diffractometer <i>V<sub>low</sub></i> 3.41	2.1277	6	200	1.0477	1	105
Cut off Ref. Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany, <i>ICDD Green-In-Aid</i> , (1993)	1.9799	4	201	1.0438	<1	401
	1.8180	13	112	1.0346	1	214
Sys. Hexagonal S.G. P3 <sub>2</sub> 21 (154)	1.8017	<1	003	1.0149	1	223
a 4.91344(4) b c 5.40324(8) A C 1.1001	1.6717	4	202	0.9896	<1	115
α β γ Z 3 mp	1.6592	2	103	0.9872	<1	313
Ref. Ibid.	1.6083	<1	210	0.9783	<1	304
	1.5415	9	211	0.9762	<1	320
D <sub>x</sub> 2.65 D <sub>m</sub> 2.66 SS/FOM Fw=539(.00231)	1.4529	2	113	0.9628	<1	321
noθ 1.544 gy 1.553 Sign + 2V	1.4184	<1	300	0.9285	<1	410
Ref. Swanson, Fayat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 3 24 (1954)	1.3821	6	212	0.9182	<1	322
Color White	1.3750	7	203	0.9161	2	403
Integrated intensities. Pattern taken at 22(1) C. Low temperature quartz. 2θ determination based on profile fit method. O <sub>2</sub> Si type. Quartz group. Silicon used as internal standard. PSC: hP9. To replace 33-1161. Structure reference: Z. Kristallogr., 198 177 (1992).	1.3719	5	301	0.9152	2	411
	1.3579	2	104	0.9089	<1	224
	1.3559	2	302	0.9009	<1	006
	1.2283	1	220	0.8972	<1	215
	1.1998	2	213	0.8889	1	314
	1.1978	<1	321	0.8814	<1	106
	1.1840	2	114	0.8782	<1	412
See following card.	1.1502	2	310	0.8598	<1	305

รูปที่ 3.22 การ์ด JCPDS

### 3.3 การเตรียมสเลอรี

การทดลองเตรียมสเลอรีของซิลิกอนคาร์ไบด์มีการเติมตัวเติมชนิดต่างๆไปด้วย เพื่อช่วยในยึดเกาะขณะขึ้นรูปและลดอุณหภูมิซินเทอริง ชนิดของตัวเติมที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ อะลูมิเนียมฟอสเฟต ซิลิกา และดิน ทดลองใช้ปริมาณของซิลิกาเป็น ร้อยละ 0.3 ถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมฟอสเฟตปริมาณร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และดิน ปริมาณร้อยละ 3.5 ถึง ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของสเลอรีซิลิกอนคาร์ไบด์

สูตร	ซิลิกอนคาร์ไบด์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	อะลูมิเนียมฟอสเฟต (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ซิลิกา (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ดิน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
A1	89	10	1	-
B1	89.5	10	0.5	-
B2	94	5.5	0.5	-
B3	96.7	2.8	0.5	-
A1C1	85.7	9.9	0.9	3.5
A1C2	75.5	8.7	0.8	15
A1C3	65.7	7.5	0.7	26

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ส่วนผสมของสเลอรีซิลิกอนคาร์ไบด์

สูตร	ซิลิกอนคาร์ไบด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อะลูมิเนียมฟอสเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซิลิกา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ดิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
B1C1	86.2	9.9	0.4	3.5
B1C2	75.9	8.7	0.4	15
B1C3	66.1	7.6	0.3	26
E1	93.3	2.7	-	4
E2	81.6	2.4	-	16
E3	70	2	-	28
F3	71	1	-	28
S3	72	-	-	28

หลังจากนั้นทดลองเติมทลคัมเพื่อช่วยให้เกิดเฟสที่มีจุดหลอมตัวต่ำ (คอเดียวไรต์) เชื่อมระหว่างอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่ามีการยึดเกาะกันได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเลือกจากสูตร E2 มาทำการเติมทลคัมลงไปเป็นปริมาณ ร้อยละ 5 ร้อยละ 7.5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และทดลองใช้ทลคัมทั้ง 2 ชนิด ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของสเลอรีซิลิกอนคาร์ไบด์

สูตร	E2T1	E2T2	E2T3	E2TT1	E2TT2	E2TT3
ซิลิกอนคาร์ไบด์	77.7	75.3	72.9	77.7	75.3	72.9
อะลูมิเนียมฟอสเฟต	2.3	2.2	2.1	2.3	2.2	2.1
ดิน	15	15	15	15	15	15
ทลคัมชนิดที่ 1	5	7.5	10	-	-	-
ทลคัมชนิดที่ 2	-	-	-	5	7.5	10

หลังจากนั้นทดลองเปลี่ยนชนิดของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้ โดยเตรียมเป็นส่วนผสมตามสูตร E2T3 ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 ชนิด คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ส่วนผสมที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ต่างชนิดกัน แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของซีลิกอนคาร์ไบด์ชนิดต่างๆในสเลอร์

สูตร	ซีลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซีลิกอนคาร์ไบด์ 320 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซีลิกอนคาร์ไบด์ 200 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
S	100	-	-
SG	50	50	-
G	-	100	-
GH	-	50	50
H	-	-	100

## 3.4 การขึ้นรูปและการเผาซินเทอร์ริง



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานซีลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุน

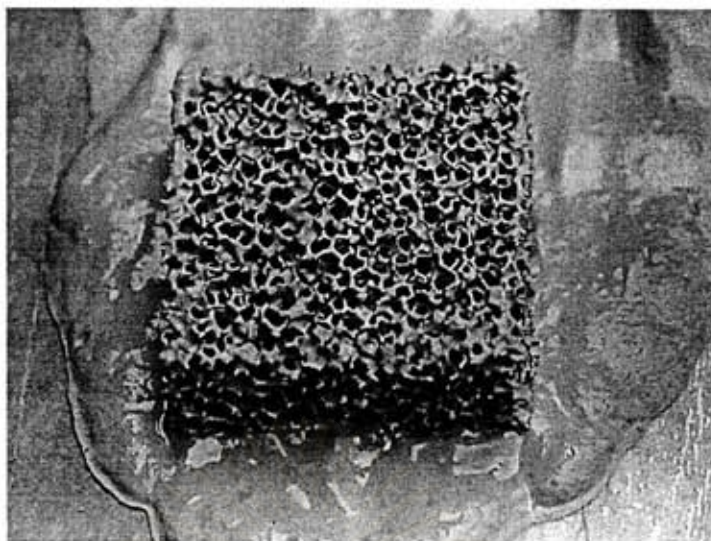
กระบวนการขึ้นรูปและเผาซินเทอร์ริง แสดงดังรูปที่ 3.23 ในการทดลองนี้เตรียมสเลอรีของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีปริมาณของแข็งตั้งแต่ร้อยละ 65 ถึงร้อยละ 75 ให้ได้ความหนืดประมาณ 18 พอยซ์แล้ว จากนั้นนำฟองน้ำขนาด กว้าง 5 เซนติเมตร และ ยาว 5 เซนติเมตร จุ่มลงไปในสเลอรี หลังจากสเลอรีแทรกเข้าไปตามรูพรุนของฟองน้ำแล้ว ก็นำฟองน้ำขึ้นมาวางบนแผ่นกระจกแบบเรียบ ใช้วัสดุทรงกระบอกริดสเลอรีส่วนเกินออกไป ขั้นตอนการกำจัดสเลอรีส่วนเกินออกแสดงดังรูปที่ 3.24 - รูปที่ 3.26



รูปที่ 3.24 ฟองน้ำที่มีสเลอรีของซิลิกอนคาร์ไบด์อยู่เต็ม



รูปที่ 3.25 การริดสเลอรีส่วนเกินออกจากฟองน้ำ



รูปที่ 3.26 ฟองน้ำที่ผ่านการกำจัดสเลอรี่ส่วนเกินแล้ว

นำชิ้นงานไปอบแห้ง ในเตาอบ IABAI รุ่น SPHH-100 ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาชั่งน้ำหนัก และวัดขนาด หลังจากนั้นนำไปเข้าเผาที่อุณหภูมิ  $1200^{\circ}\text{C}$  โดยใช้อัตราการให้ความร้อน  $2^{\circ}$  ต่อนาที และรักษาอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทดลองแปรค่าเวลาในการรักษาอุณหภูมิไว้ เป็น 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง และทดลองแปรค่าอุณหภูมิในการเผา จาก  $1200^{\circ}\text{C}$  เป็น  $1250^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.27 เตาอบ

### 3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของชิ้นงานหลังเผา

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดออกซิเดชัน ดังนั้นจึงมีการคำนวณหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบกับน้ำหนักก่อนเผา ดังสมการที่ 3.7

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \frac{\text{น้ำหนักหลังเผา} - \text{น้ำหนักก่อนเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \times 100 \quad (3.7)$$

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยเครื่อง SEM ใช้กำลังขยายต่างๆกัน สังเกตลักษณะของชิ้นงานหลังเผา และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในชิ้นงานโดยเครื่อง EDS และนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วมาบด เตรียมตัวอย่างใส่ในแผ่นรอง และทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่อง XRD

สำหรับค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะหาโดยวิธีการแทนที่น้ำ (อาร์คิมิดีส) เพื่อคำนวณหาค่า Apparent Density ดังสมการที่ 3.8

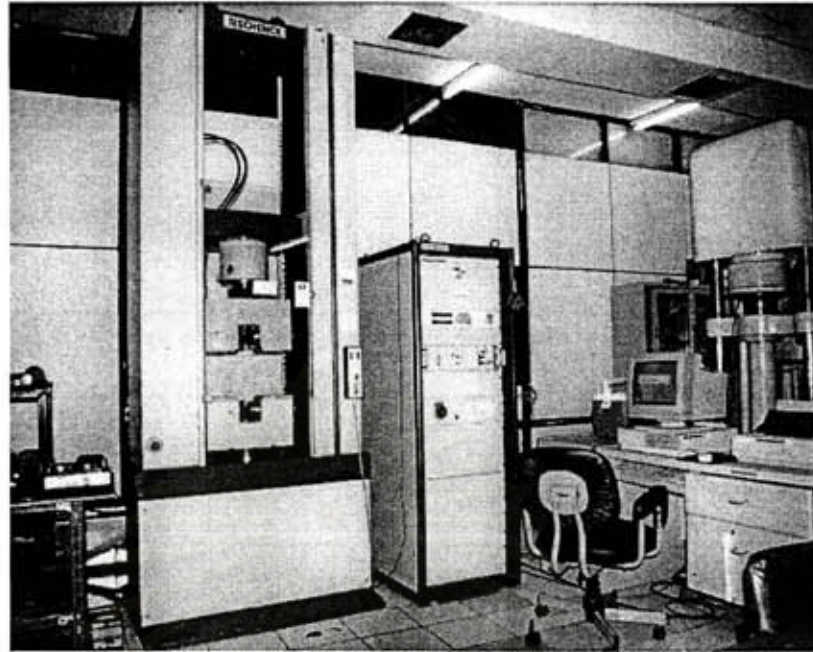
$$\text{Apparent Density} = \frac{D}{D - I} \quad (3.8)$$

D = น้ำหนักแห้ง

I = น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ

### 3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ความทนแรงอัด (compressive strength) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Electromechanical testing machine รุ่น RSA250 ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ทดสอบโดยการนำชิ้นงานมาวางบนแผ่นรองใช้น้ำหนักกด 5 ตัน ความเร็วของน้ำหนักกด 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที อ่านค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องหน่วยเป็น กิโลนิวตัน แล้วนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณเป็นค่าความทนแรงอัดในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าประมาณ 14.19 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)



รูปที่ 3.28 เครื่อง Electromechanical testing machine

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์วัดจุดดับ

วัดจุดดับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 จากบริษัท Lonza ประเทศเยอรมัน ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จากประเทศนอร์เวย์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 64 – 66 จากบริษัท Fluka กรดฟอสฟอริก ความบริสุทธิ์ร้อยละ 85 จากบริษัท Merck ดิน จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ประเทศไทย และทัลคัม 2 ชนิด คือ ทัลคัมชนิดที่ 1 จากจังหวัดอุดรธานี และทัลคัมชนิดที่ 2 จากบริษัทคอมพาวด์เคลย์ ประเทศไทย

##### 4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution)

ผลของการกระจายขนาดอนุภาคของวัดจุดดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



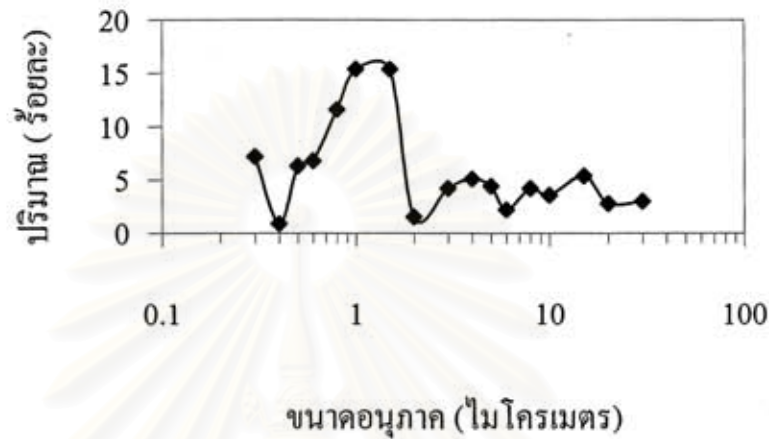
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



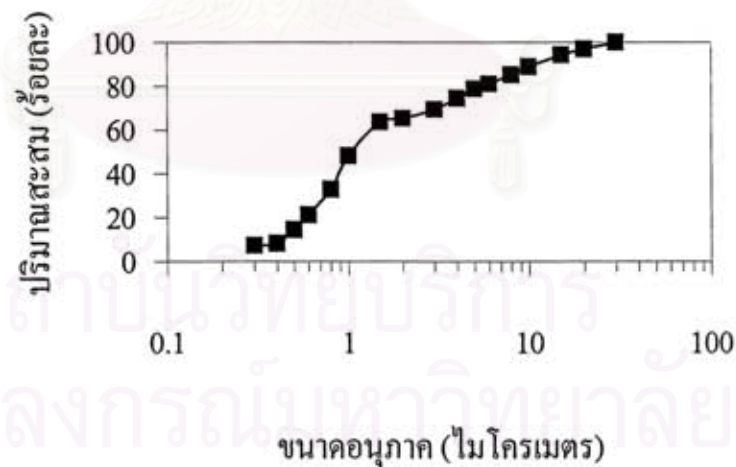
ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุคิบชนิดต่างๆ

ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ปริมาณสะสม (ร้อยละ)					
	SiC UF-15	SiC 320	SiC 200	ดิน	ทลคัม 1	ทลคัม 2
<150	-	100	100	-	-	-
<106	-	99.98	99.75	-	-	-
<75	-	99.86	82.54	-	-	-
<60	-	-	-	100	100	100
<50	-	-	-	98.3	97.9	96.6
<45	-	99.71	17.81	-	-	-
<40	-	-	-	95.7	95.2	92.1
<30	100	-	2.42	91.3	90.5	84.3
<20	97	-	0.52	82.1	80.9	68.4
<15	94.2	13.76	-	73.2	71.6	54.8
<10	88.8	-	-	59.6	57.3	37.1
<8	85.2	-	-	52.8	47.9	30
<6	81	-	-	42.9	33.1	20.9
<5	78.8	-	-	36	23.7	15.8
<4	74.4	-	-	29.4	14.2	10.4
<3	69.3	-	-	24.3	9.3	7.5
<2	65.1	-	-	15.8	3.9	4.4
<1.5	63.6	-	-	11.5	2.2	2.9
<1	48.2	-	-	7.3	1.3	1.8
<0.8	32.8	-	-	5.8	1.1	1.5
<0.6	21.2	-	-	4.5	1	1.3
<0.5	14.4	-	-	3.9	-	-
<0.4	8.1	-	-	3.3	-	-
<0.3	7.2	-	-	2.8	-	-

ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 มีการกระจายขนาดอนุภาคเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า 3 ไมโครเมตร และกลุ่มที่มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมโครเมตร โดยที่อนุภาคส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 1 - 2 ไมโครเมตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) เป็น 1.06 ไมโครเมตร กราฟการกระจายขนาดอนุภาคแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

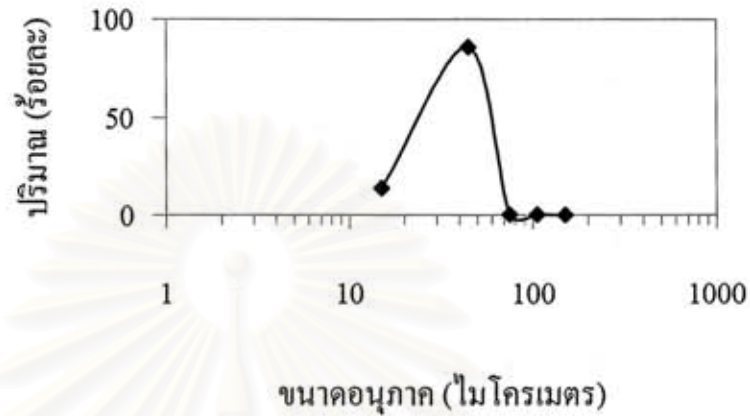


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15

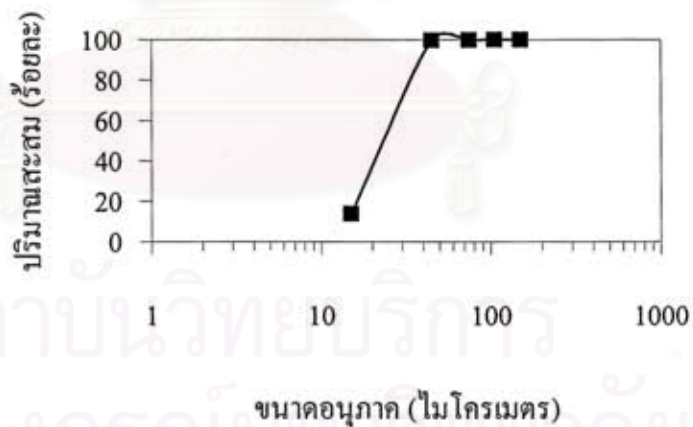


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15

ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 15 - 45 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) เป็น 26 ไมโครเมตร กราฟการกระจายขนาดอนุภาคแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

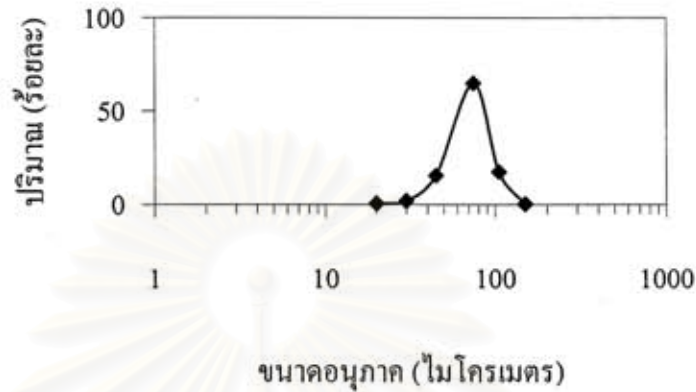


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320

ซีลิกอนคาร์ไบด์ 200 มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 45 - 75 ไมโครเมตร โดย  
มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) เป็น 60 ไมโครเมตร กราฟการกระจายขนาดอนุภาคแสดงใน  
รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



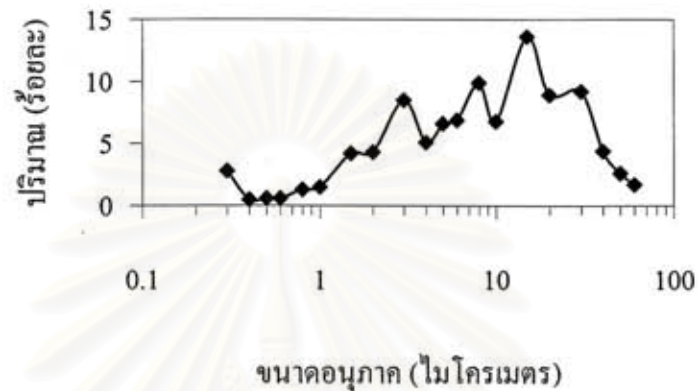
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซีลิกอนคาร์ไบด์ 200



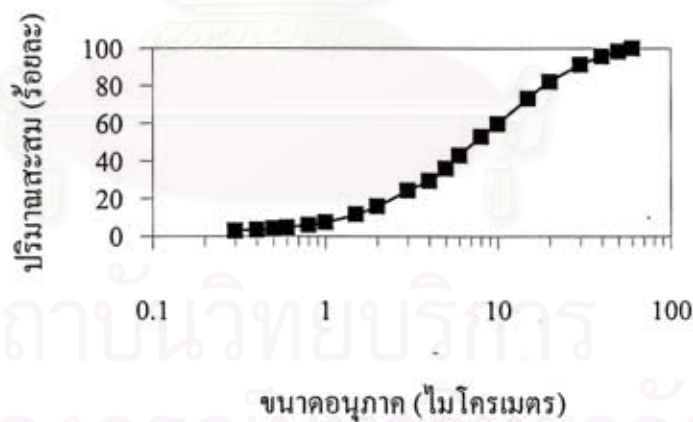
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของซีลิกอนคาร์ไบด์ 200

จะเห็นได้ว่า ทั้ง ซีลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซีลิกอนคาร์ไบด์ 200 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น  
26 ไมโครเมตร และ 60 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดแตกต่างกับ ซีลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran  
UF-15 ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 1.06 ไมโครเมตร ผลของขนาดอนุภาคเหล่านี้ จะสอดคล้องกับค่า  
พื้นที่ผิว และอัตราการเกิดออกซิเดชัน ที่จะกล่าวต่อไป

ดิน มีการกระจายขนาดอนุภาคเป็นหลายกลุ่ม ทั้งนี้เนื่องจากดินที่ใช้ในการทดลองเป็นเนื้อดินที่เตรียมจากส่วนผสมของแร่และดินหลายประเภท จึงทำให้การกระจายขนาดอนุภาคเกิดเป็นหลายกลุ่ม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) เป็น 7.46 ไมโครเมตร กราฟการกระจายขนาดอนุภาคแสดงในรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8

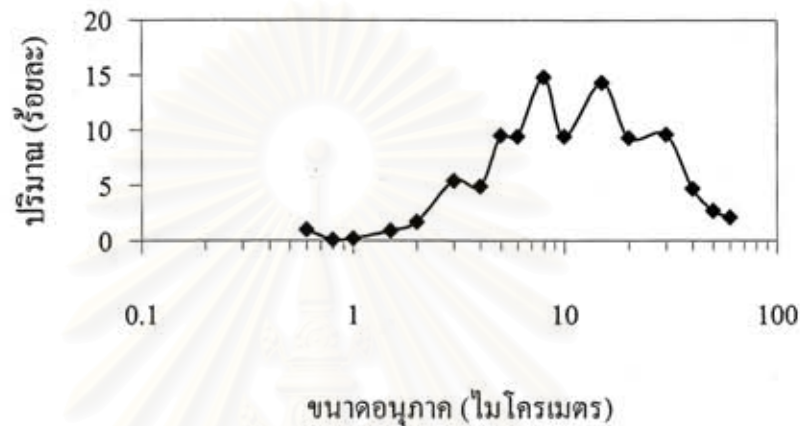


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของดิน

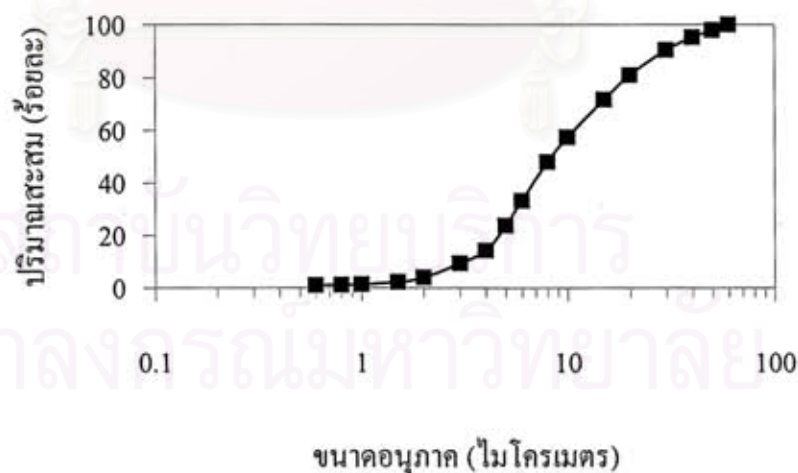


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของดิน

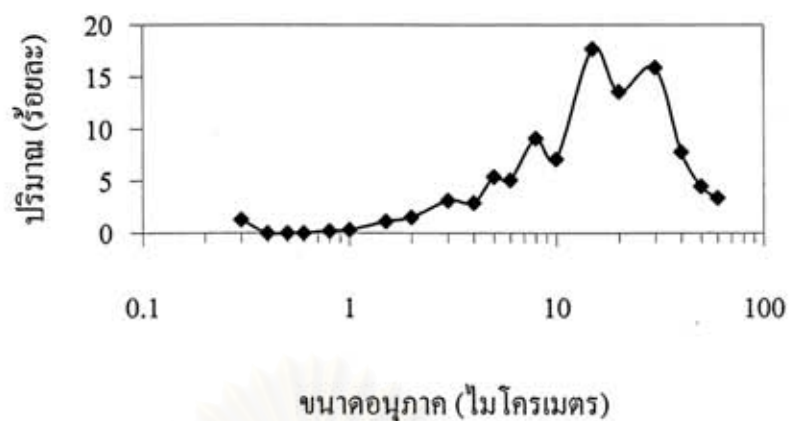
ทลคัมทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีการกระจายขนาดอนุภาคเป็นหลายกลุ่มเช่นเดียวกับดิน ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน โดยการสังเกตลักษณะอนุภาคของทลคัมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ร้อยละ 50 ( $d_{50}$ ) ของทลคัมชนิดที่ 1 และ ทลคัมชนิดที่ 2 มีค่าเป็น 8.45 ไมโครเมตร และ 13.64 ไมโครเมตร ตามลำดับ กราฟการกระจายขนาดอนุภาคของทลคัมทั้ง 2 ชนิดแสดงในรูปที่ 4.9 - รูปที่ 4.12



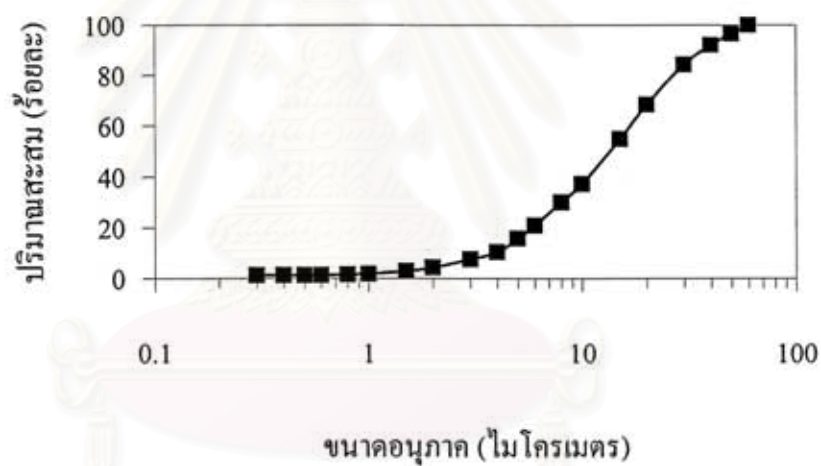
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของทลคัมชนิดที่ 1



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของทลคัมชนิดที่ 1



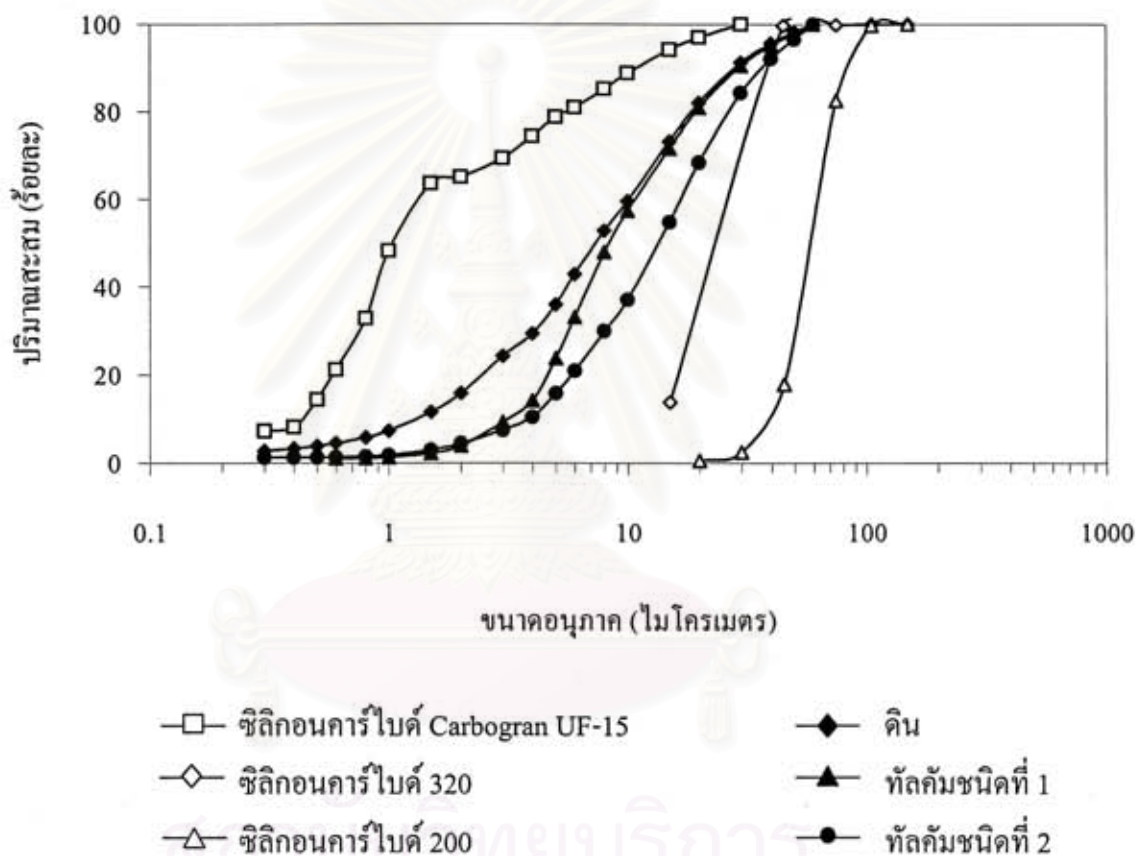
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของทัลคัมชนิดที่ 2



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของทัลคัมชนิดที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำเส้นกราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุบิชนิดต่างๆมารวมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะพบว่า ถ้าเป็นสูตรที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 การกระจายขนาดอนุภาคของส่วนผสมจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์จะมีขนาดเล็ก โดยที่อนุภาคของดินและทลคัมจะมีขนาดใหญ่กว่า และมีการกระจายของขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน สำหรับในสูตรที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จะพบว่ามีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน โดยที่ซิลิกอนคาร์ไบด์จะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า อนุภาคของดินและทลคัม และถ้าใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 จะพบว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับดินและทลคัม

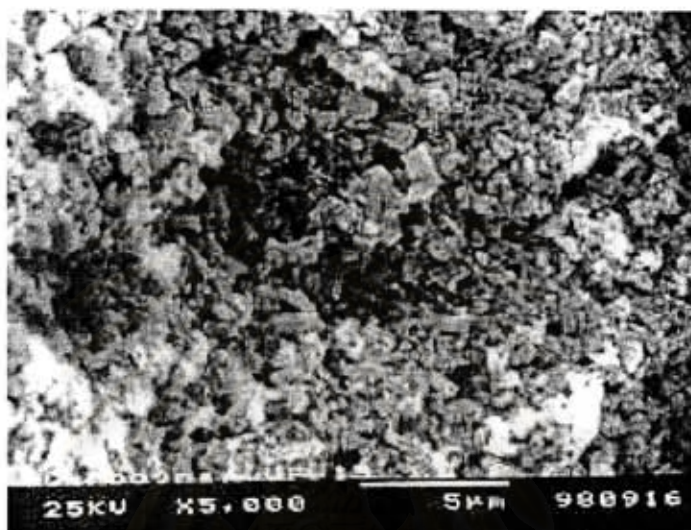


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบสะสมของวัตถุบิชนิดต่างๆ

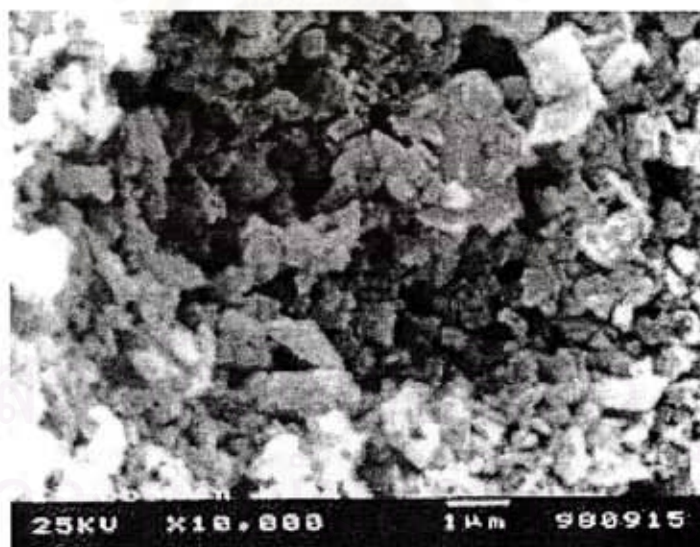


#### 4.1.2 ลักษณะอนุภาคของวัตุดิบ

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของวัตุดิบ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผงซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแหลมคม มีรูปร่างหลายแบบและเกาะกันอยู่เป็นกลุ่ม ขนาดอนุภาคที่สังเกตได้จากภาพถ่าย ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงประมาณ 1 - 3 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลของการกระจายขนาดอนุภาคที่ได้กล่าวไปแล้ว



(ก)



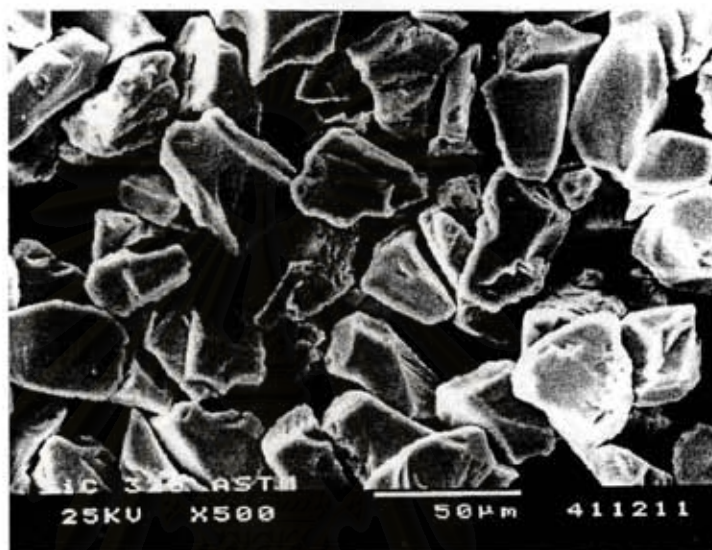
(ข)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ  
ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15

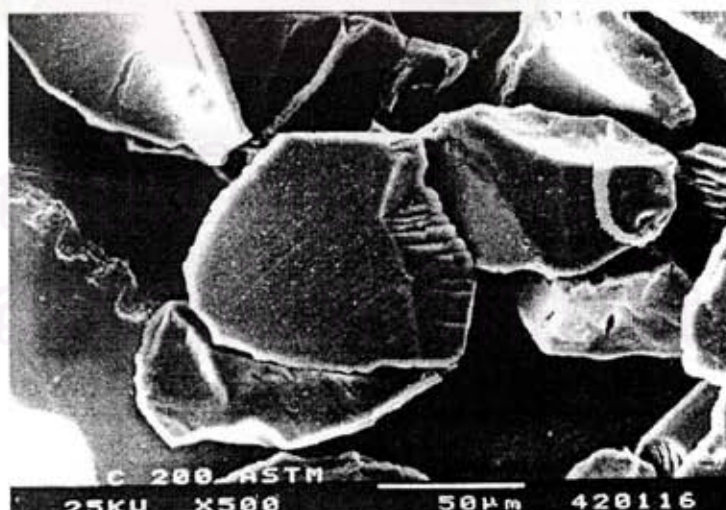
(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

ลักษณะอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะคล้ายกันคือ อนุภาคเป็นเหลี่ยมแหลมคมและมีอยู่หลายรูปทรง ขนาดอนุภาคที่สังเกตได้จากภาพถ่ายก็จะสอดคล้องกับผลของการกระจายขนาดอนุภาคที่ได้กล่าวไปแล้ว คือมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 15 - 45 ไมโครเมตร และ 45 - 75 ไมโครเมตร ตามลำดับ

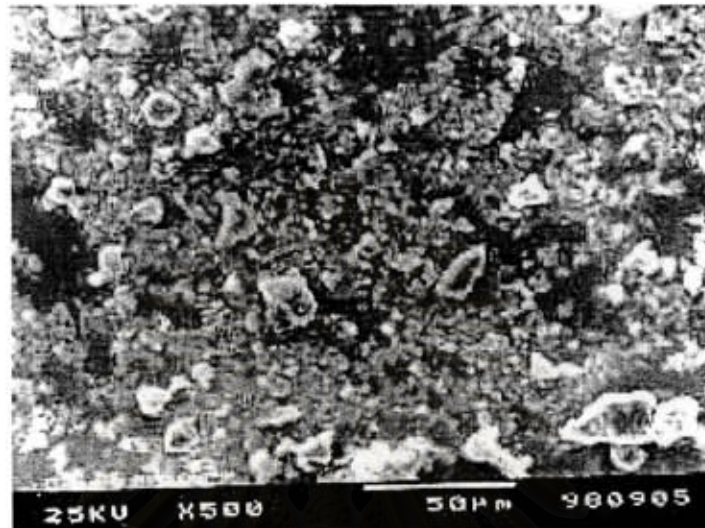


รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

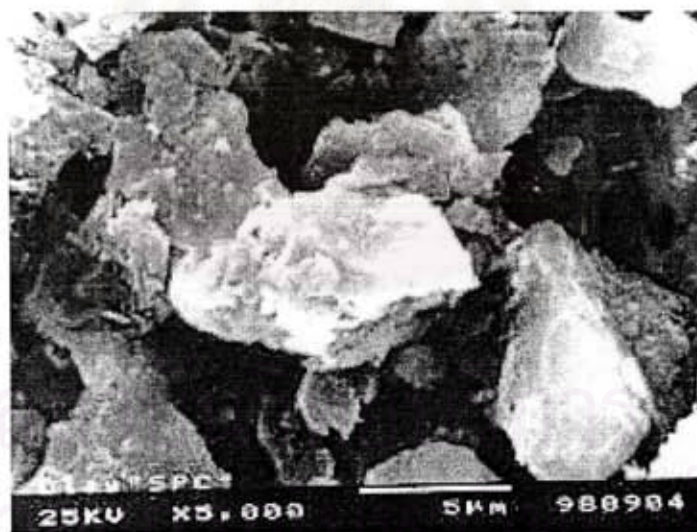


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้  
 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าอนุภาคของดินจะเกาะกันอยู่เป็นก้อน ทำให้มีอยู่หลายรูปทรง  
 ขนาดที่สังเกตได้จากภาพถ่ายจะอยู่ในช่วงประมาณ 2 - 8 ไมโครเมตร



(ก)



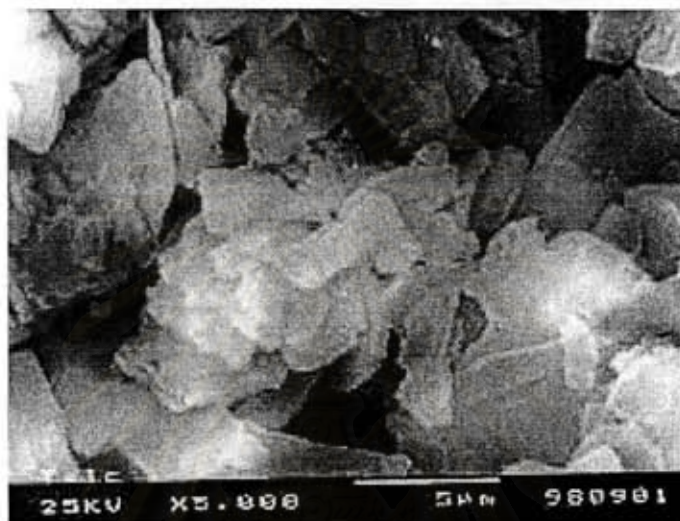
(ข)

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดิน

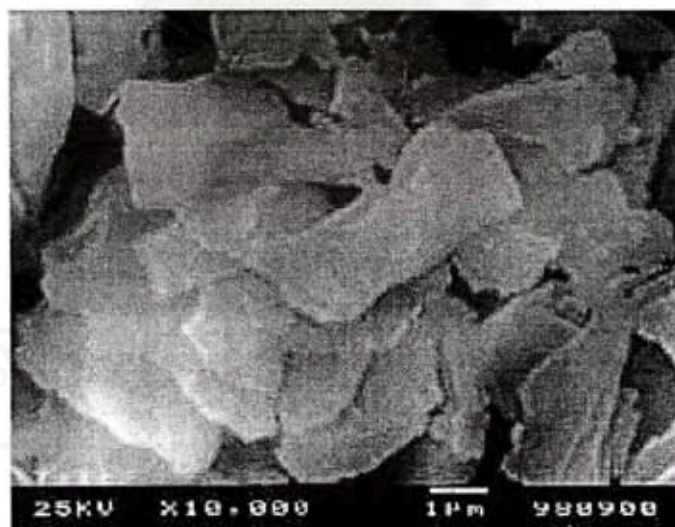
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า

ลักษณะอนุภาคของທັດຄັ້ມທັ້ງ 2 ຫນົດ ສັ້ງເກດໂດຍຖ່າຍຈາກກ້ອ້ງຈຸລທຣຣສນ໌ອີເລັກຕຣອນ ແບບສ່ອ້ງກຣາດ ຈະພົບວ່າມີລັກຊະນະຄ້າຍທັ້ນ ຄື ເປັນແຜ່ນບາງໆ ຈ້ອນກັນອຸ່ງເປັນຂັ້ນໆ ຈັ້ງເມື່ອເປື່ອຍ ຫື່ຍພາບຖ່າຍຂອງທັດຄັ້ມທັ້ງ 2 ຫນົດ ຈະພົບວ່າທັດຄັ້ມຫນົດທີ່ 1 ດັ້ງເສດຈຳນວນທີ່ 4.18 ຈະມີຂະໜາດອນຸກາດ ເລັກກວ່າ ທັດຄັ້ມຫນົດທີ່ 2 ດັ້ງເສດຈຳນວນທີ່ 4.19 ຈັ້ງເປັນຜົນທີ່ສອດຄ້ອ້ງກັບຜົນຂອງການກະຈາຍຂະໜາດ ອນຸກາດທີ່ໄດ້ຄ່າວ່າໄປແລ້ວຄືທັດຄັ້ມຫນົດທີ່ 1 ມີຂະໜາດອນຸກາດເລັ້ຍປຣະມານ 8.45 ໄມໂຄຣເມຕຣ ແລະ ທັດຄັ້ມຫນົດທີ່ 2 ມີຂະໜາດອນຸກາດເລັ້ຍປຣະມານ 13.64 ໄມໂຄຣເມຕຣ



(ก)

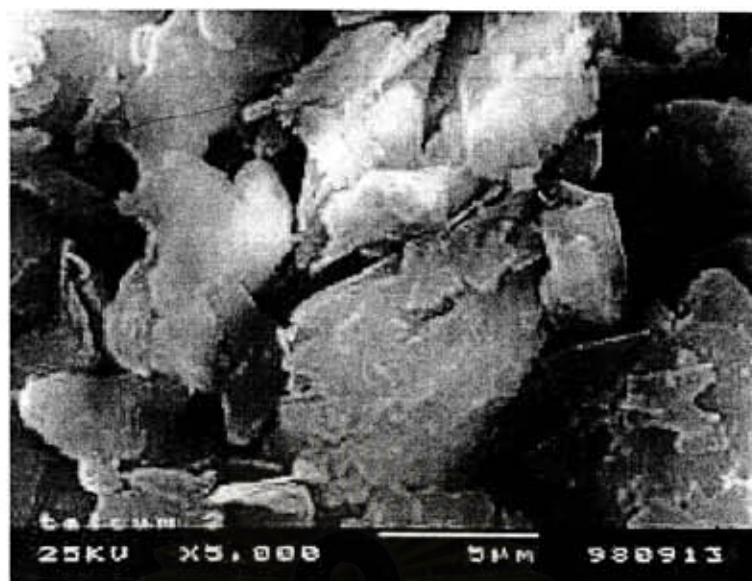


(ข)

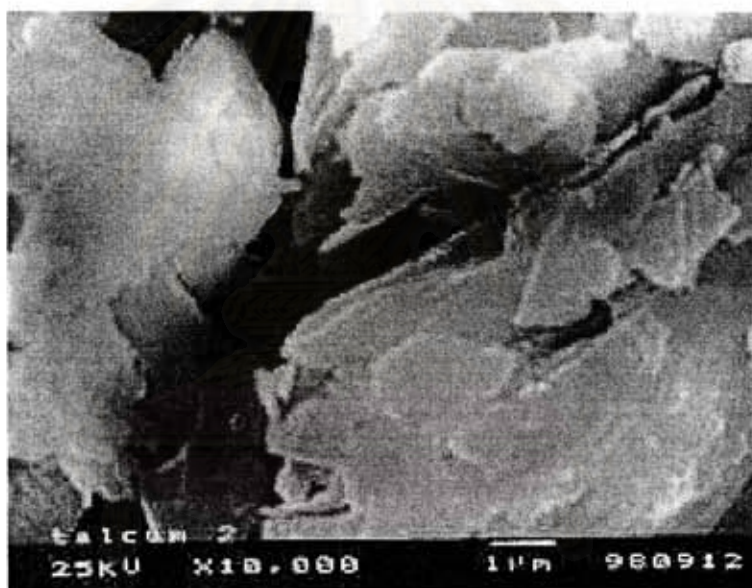
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของທັດຄັ້ມຫນົດທີ່ 1

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทัลคัมชนิดที่ 2  
 (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า  
 (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.1.3 พื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์

ค่าพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ 3 ชนิด คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์

สาร	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15	13.14
ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320	0.3206
ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200	0.1134

ค่าพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 มีค่ามากที่สุดคือ 13.14 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จะมีพื้นที่ผิวเป็น 0.3206 และ 0.1134 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากและซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

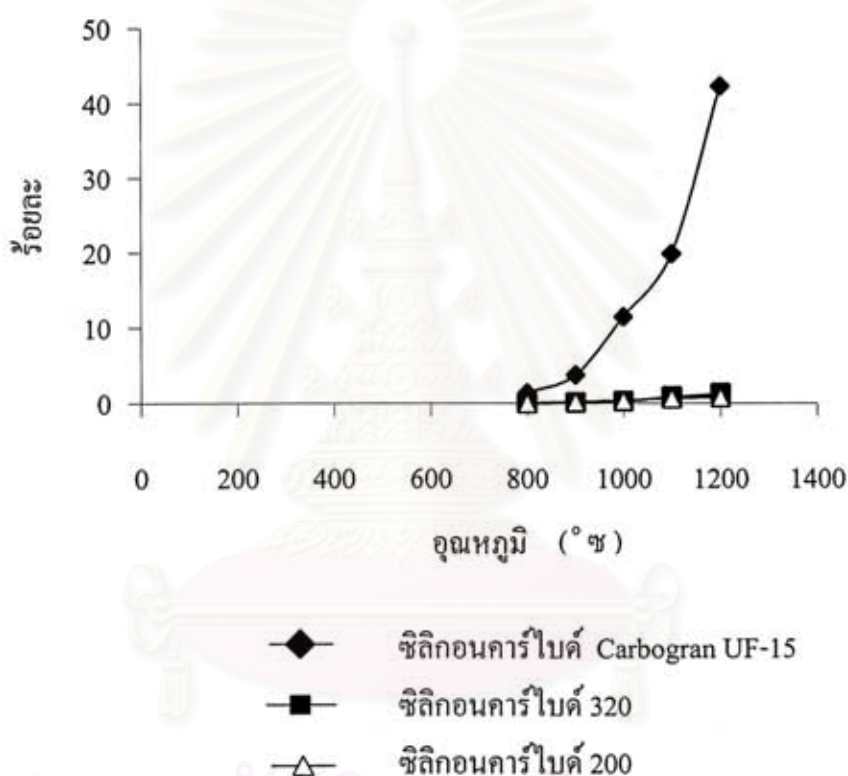
ค่าพื้นที่ผิวของซิลิกอนคาร์ไบด์นี้ จะมีผลต่อสมบัติหลังเผา คือการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีพื้นที่ผิวมาก จะมีโอกาสเกิดออกซิเดชันได้มากกว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวซึ่งจะสัมผัสกับอากาศได้มากกว่านั่นเอง

#### 4.1.4 อัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์

อัตราการเกิดออกซิเดชันของสารซิลิกอนคาร์ไบด์ ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการเผาตั้งแต่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  -  $1200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์

อุณหภูมิ / ชนิด	800 °ซ	900 °ซ	1000 °ซ	1100 °ซ	1200 °ซ
Carbogran UF-15	1.38 %	3.76 %	11.5 %	29.93 %	42.5 %
SiC 320	0.019 %	0.097 %	0.24 %	0.86 %	1.3 %
SiC 200	0.028 %	0.208 %	0.377 %	0.687 %	0.8 %



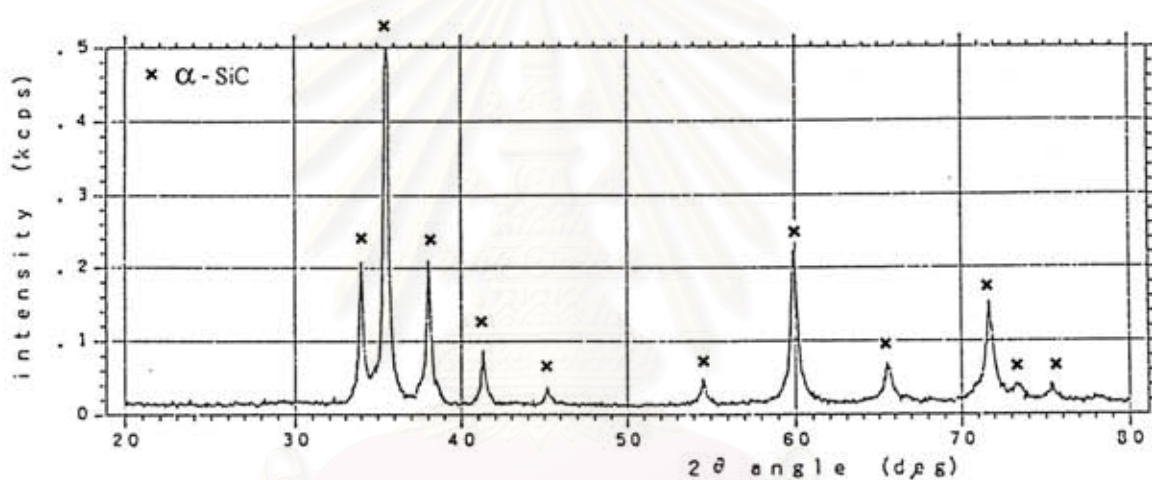
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดออกซิเดชันกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 จะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้ดังที่กล่าวไปแล้วว่า อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก เมื่อผ่านการเผาจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูงกว่า ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ซึ่งมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

การเกิดออกซิเดชันของซิลิกอนคาร์ไบด์นี้ จะมีผลต่อสมบัติหลังเผาของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุน คือ จะทำให้บริเวณผิวของชิ้นงาน มีลักษณะคล้ายเนื้อแก้ว ซึ่งจะทำให้มีสมบัติเชิงกลด้อยลง รวมถึงในการทดสอบการใช้งานจริงด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

#### 4.1.5 ลักษณะโครงสร้าง โดย X-ray Diffractometer (XRD)

เมื่อนำผงซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 มาวิเคราะห์โดย X-ray diffractometer พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ดังแสดงในรูปที่ 4.21

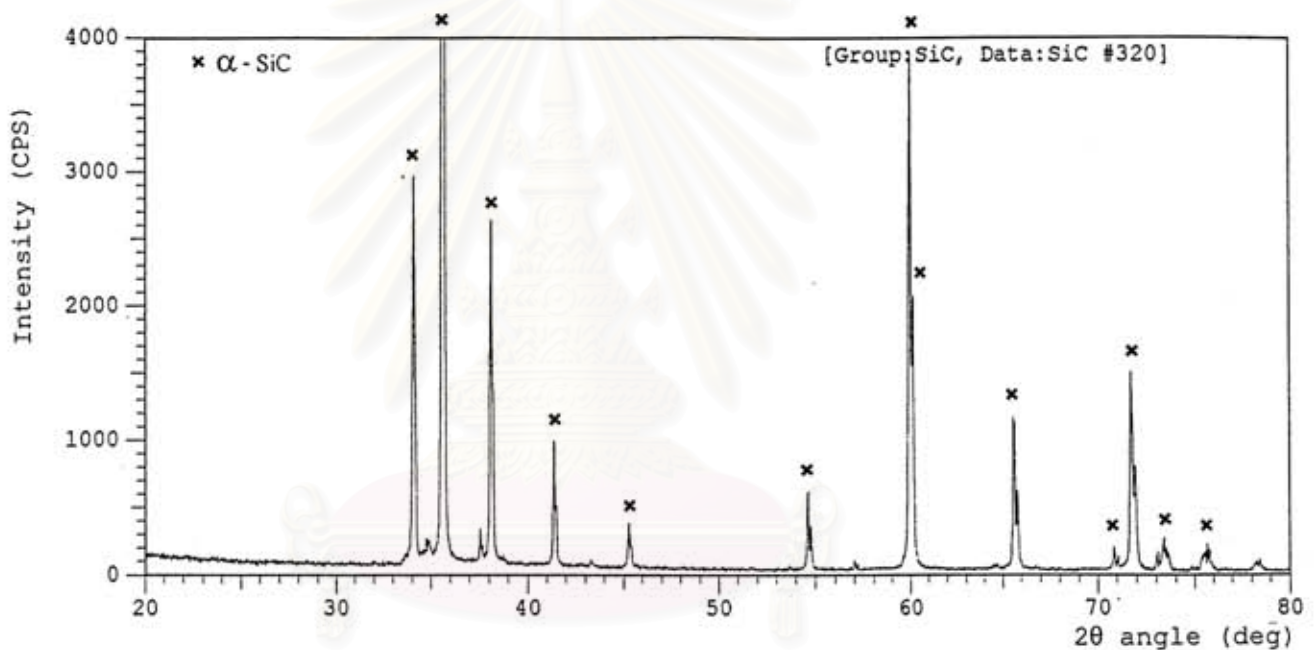


รูปที่ 4.21 กราฟ XRD ของ ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



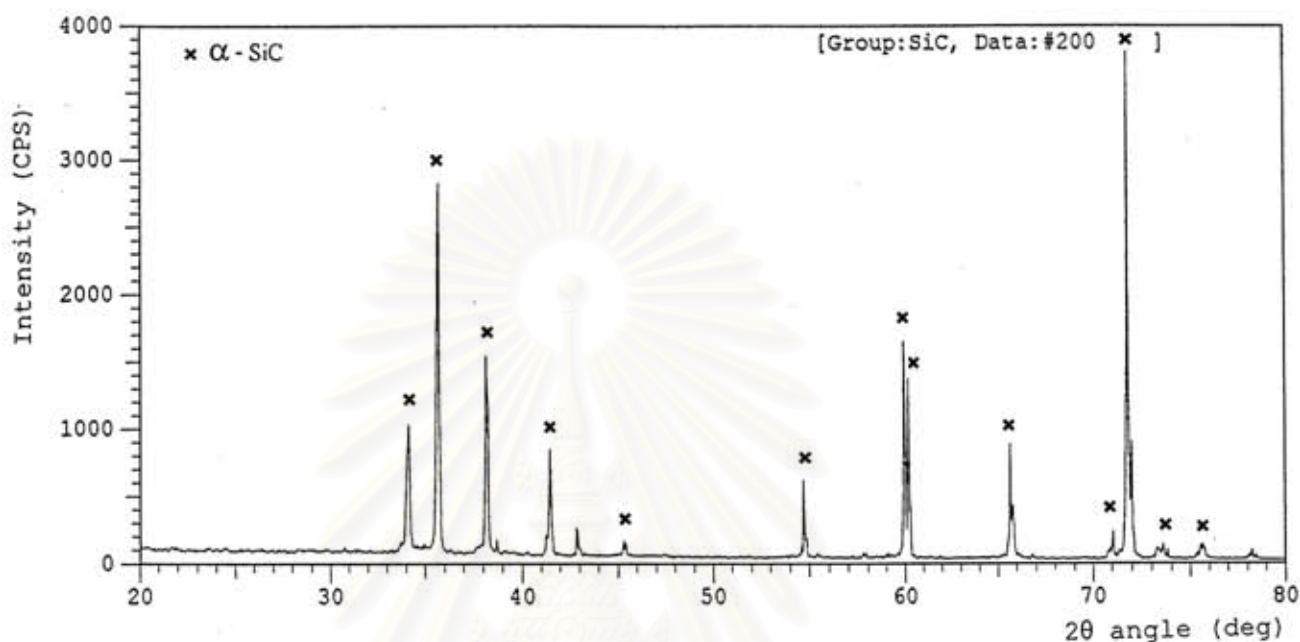
การวิเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ด้วย X-ray diffractometer พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยมีโครงสร้างทั้งที่เป็นแบบเฮกซะโกนอลและรอมโบฮีดรอล ผสมกันอยู่ ซึ่งจะสังเกตได้จากที่ค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 35 องศา พบ peak ที่มี intensity สูงที่สุด ซึ่งตรงกับการ์คมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 29-1131 และ การ์คมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 39-1196 ในขณะที่ค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 60 องศา จะประกอบด้วย peak 2 peak รวมกันอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งตรงกับการ์คมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 39-1196 ที่มีค่า intensity เป็น 86 แสดงว่าเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล และจากการ์คมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 29-1131 ที่มีค่า intensity เป็น 35 แสดงว่าเป็นซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ส่วน peak อื่น ๆ พบว่าเกิดที่มุมที่ใกล้เคียงกัน กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320

สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ด้วย X-ray diffractometer พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ประกอบด้วยทั้งโครงสร้างที่เป็นเฮกซะโกนอลและรอมโบฮีดรอล กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200

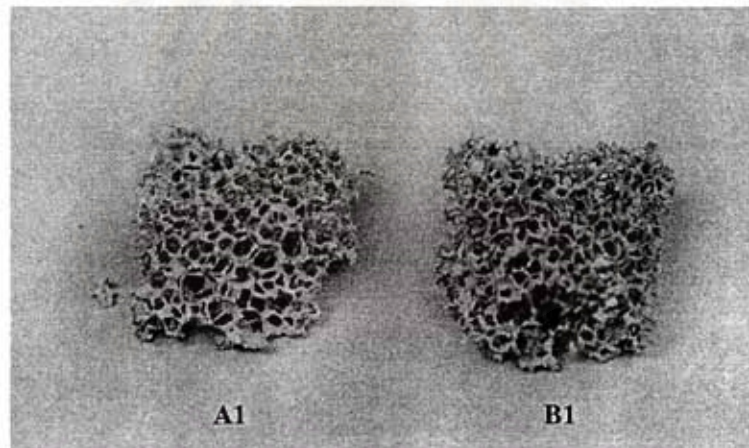
จากรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าที่ค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 72 องศา peak ที่เกิดขึ้นมีค่า intensity สูงมากกว่า peak ที่มีค่า intensity 100 ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 มีขนาดอนุภาคใหญ่และอาจเกิดการจัดเรียงตัวของผลึก (orientation) ทำให้มีผลต่อ intensity ของ peak ที่วิเคราะห์โดย XRD เมื่อทำการทดลองศึกษาผลของขนาดอนุภาค โดยการนำซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ค้างบนตะแกรงร่อนเบอร์ 200 และที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 มาวิเคราะห์โดย XRD ลักษณะกราฟ XRD แสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ในภาคผนวก ก จะพบว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ค้างอยู่บนตะแกรงร่อนเบอร์ 200 จะมีรูปแบบเป็นเฮกซะโกนอล ตามการวัดมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 29-1131 มากกว่ารูปแบบที่เป็นรอมโบฮีดรอล ตามการวัดมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 39-1196 โดยที่ peak ที่เกิดขึ้นที่ค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 72 องศา จะมี intensity สูงกว่า peak ที่เกิดขึ้นที่ค่ามุมประมาณ 60 องศา ส่วนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 พบว่าจะมีรูปแบบเป็นรอมโบฮีดรอลมากกว่าเฮกซะโกนอล โดยสังเกตได้จาก peak ที่เกิดขึ้นที่ค่ามุม  $2\theta$  ประมาณ 60 องศา ซึ่งจะมีค่า intensity สูงกว่า peak ที่เกิดขึ้นที่ค่ามุม ประมาณ 72 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ดังรูปที่ 4.22

## 4.2 ผลการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนโดยวิธี Polymeric sponge

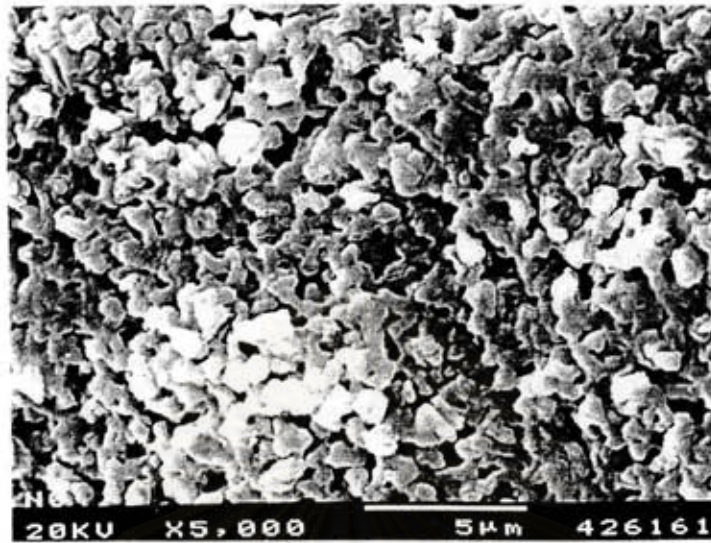
### 4.2.1 ผลของตัวเติม

#### 4.2.1.1 ผลของการเติมอะลูมิเนียมฟอสเฟต

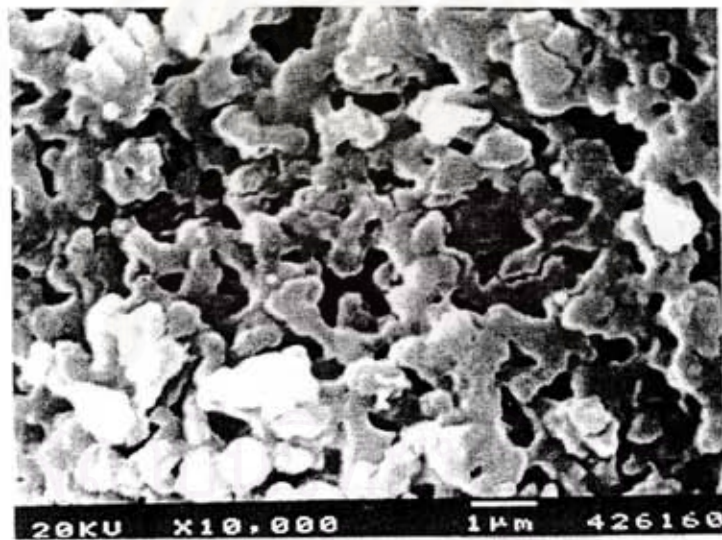
ผลของการเลือกใช้ตัวเติมอะลูมิเนียมฟอสเฟตและซิลิกา โดยใช้ปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณซิลิกาเป็นร้อยละ 1 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ดังสูตร A1 และ B1 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานหลังเผาสามารถคงรูปได้ แต่มีความแข็งแรงน้อยมาก สามารถเคลื่อนย้ายได้แต่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างมาก ลักษณะชิ้นงานหลังเผาแสดงดังรูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีการเชื่อมต่อกัน แต่ยังคงมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งสามารถจะอธิบายได้ว่าการที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงน้อยมากนั้นเนื่องมาจาก โครงสร้างจุลภาคยังเป็นรูพรุนอยู่มากนั่นเอง



รูปที่ 4.24 ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร A1 และ B1



(ก)

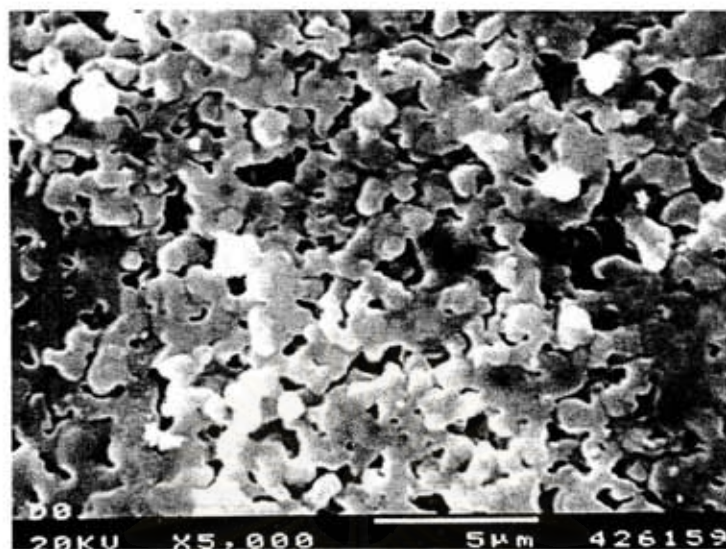


(ข)

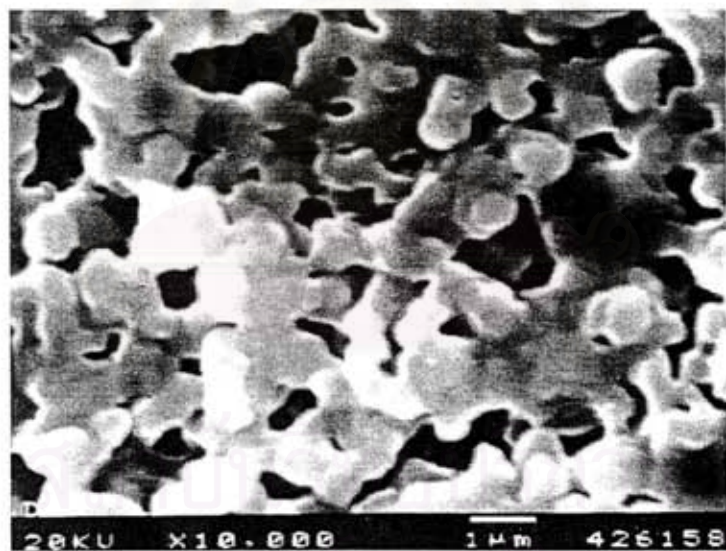
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร A1

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(ก)



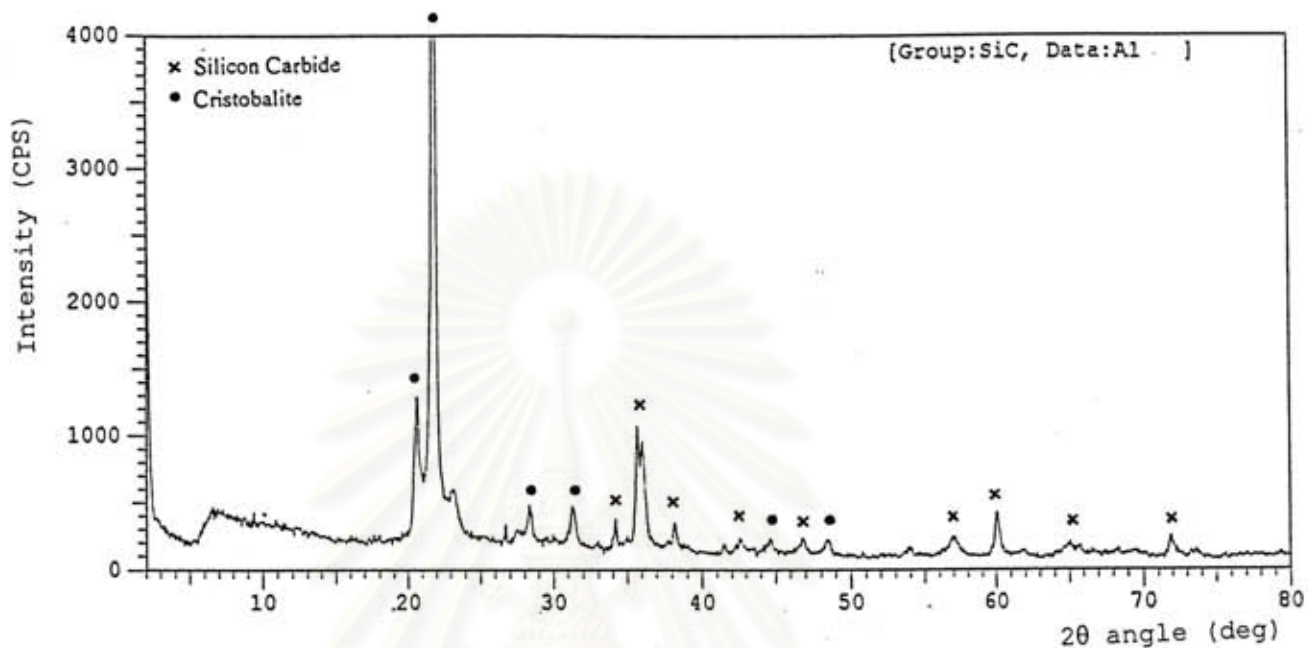
(ข)

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร B1

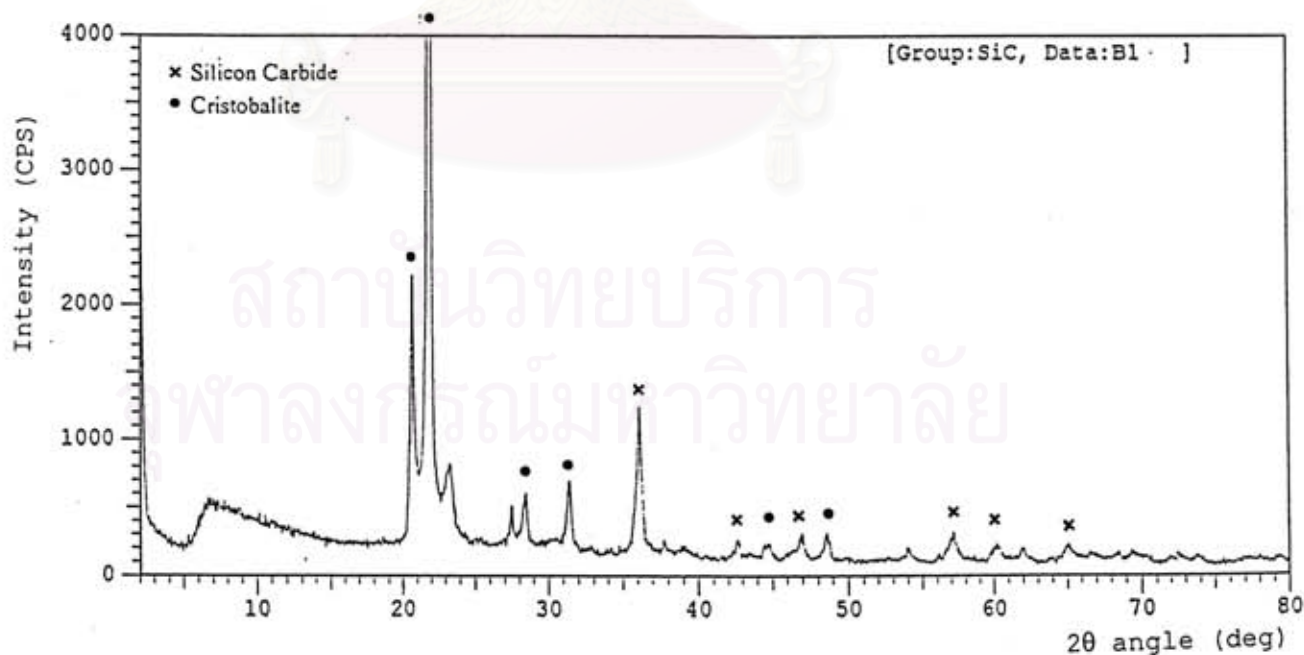
(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าทั้งสูตร A1 และ B1 มีเฟสซิลิกอนคาร์ไบด์ ชนิดที่เป็นแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์ และคริสโตบาไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28

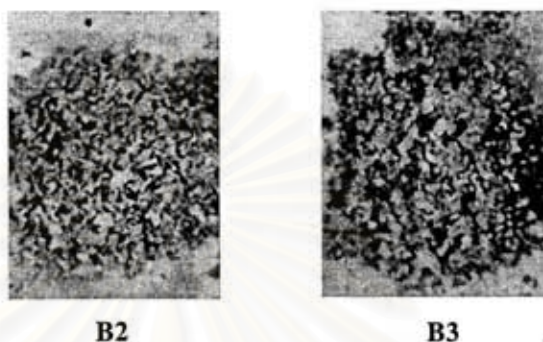


รูปที่ 4.27 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร A1



รูปที่ 4.28 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร B1

เมื่อทดลองแปรค่าปริมาณของอะลูมิเนียมฟอสเฟต เพื่อหาปริมาณที่น้อยที่สุด ที่จะสามารถทำให้ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้ เนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตสูงอาจทำให้เกิดแก๊สฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สพิษในขณะที่เผาได้ ดังนั้นสูตร B2 และ B3 ซึ่งมีปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตอยู่ร้อยละ 5.5 และร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนักตามลำดับได้ถูกเตรียมขึ้น และพบว่าชิ้นงานทั้ง 2 สูตร ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ เกิดการยุบตัวภายหลังจากการเผา แสดงดังรูปที่ 4.29



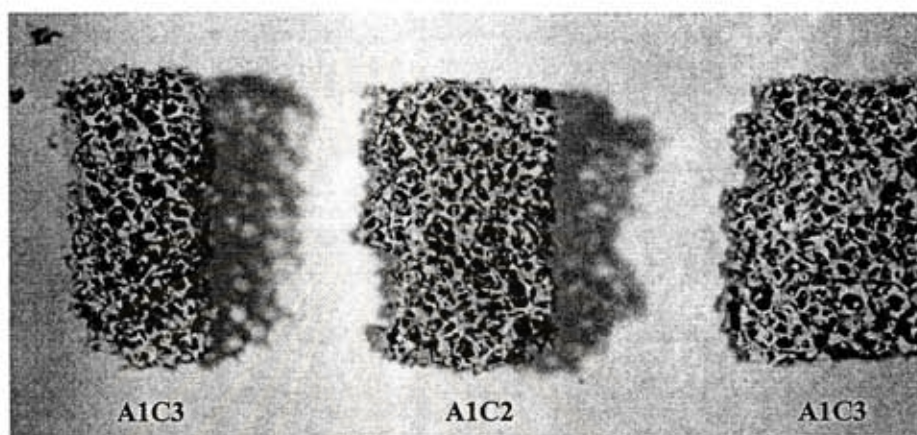
รูปที่ 4.29 ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร B2 และ B3

#### 4.2.1.2 ผลของการเติมดิน

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดิน

Chemical analysis (%)	ดิน
SiO <sub>2</sub>	63.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35
MgO	0.19
CaO	0.12
Na <sub>2</sub> O	1.10
K <sub>2</sub> O	3.91
TiO <sub>2</sub>	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07
MnO	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01

ดินที่เติมลงไปในสูตร จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา จะสามารถจับและเคลื่อนย้ายได้ เมื่อเติมปริมาณดินเป็นร้อยละ 3.5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 26 โดยน้ำหนักลงไป ในสูตร A1 และ B1 จะทำให้ได้ชิ้นงานเป็นสูตร A1C1 A1C2 A1C3 B1C1 B1C2 และB1C3 ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถเคลื่อนย้ายได้ แต่ไม่สามารถนำชิ้นงานไปหาค่าความทนแรงอัดได้ เนื่องจากยังมีความแข็งแรงต่ำอยู่ ลักษณะชิ้นงานหลังเผาแสดงดังรูปที่ 4.30

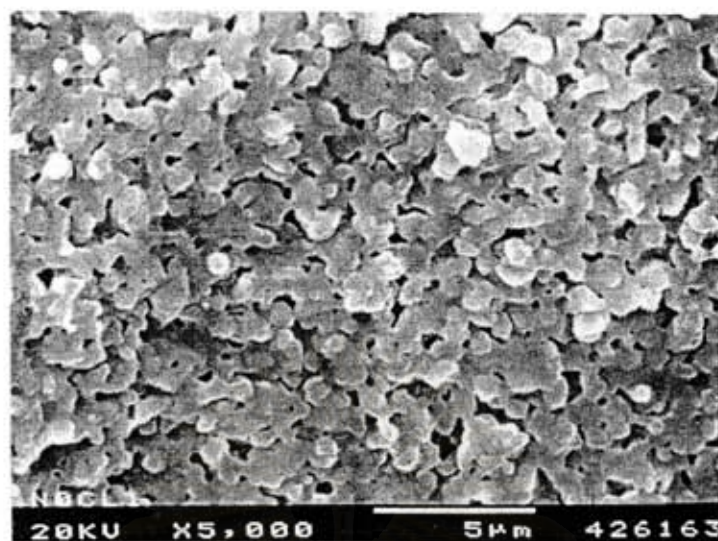


รูปที่ 4.30 ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร A1C1 A1C2 และ A1C3

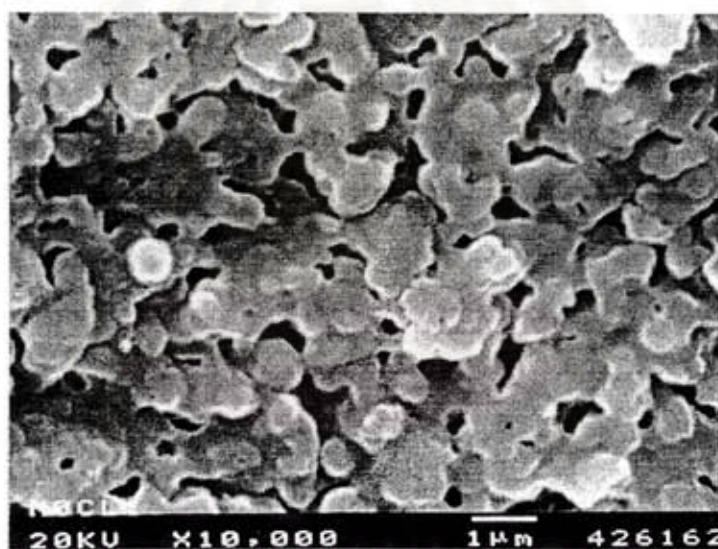
สังเกตภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร A1C1 A1C2 และ A1C3 ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ  $1,200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.31 - รูปที่ 4.33 อนุภาคจะเชื่อมต่อกันมากขึ้น ปริมาณของรูพรุนจะลดลง ซึ่งเป็นผลให้ ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น จนพอที่จะเคลื่อนย้ายได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





(ก)

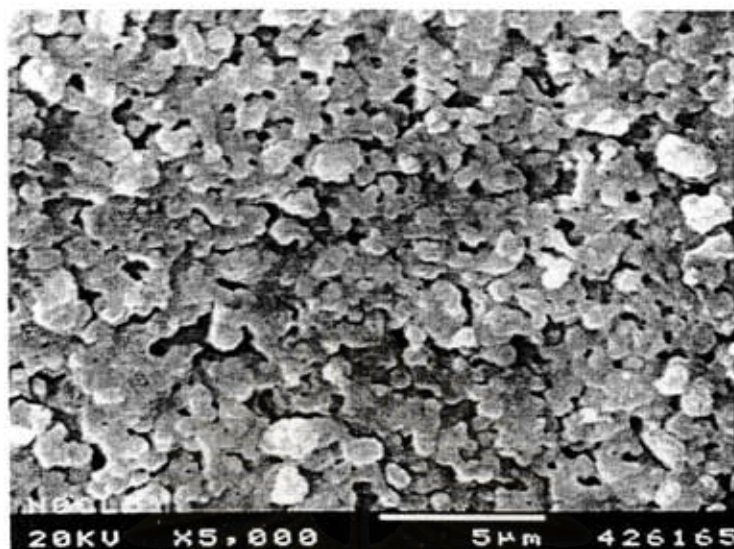


(ข)

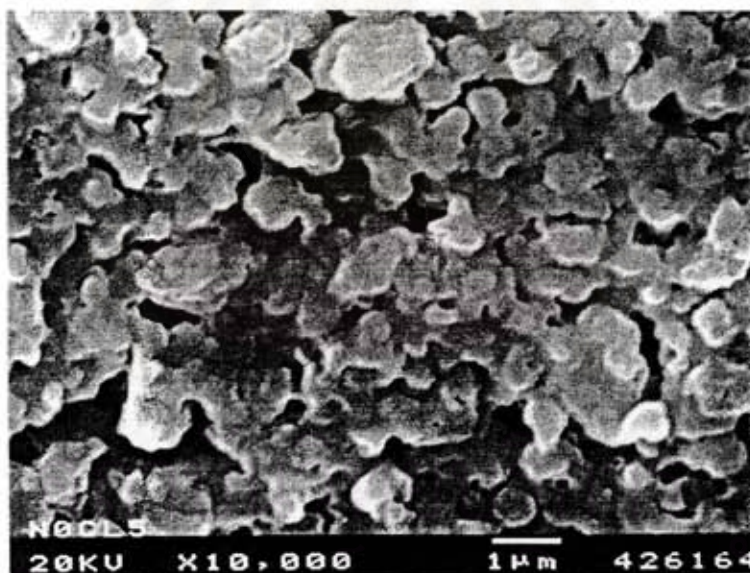
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร AIC1

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(ก)

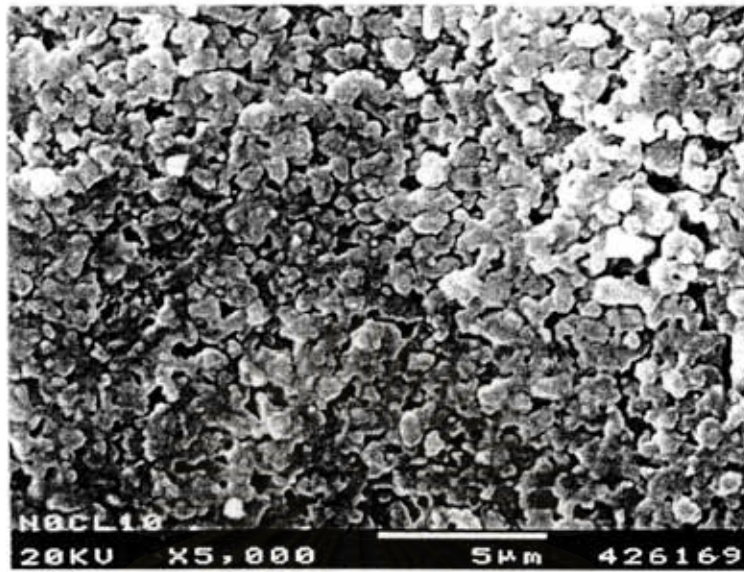


(ข)

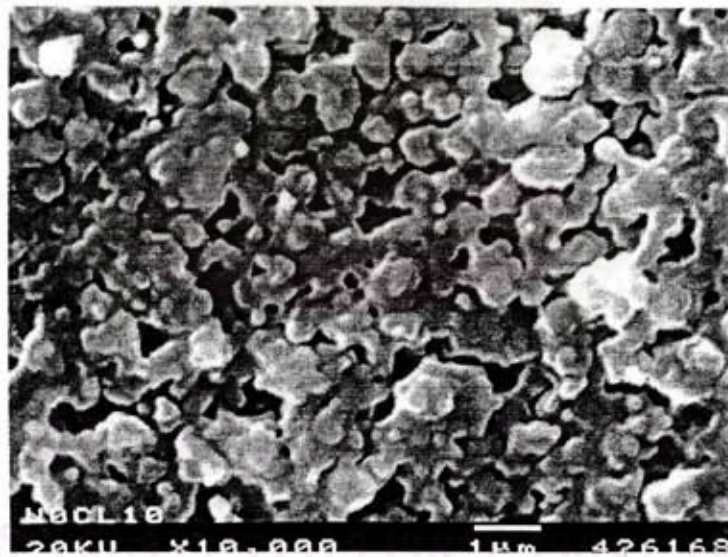
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร A1C2

(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(ก)



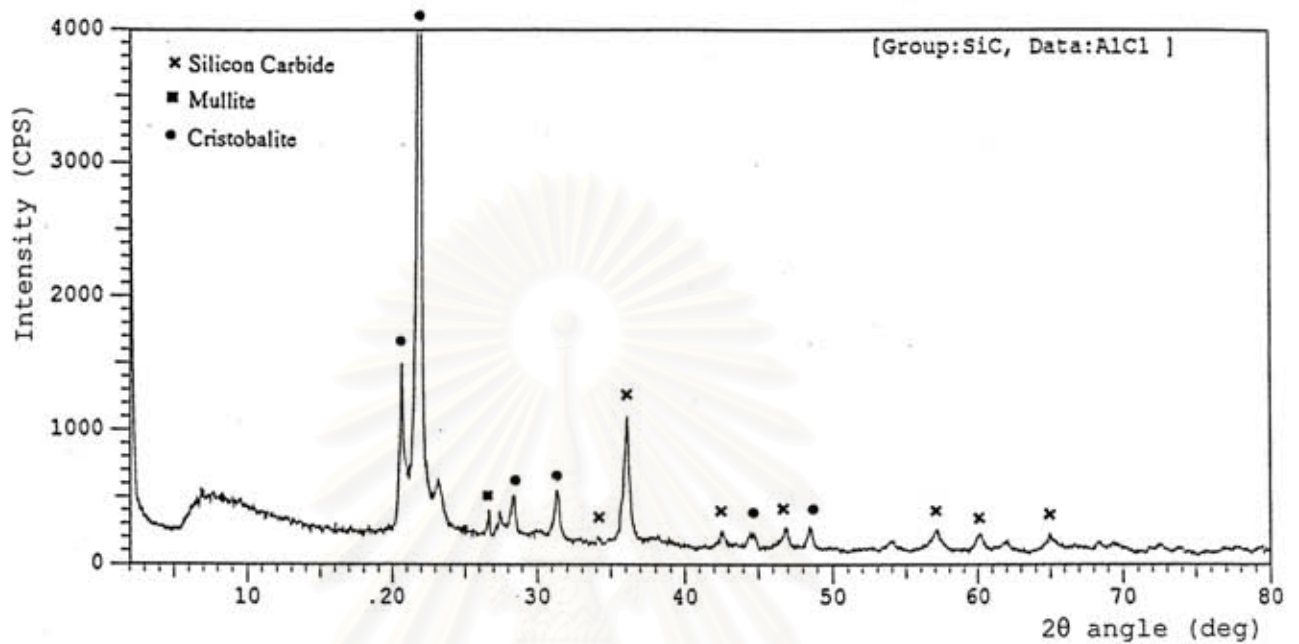
(ข)

รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร AIC3

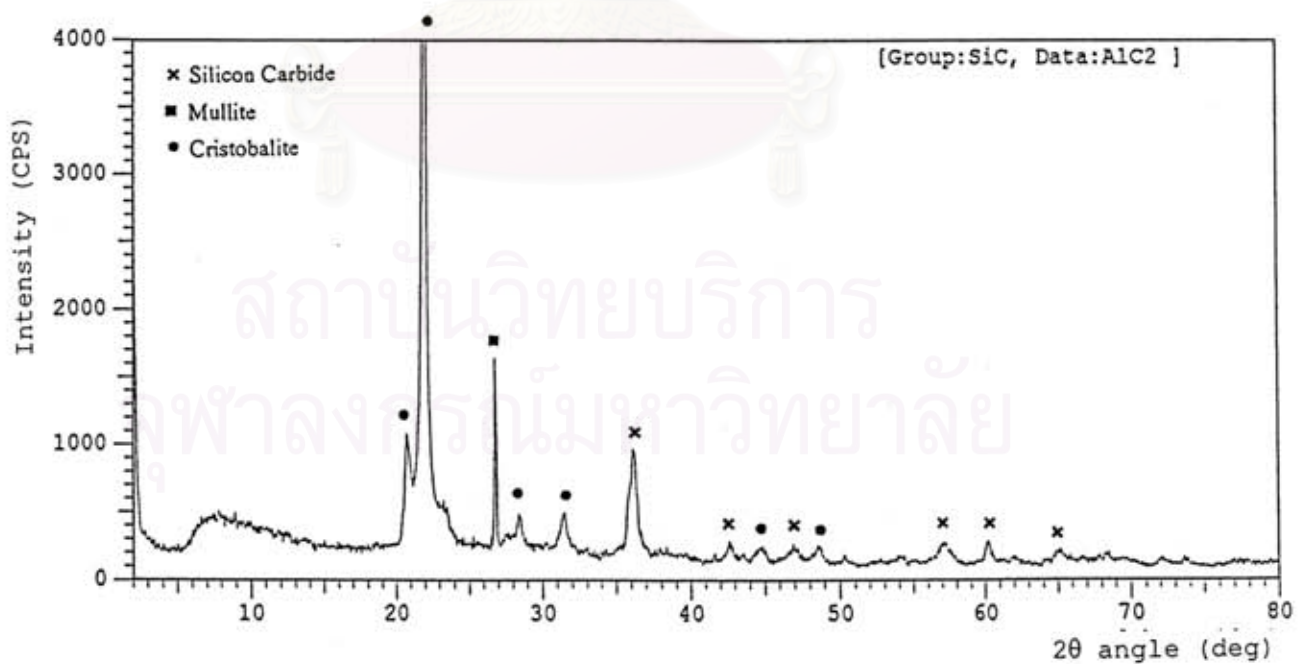
(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

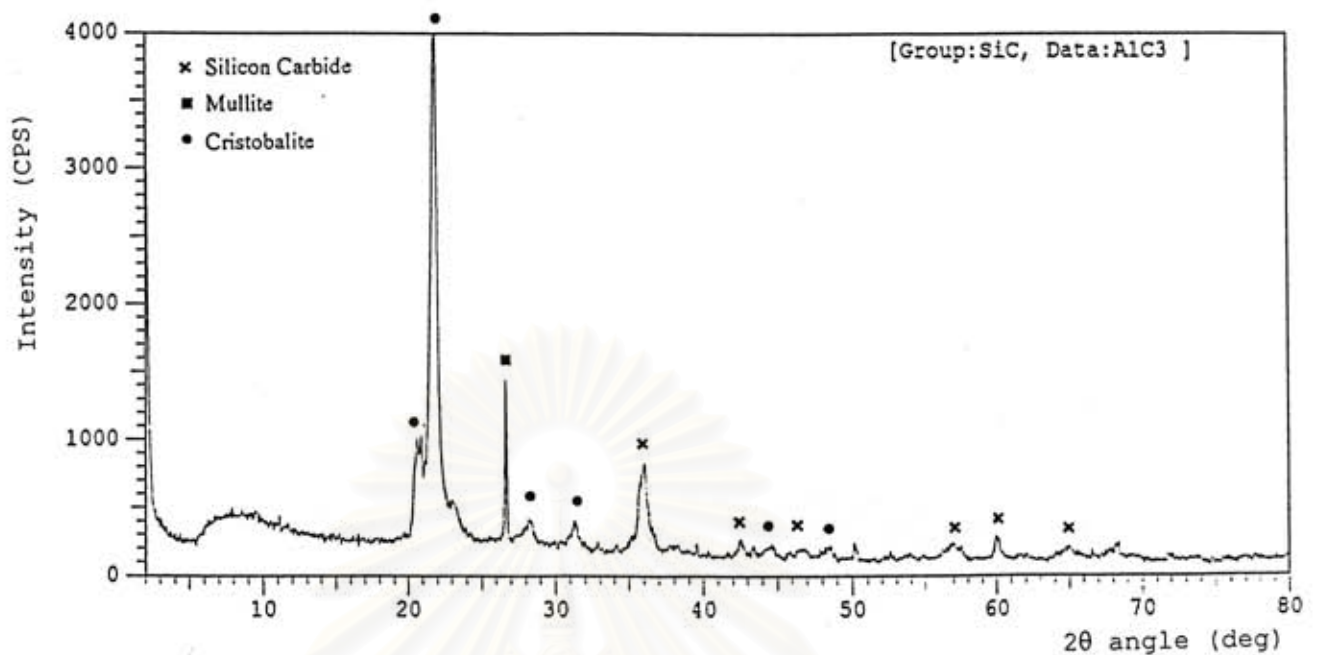
เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าทั้งสูตร A1C1 A1C2 และ A1C3 มีเฟสซิลิกอนคาร์ไบด์ คริสโตบาไลต์ และ มัลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.34 - รูปที่ 4.36



รูปที่ 4.34 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร A1C1



รูปที่ 4.35 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร A1C2



รูปที่ 4.36 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร A1C3

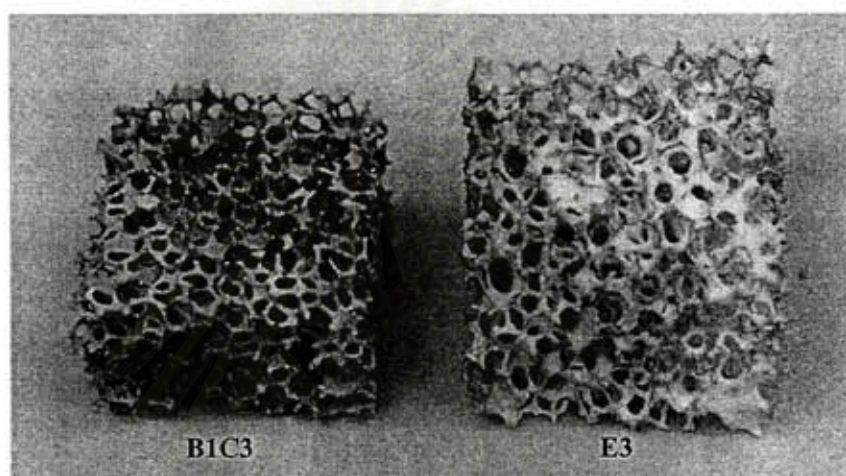
เมื่อทดลองเดิมดินปริมาณร้อยละ 4 ร้อยละ 16 และร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ลงไปในสูตรที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ต่อปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟต 100 ส่วนต่อ 2.9 ส่วน ได้เป็นสูตร E1 E2 และ E3 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานภายหลังการเผาสามารถคงรูปอยู่ได้

นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว ไปวิเคราะห์ด้วย EDS ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบสูตร B1C3 และ E3 ซึ่งมีอัตราส่วนของอะลูมิเนียมฟอสเฟต เป็น 11.5 ส่วนและ 2.9 ส่วนต่อ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 ส่วน ตามลำดับ ชิ้นงานสูตร B1C3 ยังคงพบ ฟอสฟอรัสอยู่ภายหลังทำการเผา ส่วนสูตร E3 จากการวิเคราะห์ไม่พบฟอสฟอรัส ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร B1C3 และ E3 แสดงดังรูปที่ 4.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ธาตุที่พบในชิ้นงาน

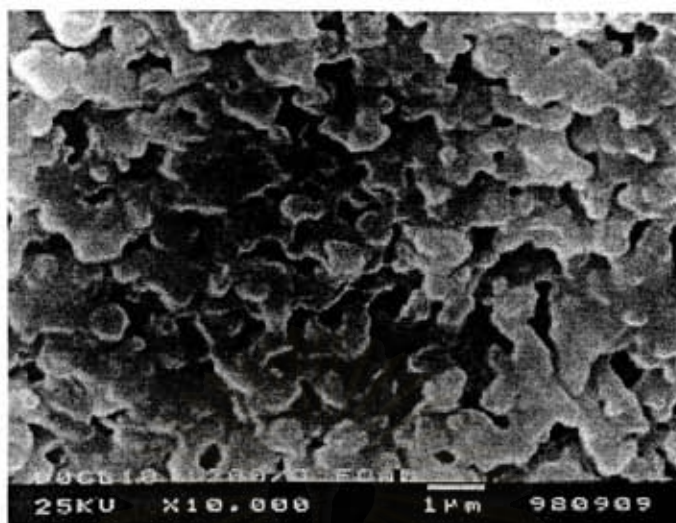
สูตร	ธาตุที่พบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)					
	Si	Al	P	Fe	K	Mg
B1C3	84.75	10	4.45	0.40	0.40	-
E3	92.92	5.74	-	0.31	0.79	0.24



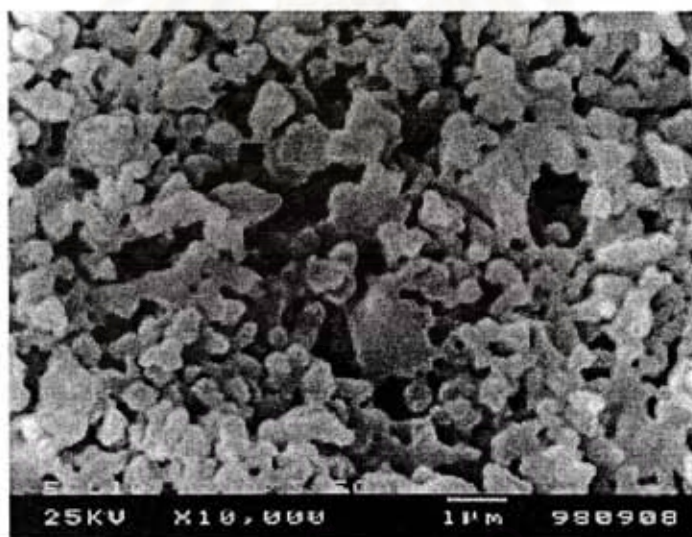
รูปที่ 4.37 ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร B1C3 และ E3

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร B1C3 และ E3 ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ  $1,200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 การเชื่อมต่อกันของอนุภาคในสูตร B1C3 จะมีมากกว่าสูตร E3 เนื่องจากมีปริมาณของอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่มากกว่า แต่ทั้งนี้เนื่องจาก ภายหลังจากการเผาอะลูมิเนียมฟอสเฟต จะมีบางส่วนกลายเป็นก๊าซฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ซึ่งเป็นพิษ ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่มีปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตน้อยและนำไปเติมด้วยตัวเติมชนิดอื่น เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

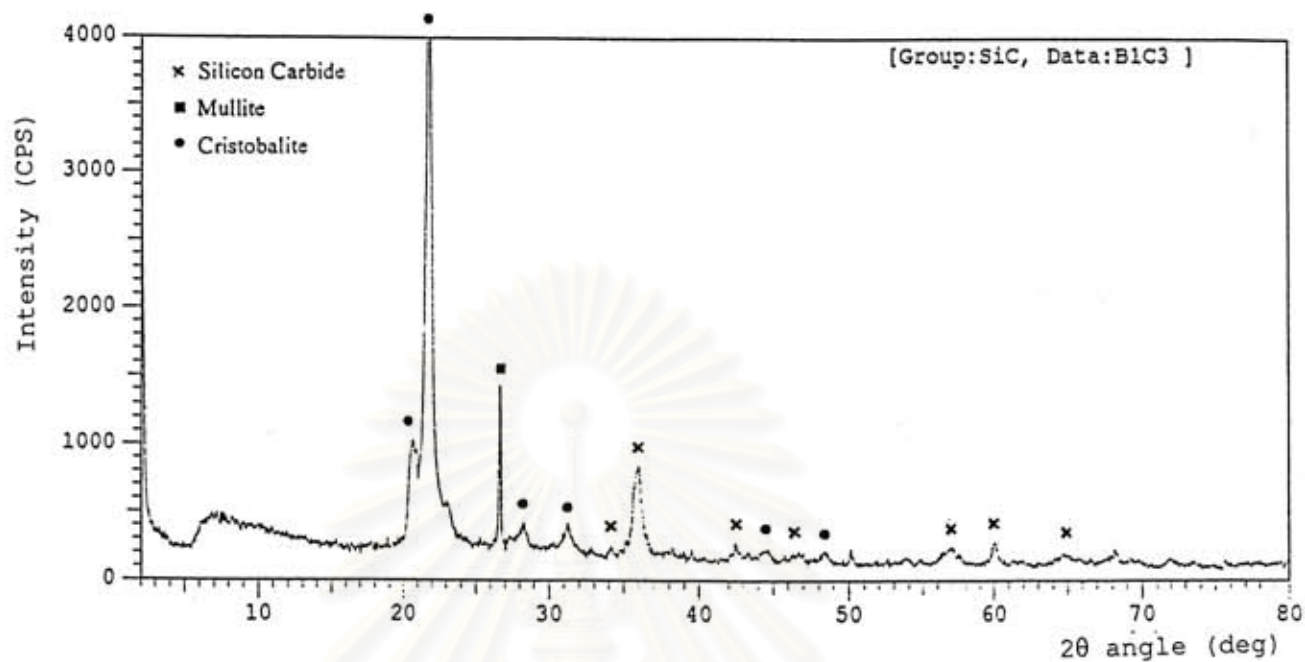


รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร B1C3 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

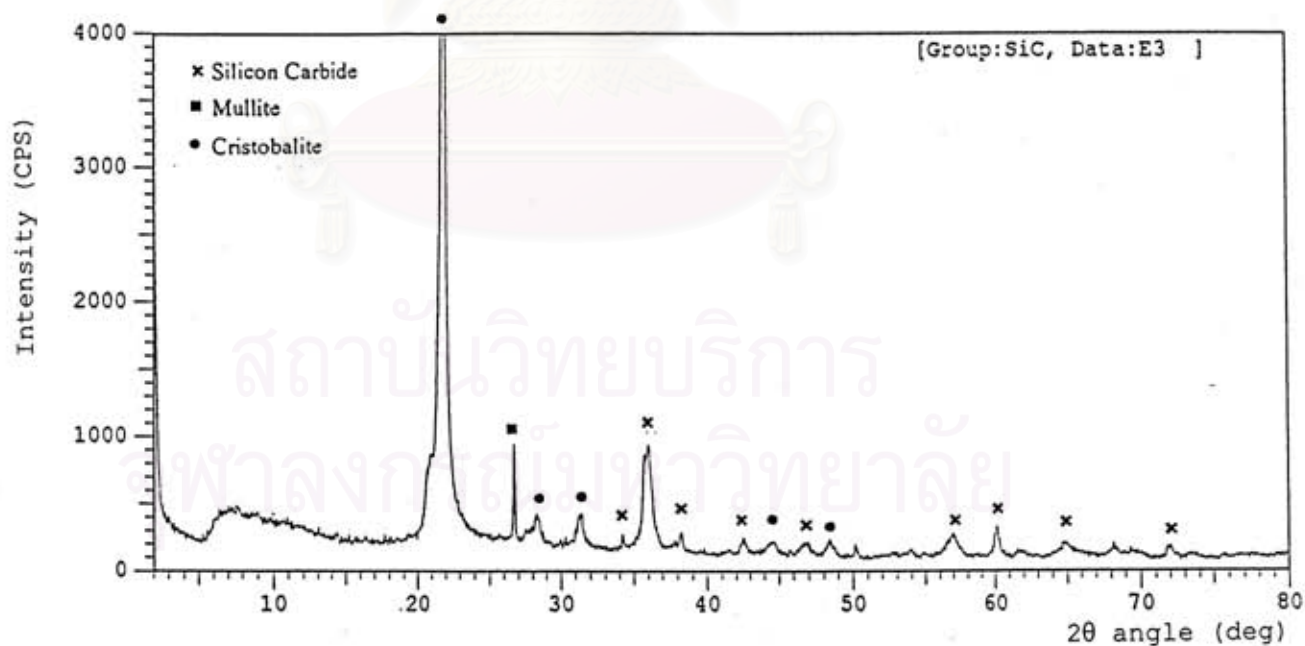


รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร E3 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าทั้งสูตร B1C3 และ E3 มีเฟสซิลิกอนคาร์ไบด์ คริสโตบาไลต์ และ มัลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร B1C3



รูปที่ 4.41 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร E3



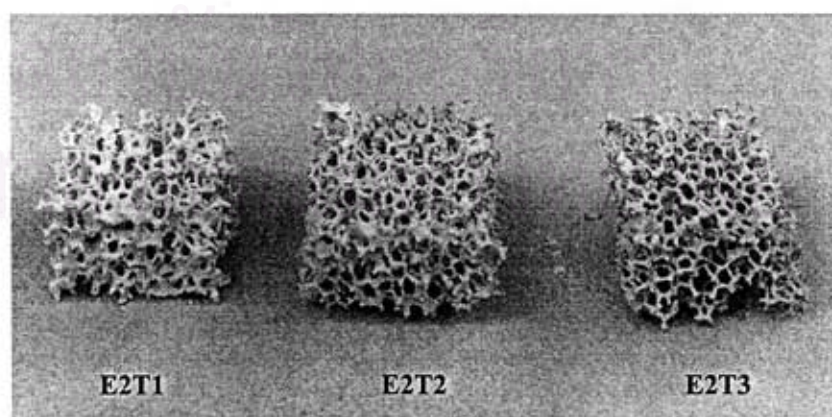
สำหรับชิ้นงานสูตร F3 และ S3 ซึ่งมีปริมาณดินอยู่ร้อยละ 28 โดยน้ำหนักและมีอัตราส่วนของปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตเป็น 1.5 ส่วนต่อปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 ส่วน และไม่มีปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตอยู่เลยนั้น ชิ้นงานไม่สามารถคงรูปได้ภายหลังการเผา ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า เมื่อใช้ดินเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานภายหลังเผา ปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตที่สามารถช่วยให้ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้คือ ปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟต 2.9 ส่วนต่อปริมาณซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 ส่วน

#### 4.2.1.3 ผลของการเติมทลคัม

ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของทลคัม

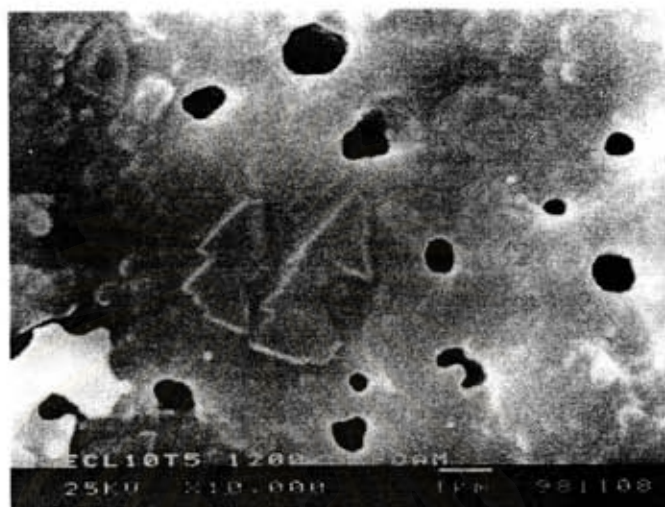
Chemical analysis (%)	ทลคัม 1	ทลคัม 2
SiO <sub>2</sub>	56.65	52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.42	5
MgO	28.06	30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.36	2
CaO	0.11	5

เลือกใช้สูตร E2 แล้วเติมทลคัมลงไปเป็นปริมาณร้อยละ 5 (สูตร E2T1) ร้อยละ 7.5 (สูตร E2T2) และร้อยละ 10 (สูตร E2T3) โดยน้ำหนัก ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ลักษณะชิ้นงานหลังเผาดังแสดงในรูปที่ 4.42

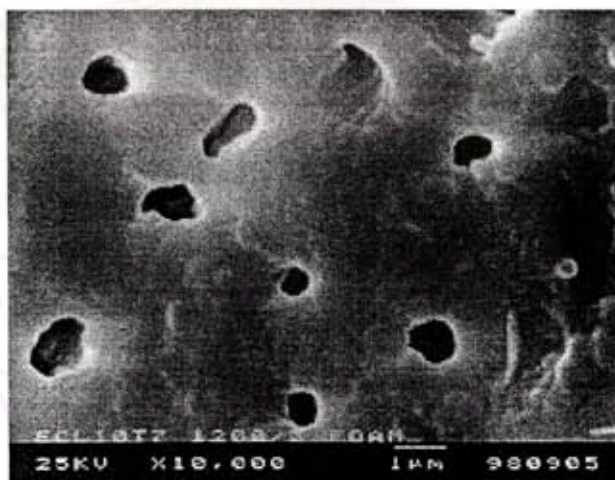


รูปที่ 4.42 ลักษณะชิ้นงานหลังเผาสูตร E2T1 E2T2 และ E2T3

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของชิ้นสูตร E2T2 และ E2T3 ภาย  
หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 ° ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.43 และรูปที่ 4.44 แสดงให้เห็นว่า  
อนุภาคมีการเชื่อมต่อกันมาก มีรูพรุนลดลง โดยที่สูตรที่มีปริมาณทัลคัมมากกว่า จะมีรูพรุนน้อย  
กว่า ซึ่งส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าด้วย

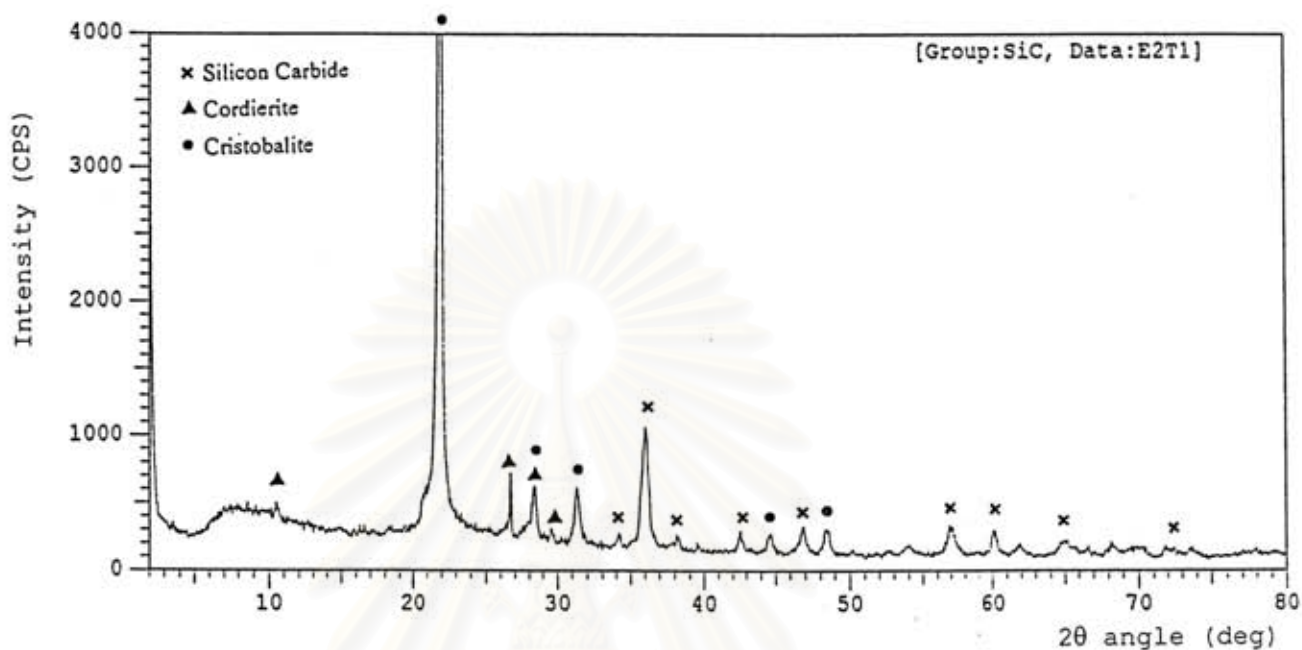


รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร E2T2  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

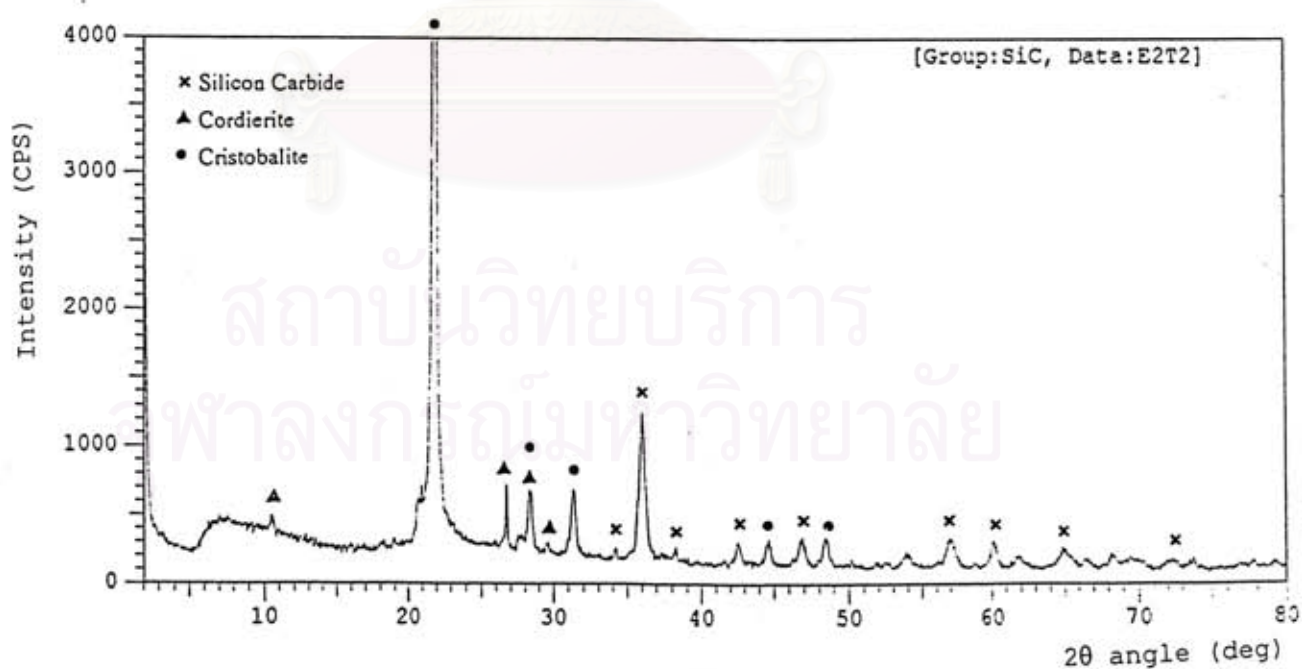


รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร E2T3  
ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

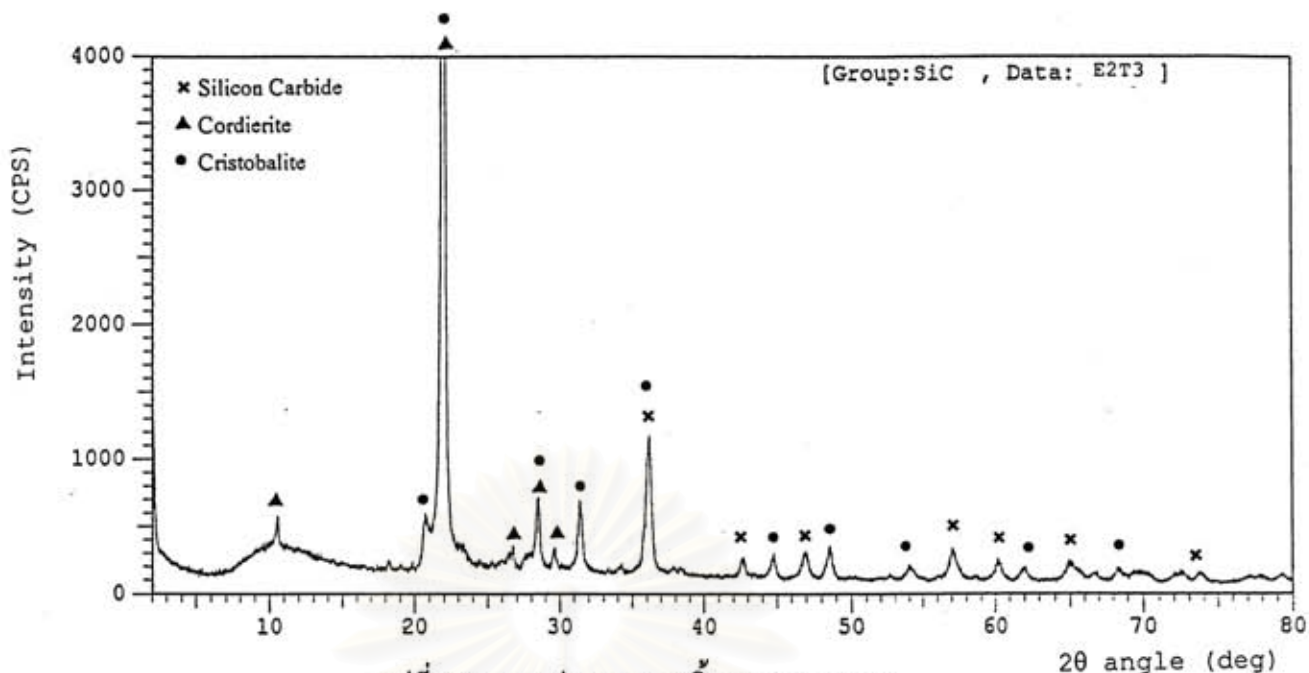
เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่าทั้งสูตร E2T1 E2T2 และ E2T3 มีเฟสซิลิกอนคาร์ไบด์ คริสโตบาไลต์ และมีเฟสที่เป็นคอยเดียไรต์เกิดขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.45 - รูปที่ 4.47



รูปที่ 4.45 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร E2T1

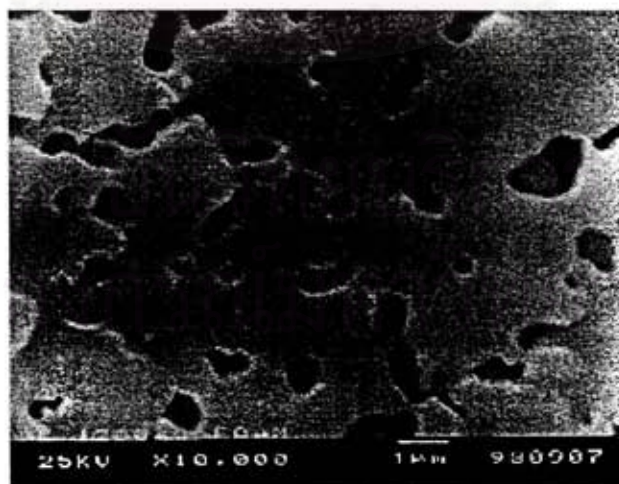


รูปที่ 4.46 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร E2T2



รูปที่ 4.47 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร E2T3

เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีส่วนผสมเหมือนกัน แต่ใช้ทลคัมที่ต่างชนิดกัน พบว่าชิ้นงานที่ใช้ทลคัมชนิดที่ 1 จะมีความแข็งแรงมากกว่า ชิ้นงานที่ใช้ทลคัมชนิดที่ 2 อยู่ประมาณ 1.57 เท่า คือมีค่าความทนแรงอัดเป็น 3.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( 44.59 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ) ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้ทลคัมชนิดที่ 2 จะมีค่าความทนแรงอัดเป็น 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( 28.47 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ) ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร E2TT3 ที่ใช้ทลคัมชนิดที่ 2 ดังรูปที่ 4.48 จะเห็นได้ว่าอนุภาคการเชื่อมต่อกันดี แต่มีปริมาณรูพรุนมากกว่าชิ้นงานสูตร E2T3 ที่มีปริมาณทลคัมเท่ากันแต่มาจากแหล่งต่างกัน

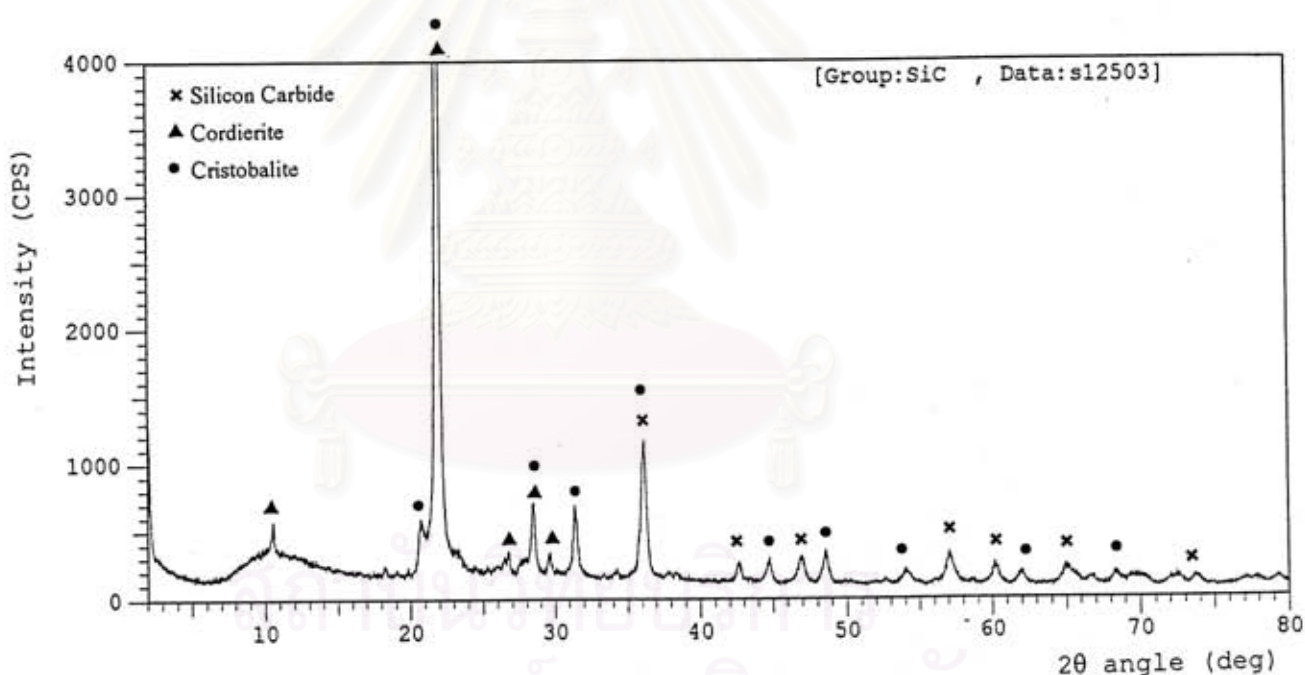


รูปที่ 4.48 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร E2TT3 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

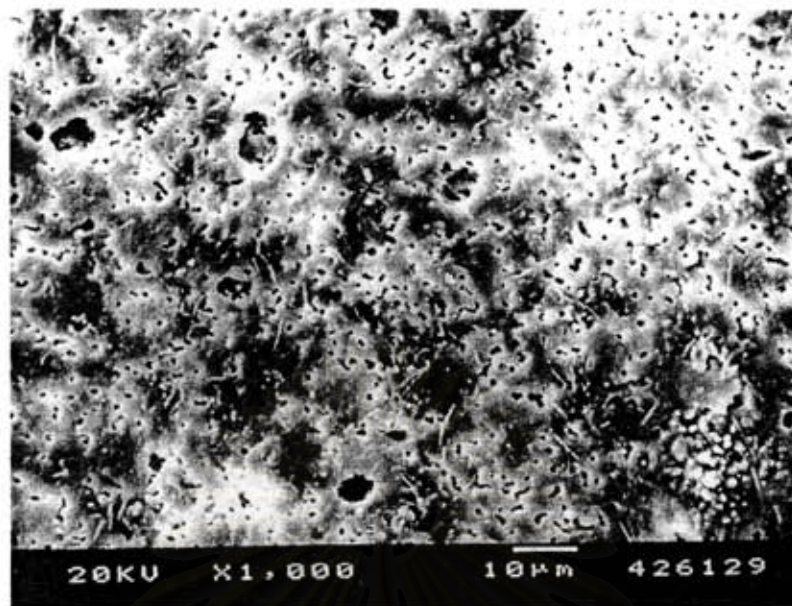
## 4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์

### 4.2.2.1 อนุภาคขนาดเล็ก

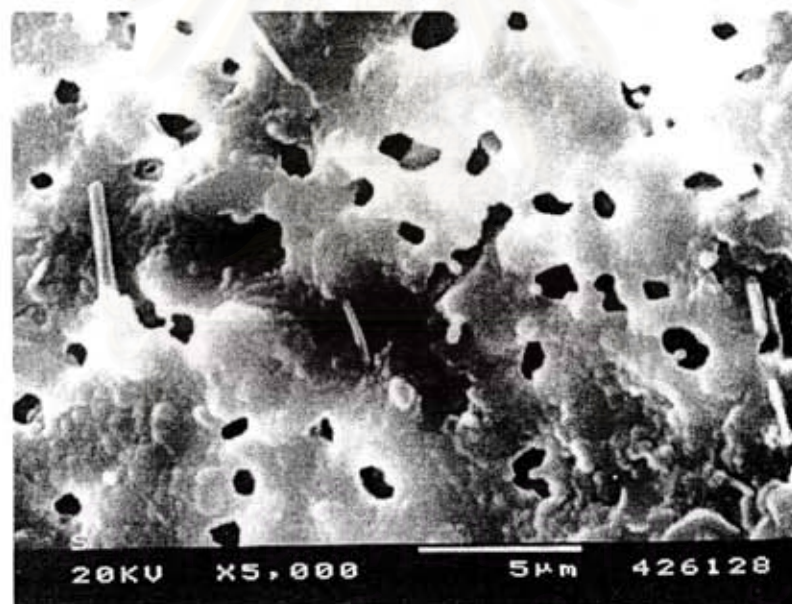
จากการทดลองนี้พบว่า ขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ มีผลมากที่สุดต่อการเผาซินเทอริง และสมบัติของชิ้นงานหลังเผา เนื่องจากอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กจะเกิดออกซิเดชันมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อทำการเผาในอากาศ ชิ้นงานสูตร S ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 จะเกิดออกซิเดชันให้คริสโตบาไลต์ ทำให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวขณะเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง และมีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบเฟสคริสโตบาไลต์ แสดงดังรูปที่ 4.49 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร S แสดงดังรูปที่ 4.50 จะพบว่าอนุภาคมีการเชื่อมติดกัน โดยที่มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป



รูปที่ 4.49 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร S



(ก)

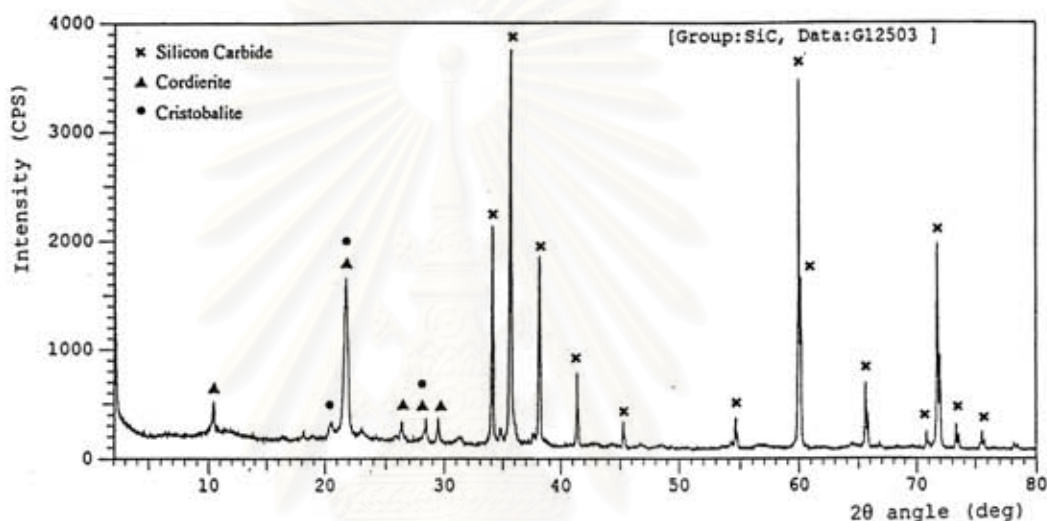


(ข)

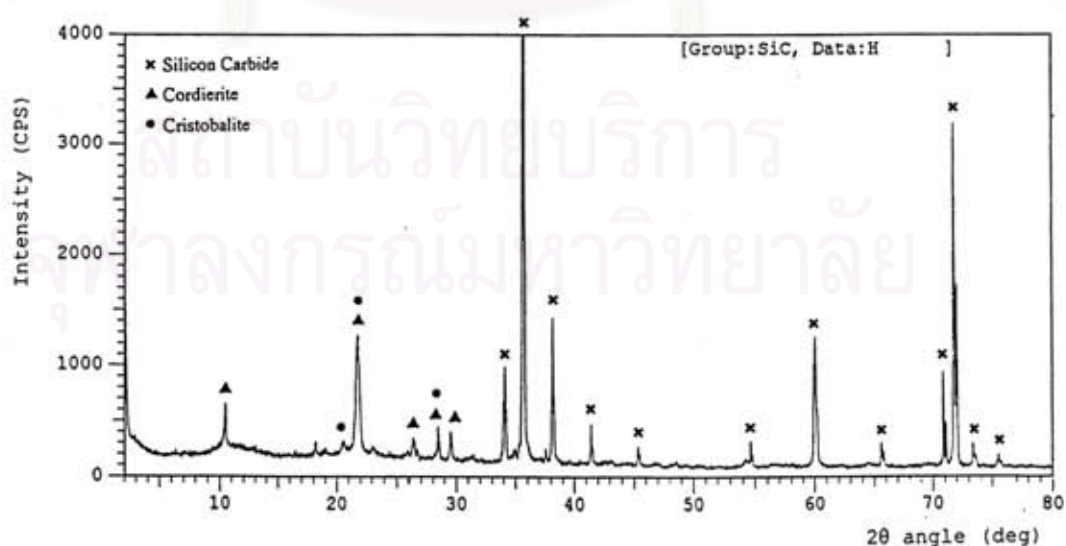
รูปที่ 4.50 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร S  
 (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า  
 (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.2.2.2 อนุภาคขนาดใหญ่

ชิ้นงานสูตร G ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และสูตร H ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 จะมีการขยายตัวต่ำกว่าชิ้นงานที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 เมื่อนำชิ้นงานหลังเผาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer พบว่ามีแอลฟาซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นเฟสหลัก มีคริสโตบาไลต์และมิกอเดียไรต์เกิดขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 4.51 และรูปที่ 4.52 สำหรับเฟสที่เป็นมิกอเดียไรต์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากในส่วนผสมจะมีทัลคัม ซึ่งมีแมกนีเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบอยู่ และในดินที่ใช้ก็มีองค์ประกอบหลักเป็น อะลูมินา และซิลิกา

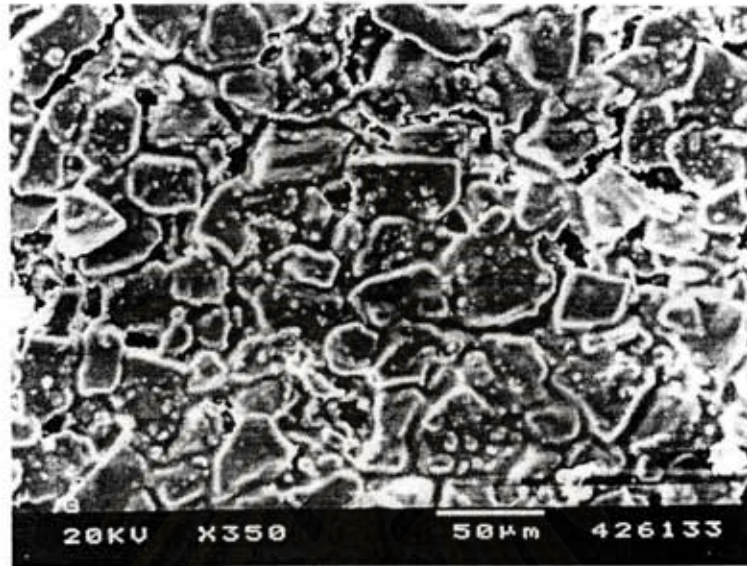


รูปที่ 4.51 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร G

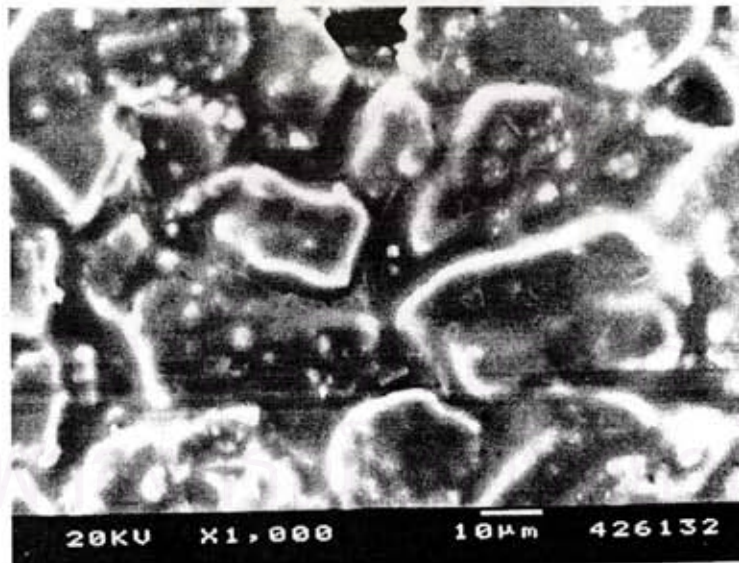


รูปที่ 4.52 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร H

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานสูตร G และ H แสดงดังรูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.54 พบว่าระหว่างรอยต่อของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ จะเป็นการเชื่อมต่อกันโดยการเชื่อมเหลวของอนุภาคของดินและทัลคัม ซึ่งจะทำให้ชั้นงานมีรูพรุนลดลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยที่ในชั้นงานสูตร G ช่องว่างระหว่างเกรนจะแคบกว่าช่องว่างระหว่างเกรนของชั้นงานสูตร H



(ก)



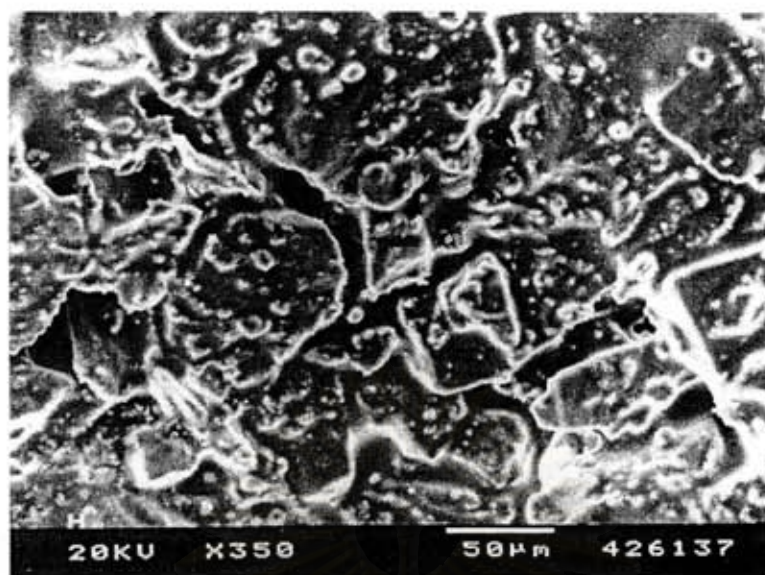
(ข)

รูปที่ 4.53 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นงานสูตร G

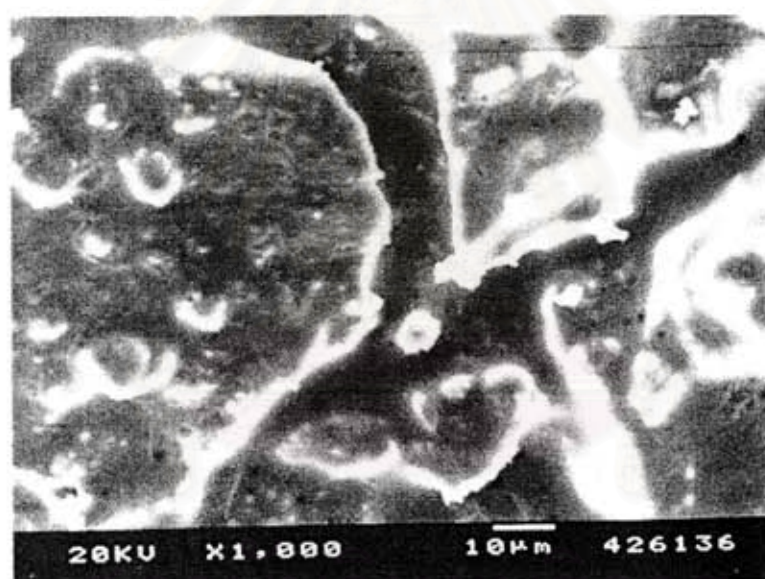
(ก) กำลังขยาย 350 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า





(ก)



(ข)

รูปที่ 4.54 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร H

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

#### 4.2.2.3 การผสมอนุภาคขนาดต่างๆกัน

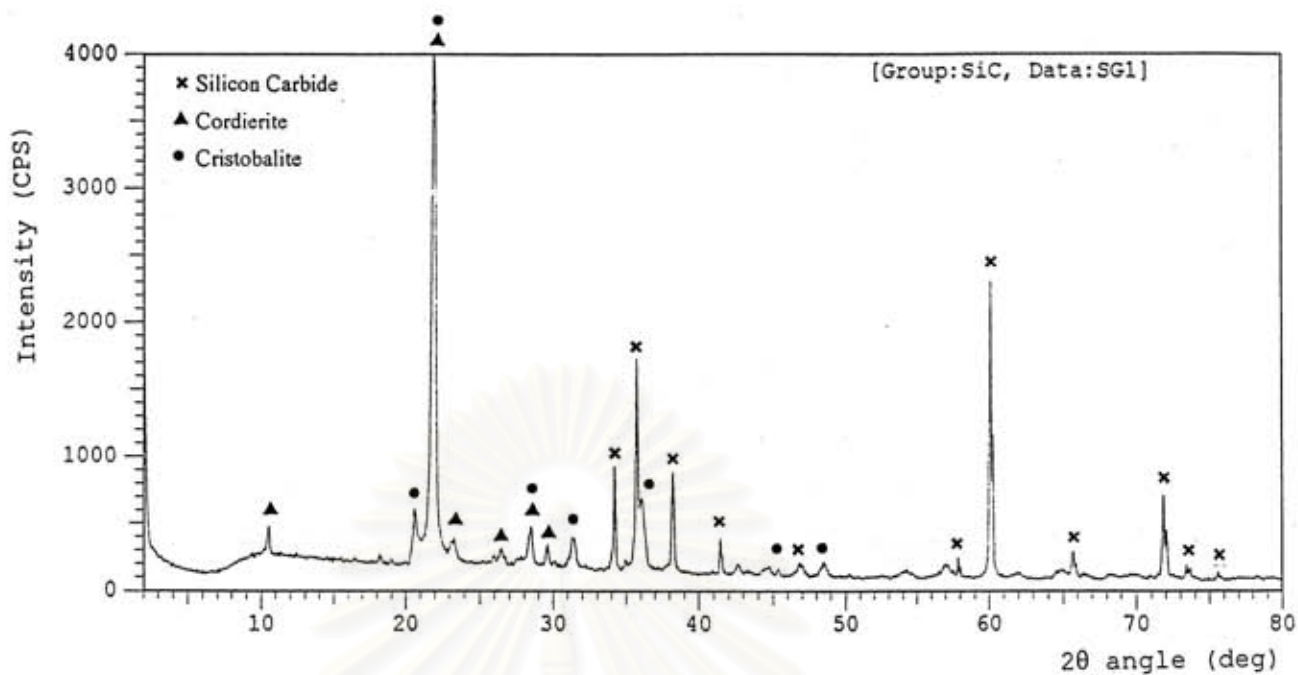
ชิ้นงานแต่ละสูตรที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดต่างกัน จะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันต่างกัน ถ้าอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมากจะมีอัตราการเกิดออกซิเดชันสูง จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานสูตร S ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 1.06 ไมโครเมตร ภายหลังทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 20.19 และในสูตร SG ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 ไมโครเมตรผสมอยู่ จะทำให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพียงร้อยละ 9.81

ส่วนในชิ้นงานสูตร G GH และ H ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า พบว่า น้ำหนักของชิ้นงานจะลดลง ซึ่งแสดงว่าเกิดออกซิเดชันในอัตราที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ถูกเผาไหม้ออกไปจากชิ้นงาน

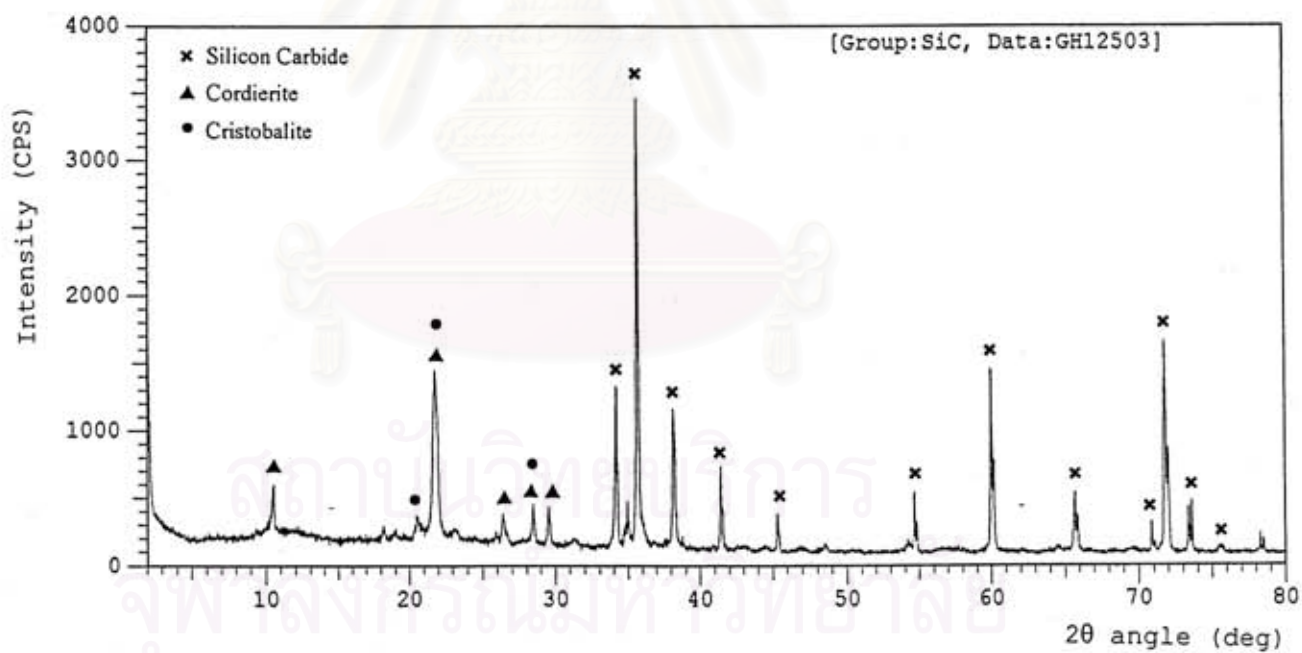
ตารางที่ 4.7 ร้อยละของน้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงภายหลังทำการเผา

สูตร	ร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น	ร้อยละของน้ำหนักที่ลดลง
S	20.19	-
SG	9.81	-
G	-	0.64
GH	-	0.11
H	-	1.49

เมื่อนำชิ้นงานสูตร SG ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ Carbogran UF-15 ผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และสูตร GH ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ทั้งชิ้นงานสูตร SG และชิ้นงานสูตร GH จะพบเฟสที่เป็น ซิลิกอนคาร์ไบด์ คริสโตบาไลต์ และคอเดียวไรต์ โดยที่ในสูตร SG จะพบคริสโตบาไลต์สูงกว่าสูตร GH ดังแสดงในรูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 ตามลำดับ

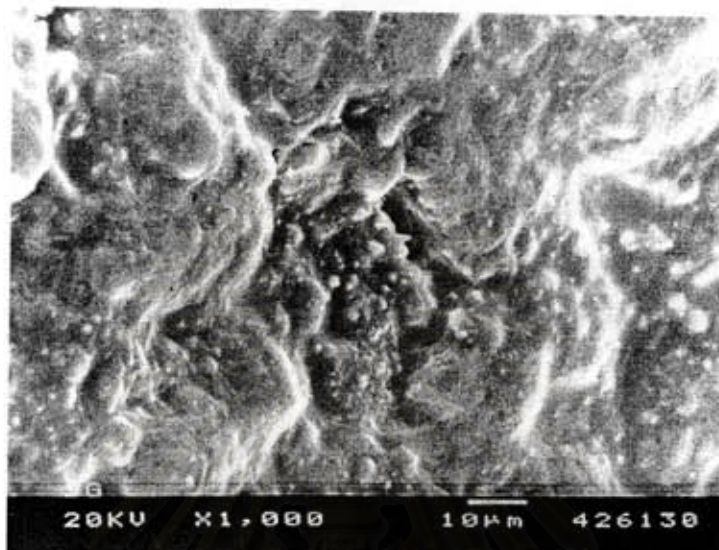


รูปที่ 4.55 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร SG

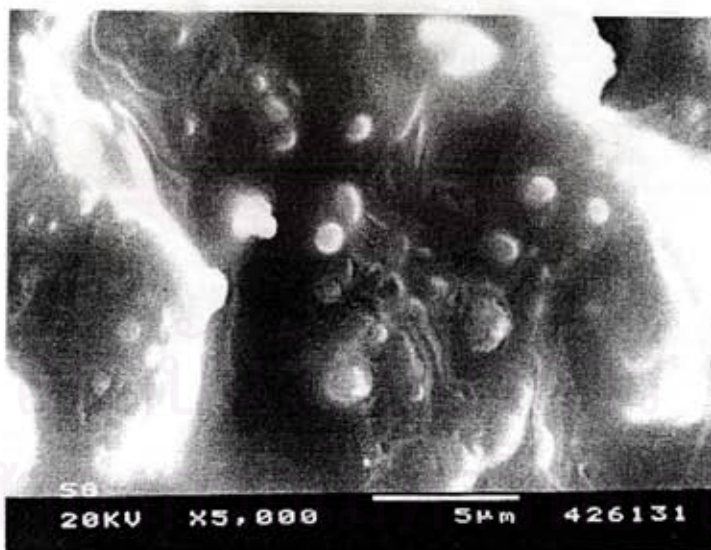


รูปที่ 4.56 กราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร GH

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร SG ดังแสดงในรูปที่ 4.57 พบว่าอนุภาคมีการเชื่อมติดกัน โดยที่อนุภาคขนาดเล็กจะเกาะอยู่บนอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร GH ดังแสดงในรูปที่ 4.58 พบว่า อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์มีการเชื่อมต่อกันโดยอนุภาคของดินและทัลคัม แต่ยังมีรูพรุนกระจายอยู่มาก



(ก)

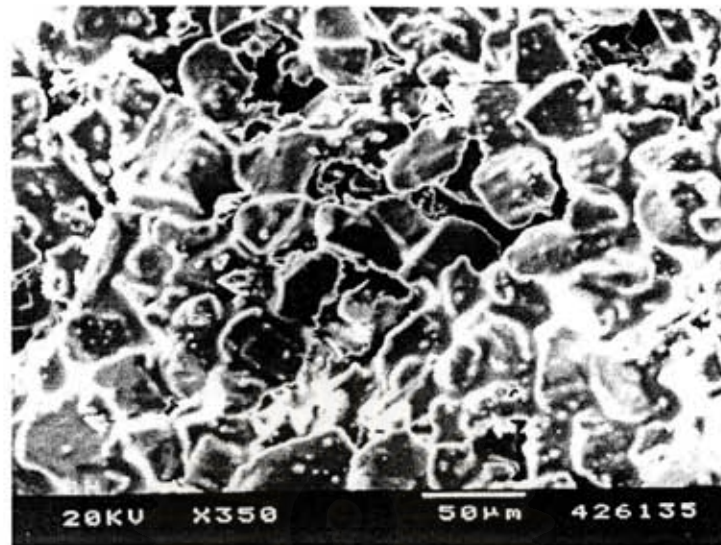


(ข)

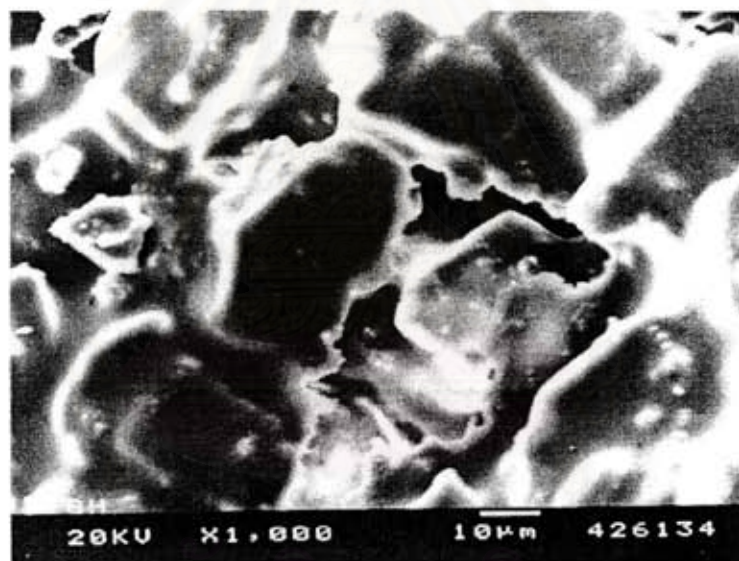
รูปที่ 4.57 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร SG

(ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ข) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.58 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร GH

(ก) กำลังขยาย 350 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากการทดลองพบว่าชิ้นงานทุกสูตรที่เตรียมได้ ภายหลังจากการเผาจะเกิดการขยายตัวอันเนื่องมาจากการเกิดคริสโตบาไลต์จากการออกซิเดชัน ดังจะเห็นได้จากกราฟ XRD ของชิ้นงานสูตร S ดังรูปที่ 4.49 ที่มีเฟสที่เป็นคริสโตบาไลต์อยู่ ซึ่งร้อยละของการขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้ ค่าร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงานสูตรต่างๆ ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1250 ° ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการขยายตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่ออนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ขึ้น

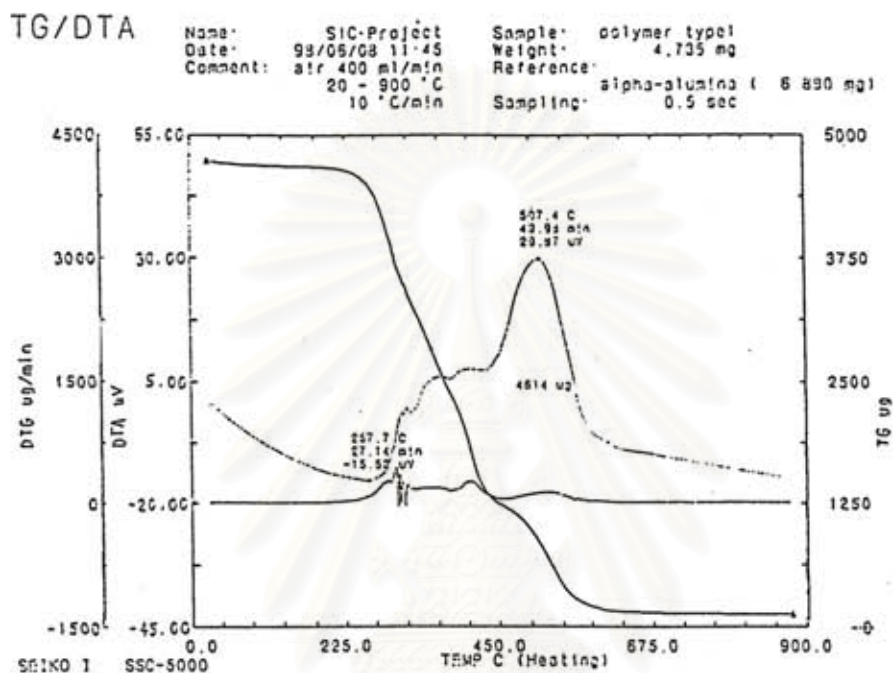
ตารางที่ 4.8 ร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงานสูตรต่างๆ

สูตร	ร้อยละของการขยายตัว
S	2.89
SG	1.91
G	0.94
GH	0.03
H	0.57

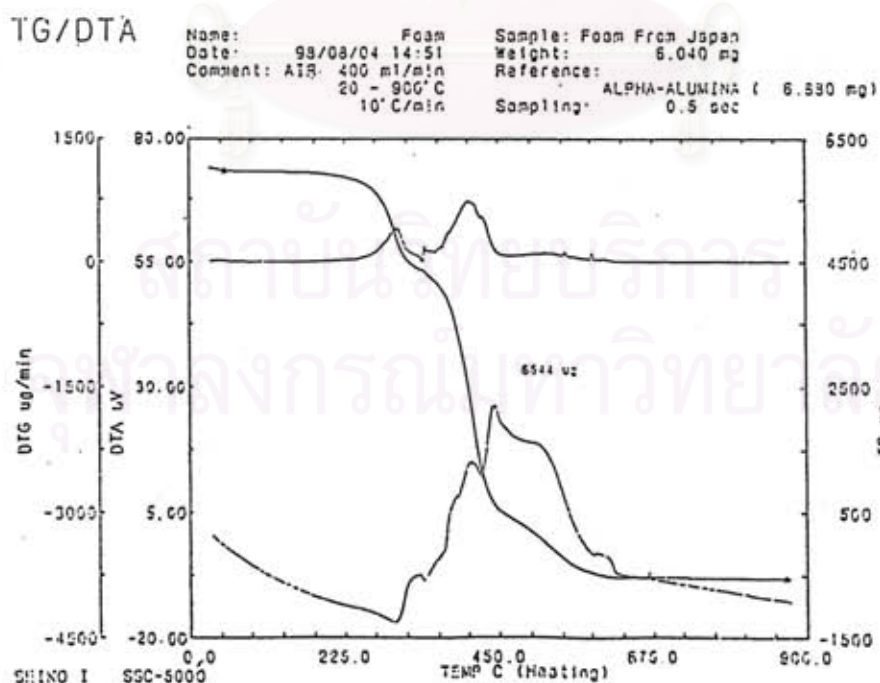
### 4.3 ผลการศึกษาภาวะการขึ้นเทอริงที่เหมาะสม

#### 4.3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการเผาไล่สารอินทรีย์

ทำการศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของฟองน้ำ โดยใช้ DTA และ TGA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.59 และรูปที่ 4.60



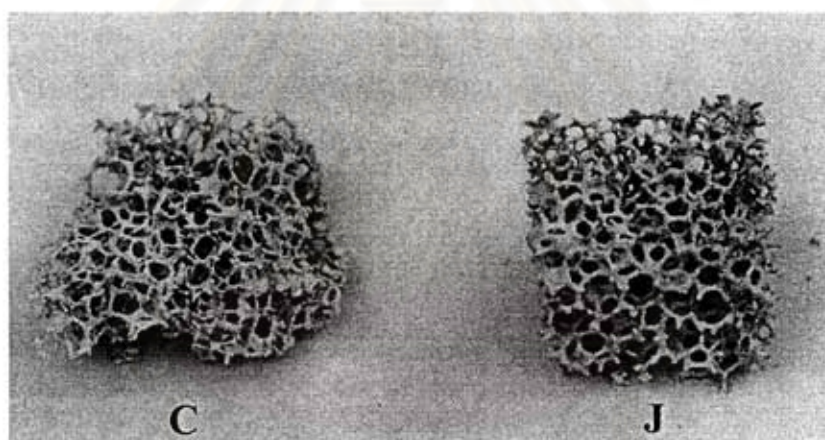
รูปที่ 4.59 กราฟ TG-DTA ของฟองน้ำชนิด C



รูปที่ 4.60 กราฟ TG-DTA ของฟองน้ำชนิด J

จากกราฟ TG-DTA ของฟองน้ำทั้ง 2 ชนิด สามารถอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกฟองน้ำมีการดูดความร้อนเข้าไปเพื่อสลายพันธะ ที่อุณหภูมิประมาณ  $225^{\circ}\text{C}$  ฟองน้ำจะเริ่มเกิดการแข็งเหว และเกิดการเผาไหม้ตั้งแต่ช่วงนี้ไป ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ให้แกสไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ การเผาไหม้จะดำเนินไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ  $450^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  และพบว่าร้อยละ 90-95 ของฟองน้ำจะสลายตัวไป

การทดลองในช่วงแรกใช้ฟองน้ำทั้ง 2 ชนิด แต่พบว่าสมบัติหลังเผาของชิ้นงานที่ใช้ฟองน้ำชนิด C ชูบเสอริของซิลิกอนคาร์ไบด์จะ ได้ผลที่ไม่ดี คือมีความแข็งแรงน้อย ไม่สามารถเคลื่อนย้ายชิ้นงานหลังเผาได้ เมื่อเทียบกับชิ้นงานสูตรเดียวกันที่ชูบด้วยฟองน้ำชนิด J ทั้งนี้เนื่องจากการที่ฟองน้ำชนิด C มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอทำให้เสอริของซิลิกอนคาร์ไบด์กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน เมื่อนำไปเผาชิ้นงานจะเกิดการยุบตัว ดังนั้นหลังจากที่ได้ทำการทดลองช่วงแรกไปแล้ว การทดลองในช่วงหลังจึงใช้ฟองน้ำชนิด J เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.61 ตัวอย่างชิ้นงานที่ชูบด้วยฟองน้ำชนิด C และ ชนิด J

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 4.3.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ริง

เมื่อทำการทดลองแปรค่าเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุดเป็น 1 – 3 ชั่วโมง พบว่าค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงอัดและเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 ° ซ

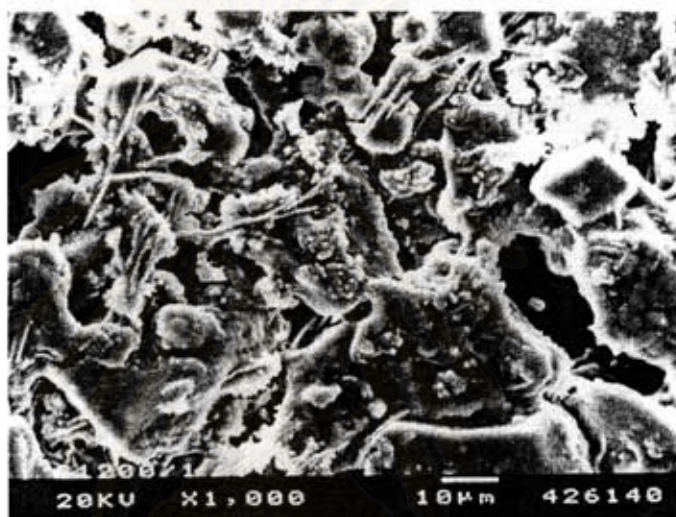
เวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด (ชั่วโมง)	ค่าความทนแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
1	1.60
2	1.65
3	2.85

เมื่อแปรค่าเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมได้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 ° ซ

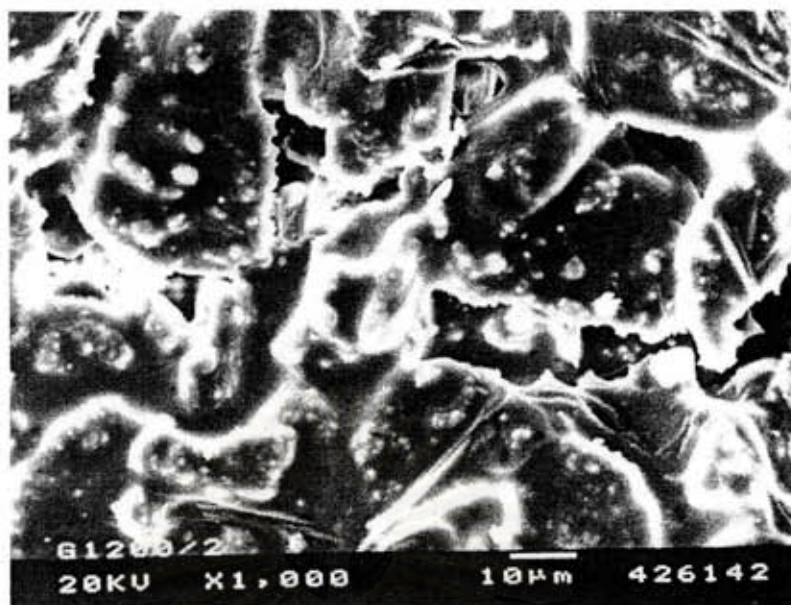
เวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด (ชั่วโมง)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	2.8
2	2.9
3	2.9

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร G ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1200 ° ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.62 พบว่ายังมีการยึดเกาะกันเพียงเล็กน้อย และยังมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุดเป็น 2 ชั่วโมง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.63 พบว่าอนุภาคมีการเชื่อมต่อกันมากขึ้น แต่ยังคงมีรูพรุนอยู่บ้าง และเมื่อเพิ่มเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุดเป็น 3 ชั่วโมง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคแสดงดังรูปที่ 4.64 พบว่ามีการเชื่อมต่อกันของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยที่อนุภาคของดินและทัลคัมมีการเชื่อมติดกัน มีรูพรุนเล็กน้อย ซึ่งจะมีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

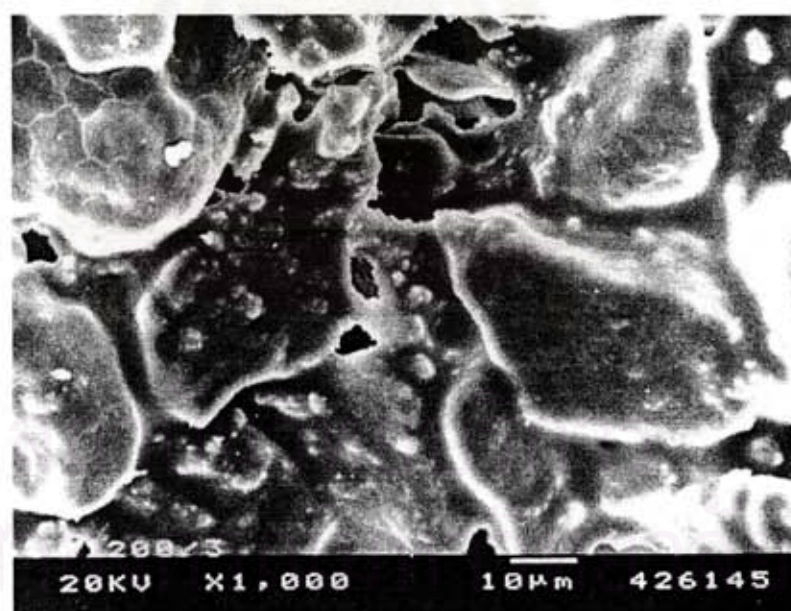


รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร G เผาที่อุณหภูมิ 1200 ° ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.63 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร G เฝ้าที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.64 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานสูตร G เฝ้าที่อุณหภูมิ 1200 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เมื่อทดลองแปรค่าอุณหภูมิในการเผาเป็น  $1250^{\circ}\text{C}$  และใช้เวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุดเป็น 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบค่าความทนแรงอัดกับชิ้นงานสูตรเดียวกันที่ใช้อุณหภูมิในการเผาเป็น  $1200^{\circ}\text{C}$  แสดงผลดังตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าความทนแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 3.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ส่วนค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะมีค่าเป็น 3.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 4.11 ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตร G

อุณหภูมิในการเผา ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความทนแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
1200	2.85
1250	3.14

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสูตร G ที่เผาที่อุณหภูมิ  $1250^{\circ}\text{C}$  แสดงดังรูปที่ 4.53 เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น การเชื่อมติดกันของอนุภาคก็จะมากขึ้นด้วย และปริมาณรูพรุนลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย

ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ จะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 88 – 90 ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ขายตามท้องตลาดที่มีความพรุนตัวอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 90

จากผลการทดลองนี้แสดงว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา และเพิ่มเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด ชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าความทนแรงอัดที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเตาเผาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ จึงทำการทดลองได้ถึงเพียงแค่อุณหภูมิ  $1250^{\circ}\text{C}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ผลการศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผลิตได้

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วนำไปทดสอบค่าความทนแรงอัด แสดงค่าดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานสูตรต่างๆ

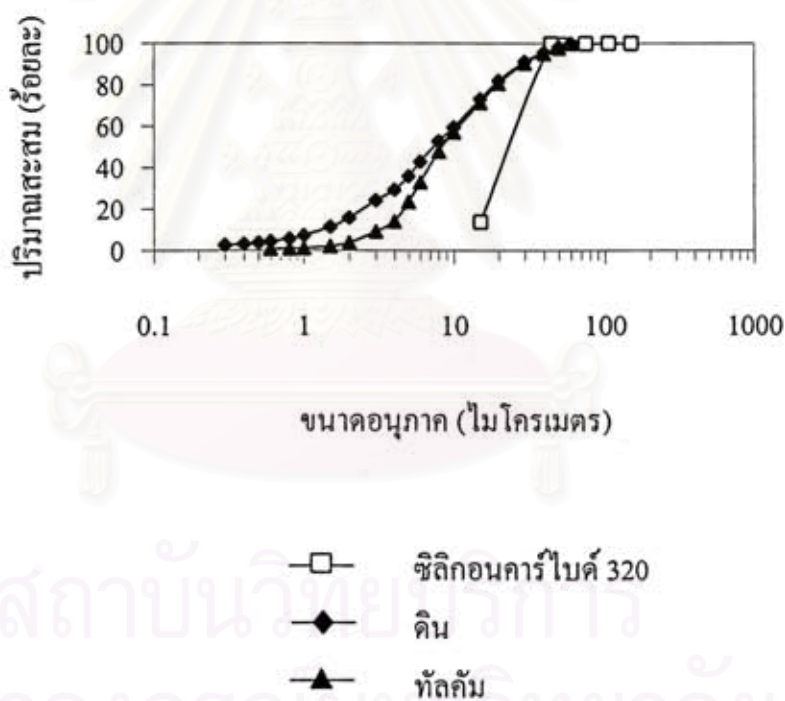
สูตร	ความทนแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
S	1.09
SG	1.36
G	3.14
GH	1.59
H	2.40

ชิ้นงานสูตร S ที่ประกอบด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กมีค่าความทนแรงอัดต่ำที่สุดคือ 1.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เพราะซิลิกอนคาร์ไบด์เกิดออกซิเดชัน จนบางส่วนกลายเป็นคริสโตบาไลต์ ดังจะเห็นได้จากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานหลังเผา และเมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer พบเฟสที่เป็นคริสโตบาไลต์ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่เข้าไปในส่วนผสม เป็นดังสูตร SG การเกิดออกซิเดชันจะลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่าน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่ได้กล่าวไปแล้ว และเมื่อวิเคราะห์ด้วย X-ray diffractometer พบเฟสที่เป็นคริสโตบาไลต์มีปริมาณลดลง ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความทนแรงอัดเพิ่มขึ้น มีค่าเป็น 1.36 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

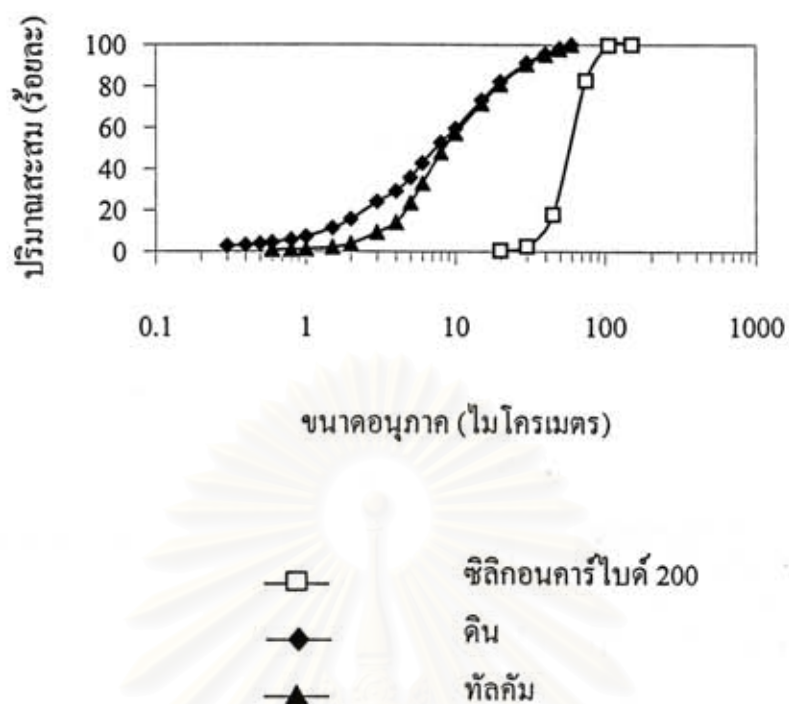
เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานสูตร G GH และ H ซึ่งใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ พบว่าชิ้นงานสูตร G ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 จะมีค่าความทนแรงอัดสูงที่สุดคือ 3.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอาจมีผลมาจากการซินเทอริงที่ดีกว่า เนื่องจากมีขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เล็กกว่าอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในชิ้นงานสูตร H ที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะพบว่าช่องว่างระหว่างเกรนจะแคบ ส่วนชิ้นงานสูตร GH ที่มีการผสมกันของซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 กับซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 และชิ้นงานสูตร H จะมีค่าความทนแรงอัดลดลงเป็น 1.59 และ 2.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

การที่ขึ้นงานสูตร H มีค่าความทนแรงอัดต่ำกว่าขึ้นงานสูตร G ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใช้ใหญ่มากเกินไป การขึ้นเทอร์ริงเกิดขึ้นไม่ดีเท่ากับขึ้นงานสูตร G ลักษณะช่องว่างระหว่างเกรนที่สังเกตเห็นได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะกว้างกว่า และน่าจะเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ใหญ่มากเกินไป ไม่อยู่ในช่วงเดียวกับขนาดอนุภาคของดินและทัลคัม ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการแน่นตัวที่เหมาะสม ลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของส่วนผสมตามสูตร G และ H แสดงดังรูปที่ 4.65 และรูปที่ 4.66

สำหรับขึ้นงานสูตร GH ซึ่งเป็นการผสมอนุภาคของ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 และ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 200 นั้น การผสมกันของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ทั้ง 2 ชนิด อาจจะยังไม่เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งจะให้เกิดการแน่นตัวที่ดี ดังนั้นค่าความทนแรงอัดที่ได้จึงต่ำกว่าสูตรอื่น



รูปที่ 4.65 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสูตร G ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนคาร์ไบด์ 320 ดิน และทัลคัม

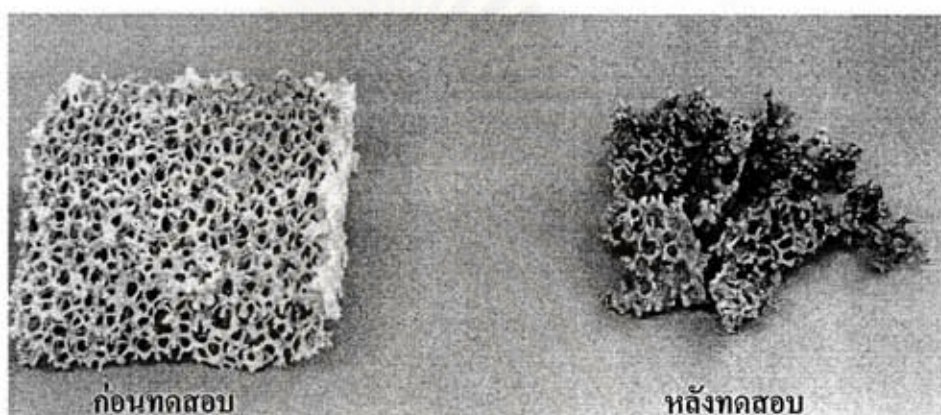


รูปที่ 4.66 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสูตร H ซึ่งประกอบด้วยซิลิกาอนุภาค 200 ดิน และทราย

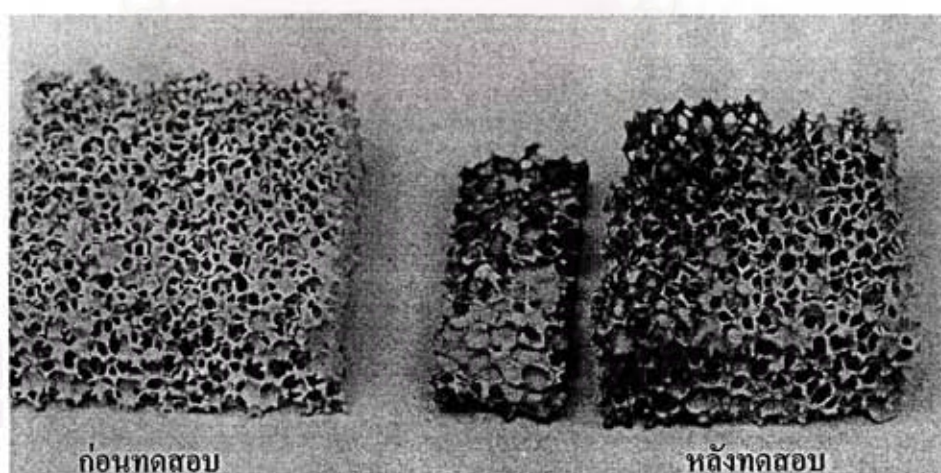
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5 ผลการทดลองใช้งานจริงในโรงงานหล่อโลหะ

เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบกับโลหะหลอมเหลว ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $1400^{\circ}\text{C}$  พบว่า ชิ้นงานสูตร S และ SG ที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กจะแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.67 และรูปที่ 4.68 ทั้งนี้เนื่องจากใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็กเกิดออกซิเดชัน ทำให้กลายเป็นคริสโตบาไลต์ ซึ่งจะขยายตัวที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C} - 270^{\circ}\text{C}$  และหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมินี้ (inversion temperature ระหว่าง แอลฟาคริสโตบาไลต์ กับ เบต้าคริสโตบาไลต์) <sup>(63)</sup>



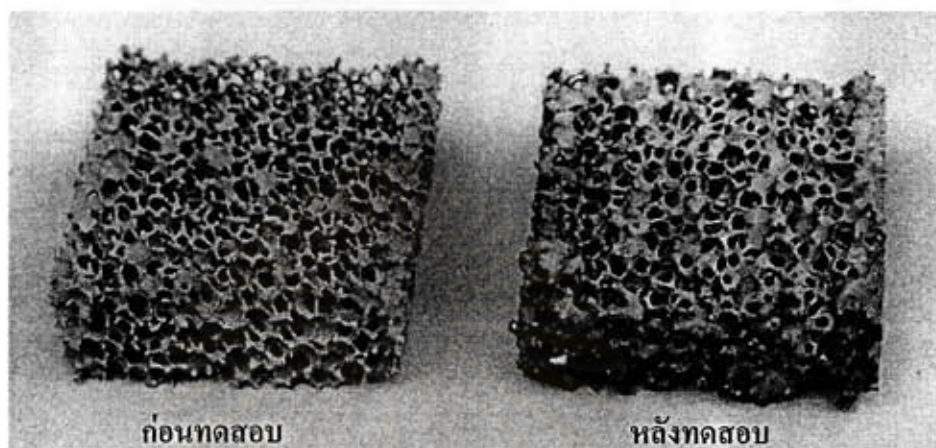
รูปที่ 4.67 ชิ้นงานสูตร S ก่อนและหลังการทดสอบกับโลหะหลอมเหลว



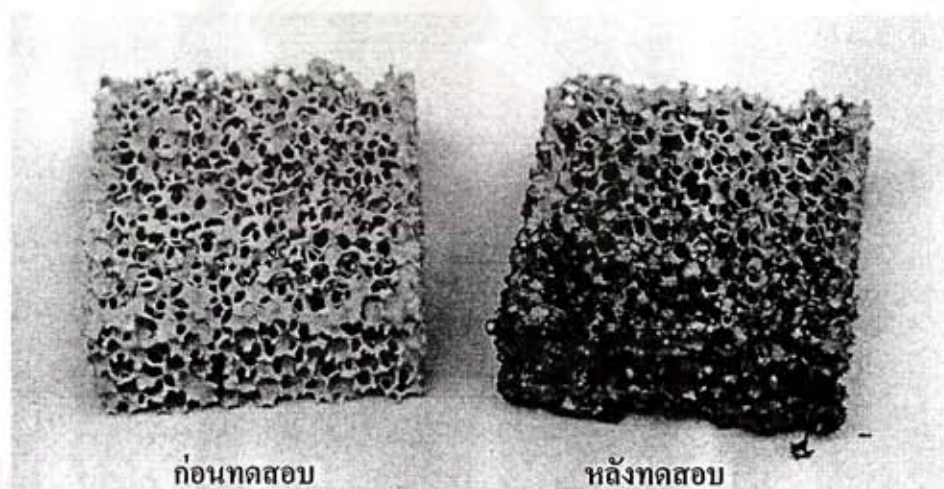
รูปที่ 4.68 ชิ้นงานสูตร SG ก่อนและหลังการทดสอบกับโลหะหลอมเหลว



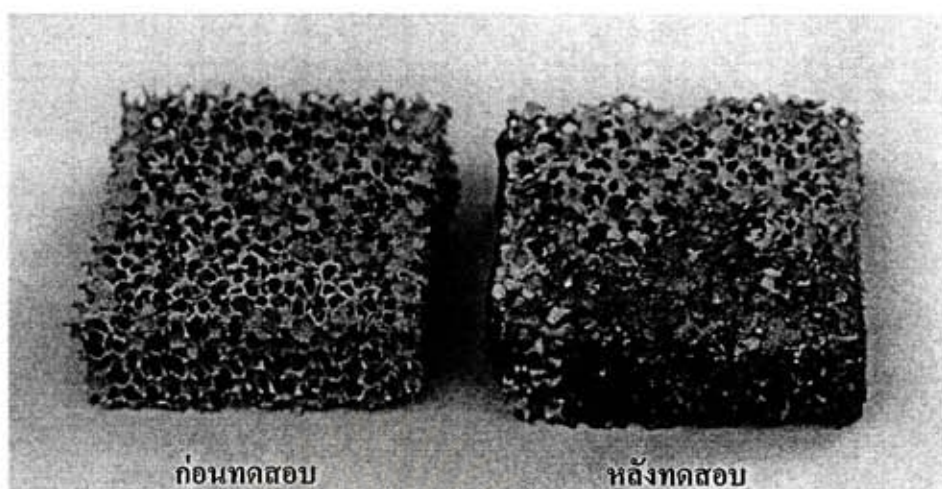
ส่วนชิ้นงานสูตร G GH และ H ดังแสดงในรูปที่ 4.69 - รูปที่ 4.71 จะสามารถทนต่อโลหะหลอมเหลวและคงรูปอยู่ได้ภายหลังการทดสอบ เนื่องจากมีส่วนประกอบของคอเดิลไรต์ที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี (high thermal shock resistance)



รูปที่ 4.69 ชิ้นงานสูตร G ก่อนและหลังการทดสอบกับโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 4.70 ชิ้นงานสูตร GH ก่อนและหลังการทดสอบกับโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 4.71 ชิ้นงานสูตร H ก่อนและหลังการทดสอบกับโลหะหลอมเหลว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาการขึ้นรูปชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดที่มีรูพรุนได้ โดยใช้วิธี Polymeric Sponge จากการเลือกใช้ฟองน้ำพอลิเมอร์ชนิดพอลิยูรีเทน ซึ่งมีจำนวนรูพรุนประมาณ 8 - 10 รูต่อความยาว 1 นิ้ว และมีลักษณะเป็นรูพรุนที่สม่ำเสมอ สเตอริที่เตรียมได้จะมีส่วนประกอบคือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมิเนียมฟอสเฟต ดิน และทัลคัม

ชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนจะสามารถคงรูปอยู่ได้เมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมฟอสเฟตในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 2.9 ส่วน ต่อ ซิลิกอนคาร์ไบด์ 100 ส่วน และพบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อเติมดินและทัลคัม

นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ มีผลต่อการเผาขึ้นเทอร์ริงและสมบัติของชิ้นงานหลังเผา คือ ถ้าเป็นชิ้นงานที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก ( ขนาดอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตร ) เมื่อทำการเผา จะเกิดออกซิเดชัน ทำให้ชิ้นงานหลังเผามีเฟสคริสโตบาไลต์ผสมอยู่ และเป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ ส่วนชิ้นงานที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดใหญ่ ( ขนาดอนุภาคประมาณ 26 - 60 ไมโครเมตร ) จะพบเฟสที่เป็นคอเดียวไรต์ซึ่งสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี

เมื่อนำชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดที่มีรูพรุนที่เตรียมได้ ไปทดสอบกับโลหะหลอมเหลว ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 1400 ° ซ ชิ้นงานที่ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดใหญ่จะสามารถทนต่อความร้อนขณะสัมผัสกับโลหะหลอมเหลว และคงรูปอยู่ได้ภายหลังการทดสอบ

ค่าความทนแรงอัดของชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีรูพรุนที่เตรียมได้มีค่าสูงสุด ประมาณ 3.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้จากการเผาชิ้นงานที่ใช้อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดประมาณ 26 ไมโครเมตรเพียงชนิดเดียวโดยไม่ได้ผสมรวมกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดอื่นๆ ในปริมาณร้อยละ 72.9 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมฟอสเฟตร้อยละ 2.1 โดยน้ำหนัก ดินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และทัลคัมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมสเตอริให้มีปริมาณของแข็งร้อยละ 70 และมีค่าความหนืดเป็น 18 พอยซ์ เผาที่อุณหภูมิ 1250 ° ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ได้จะมีความพรุนตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 88 - 90 และจากการทดลองนี้จะพบว่า ค่าความทนแรงอัดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น และเวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น

แนวทางการพัฒนาชิ้นงานซิลิกอนคาร์ไบด์ชนิดที่มีรูพรุนต่อไปในอนาคต ควรจะทดลองเตรียมโดยใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และทำการทดลองผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ กันประมาณ 2 - 3 ชนิด เพื่อให้เกิดการแน่นตัว และทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รวมทั้งทดลองทำการเผาชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิสูง ประมาณ  $1300^{\circ}\text{C}$  -  $1500^{\circ}\text{C}$  นอกจากนั้นควรจะทำการศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งสามารถทำให้ชิ้นงานคงรูปอยู่ได้ โดยไม่ต้องใช้อะลูมิเนียมฟอสเฟต เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดมลพิษ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, p.181. New York: Weinheim, 1994.
2. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, p.202. New York: Weinheim, 1994.
3. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, p.203. New York: Weinheim, 1994.
4. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics : Technical Scale Production. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, pp.201-203. New York: Weinheim, 1994.
5. Prochazka, S.; and Scanlan, R. M. Effect of boron and carbon on sintering of silicon carbide. J. Am. Ceram. Soc. 58 (January-February 1975) : 72.
6. Wei, G. C. Comm. Amer. Ceram. Soc. (1983): C-111 - C-113.
7. Prener, J. S. U.S. Patent 3,085,863. (1960).
8. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics : Organometallic Precursors. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, pp.203-206. New York: Weinheim, 1994.
9. Yajima, S.; Okamura, K.; Hasegawa, Y.; Iwai, T.; and Yamamura, T. J. Mater. Sci. 16 (1981) :1349.
10. Schilling, C. L.; Wesson, J. P.; and Williams, T. C. Am. Ceram Soc. Bull. 62 (1983) : 912.

11. Rainer T. Boride and Carbide Ceramics : Preparation of Silicon Carbide. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, pp.201-206. New York: Weinheim, 1994.
12. Venkateswaran, V.; Halstead, J. M.; and Mehosky, B. Synthesis of high-purity sinterable silicon carbide powders. In Proc. of the 23 rd Automotive Technology Development Contractors' Coordination Meeting, pp. 185-190. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA: 1985.
13. Halstead, J. M.; Venkateswaran, V.; and Mehosky, B. SiC powder synthesis. Presented at the 24 th Automotive Technology Development Contractors' Coordination Meeting, Dearborn, Mich, 1986.
14. Strepkoff, S. U.S. Patent 3,755,541. (1973).
15. Boecker W. D. G. German Patent 27,44,636. (1977).
16. White, D. A.; Oleff, S.; Boyer, R. D.; Budinger, P. A.; and Fox, J. R. Preparation of silicon carbide from organosilicon gels: I, Synthesis and characterization of precursor gels. Adv. Cer. Matts. 2 ( January 1987 ) : 45 - 52.
17. White, D. A.; Oleff, S.; and Fox, J. R. Preparation of silicon carbide from organosilicon gels : II, Gel pyrolysis and SiC characterization. Adv. Cer. Matts. 2 ( January 1987 ) : 53 - 59.
18. Popper, P., eds. Special Ceramics, British Ceramic Research Association, Stoke-on-Trent. p 209. London: Heywood , (1960).
19. Taylor, K. M. U.S. Patent 3,205,043. (1965).
20. Weaver, G. Q.; and Olsan, B. A. U.S. Patent 4,019,913. (1977).
21. Forrest, C. W.; Kennedy, P.; and Shennan, J. V. The fabrication and properties of self-bonded silicon carbide bodies. In Special Ceramics, vol. 5, pp. 99-123. British Ceramics Research Association, 1972.
22. Fitschmun, D. R. U.S. Patent 3,947,550. (1976).

23. Srinivasan, M. The Silicon Carbide Family of Structure Ceramics. In Wachtman, J. B. (eds) Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 29, Structural Ceramics, p.108. CA:Academic Press Inc., 1989.
24. Alliergro, R.; Coffin, L. B.; and Tinkepaugh, J. R. Pressure-sintered silicon carbide. J. Amer. Ceram. Soc. 39 ( November 1956 ) : 386 - 389.
25. Böcker, W.; Landfermann, R. H.; and Hausner, H. Sintering of alpha silicon carbide with addition of aluminum. Powder Met. Int. II ( February 1979 ) : 83 - 85.
26. Coppola, J. A.; Hailey, L. N.; and McMurtry, C.H. U.S. Patent 4, 312, 954. (1982).
27. Prochazka, S.; and Scanlan, R. M. Effect of boron and carbon on sintering of silicon carbide. J.Am. Ceram. Soc. 58 ( January-February 1975 ) : 72.
28. Prochazka, S.; and Coblenz, W. S. U.S. Patent 4, 081, 282. (1978).
29. Suzuki, K.; Ono, T., and Shino hara, N. U.S.Patent 4, 354, 991. (1982).
30. Böcker, W.; and Hausner, H. The influence of boron and carbon additions on the microstructure of sintered alpha silicon carbide. Powder Met. Int. 10 (1978) : 87-89.
31. Schwetz, K. A.; and Lipp, A. U.S. Patent 4, 230,497. (1980).
32. Murate, Y.; and Weber, G. U.S. Patent 4, 327,186. (1982).
33. Wearer, G. Q. U.S. Patent 4, 320, 204. (1982).
34. Hollenbergy, G.W.; and Crane, R. L. U.S. Patent 3, 966, 855. (1976).
35. Yamada, K.; Mouri, M., and Nomura, Y. U.S. Patent 4, 562, 040. ( 1985).
36. Lee, M.; and Szala, L. U.S. Patent 4, 353, 963. (1982).
37. Saggio – Woyansky, J.; Scott, C.; and Minnear, W. P. Processing of Porous Ceramics. Am. Ceram Soc. Bull. 71 ( November 1992 ) : 1674-1682.
38. Schwartzwalder, K.; and Somers, A. V. U.S. Patent 3, 090, 094. (1963).
39. Brockmeyer, J. W.; Aubrey, L. S.; and Dore, J. E. U.S. Patent 4, 885, 263. (1989).
40. Pryor, M. J.; and Gray, T. J. U.S. Patent 4, 056, 586. (1977).
41. Blake-Coleman, B., and Clarke, D. U.S. Patent 4, 904, 394, (1990).

42. Yarwood, J.C.; Dore, J.E.; and Preuss, R.K. U.S. Patent 4, 075, 303. (1978).
43. Brockmeyer, J.W. U. S. Patent 4, 610, 832. (1986).
44. Brockmeyer, J.W. U. S. Patent 4, 343, 704. (1982).
45. Holland, I. J. U.S. Patent 3, 097, 930. (1963).
46. Ravault, F. E. G. U.S. Patent 3, 907, 579. (1975).
47. Pryor, M. J.; and Gray, T. J. U.S. Patent 3, 093, 917. (1975).
48. Minnear, W. P. Processing of Foamed Ceramics. In Cima, M. J. (eds), Ceramic Transaction, Vol 26, Foaming Science and Technology for Ceramics, pp. 149-156. American Ceramic Society, OH: Westerville, 1992.
49. Prodan, F.; Comanescu, I.; and Popescu, N. Porous Corundum ceramics used as carrier of oxidation catalyst. Interceram. 36 (1987) : 38 - 42.
50. Yanagisawa, K.; Loku, K.; and Yamasaki, N. Pore size control of porous silica ceramic by hydrothermal hot pressing. J. Ceram. Soc. Jpn. 102 (1994) : 968-972.
51. Loku, K. *et.al.* Preparation of porous apatite ceramics by hydrothermal hot pressing method. J. Am. Ceram. Soc. 79 (1996) : 2771-2774.
52. Pereda, D. S. *et al.* Fabrication of porous alumina by hot isostatic pressing. In Bannister, M. J. (eds), Proceeding of the International Ceramic Conference Australia, pp. 412-417. Australia, 1992.
53. Arita, I. H.; and Castano, V. M. Synthesis and processing of hydroxyapatite ceramic tape with controlled porosity. J. Mat. Sci. : Mater. Med. 6 (1995) : 19 - 23.
54. Sheppard, L. M. Porous Ceramic : processing and applications. In Ishizaki *et al.* (eds), Ceramic Transactions, Vol. 31, Porous Materials, p. 3. American Ceramic Society, OH: Westerville, 1993.
55. Kawase, M.; Kamiya, Y.; and Kaneto, M. Porous Ceramic Carrier for Bioreactor. In Ishizaki *et al.* (eds), Ceramic Transactions, Vol. 31, Porous Materials, pp. 391-400. American Ceramic Society, OH: Westerville, 1993.



56. Sheppard, L. M. Corrosion-Resistant Ceramics for Severe Environments. Am. Ceram. Soc. Bull. 70 ( July 1991 ) : 1146 - 1160.
57. Sheppard, L. M. Molten Metal Filtration. In Ishizaki *et al.* (eds), Ceramic Transactions, Vol. 31, Porous Materials, pp. 5-6. American Ceramic Society, OH: Westerville, 1993.
58. Reed J. S. Principle of Ceramic Processing, Second Edition; New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
59. George, W. A.; Ayakairu and Yusto Kaahwa. Phase Transitions in Local Clays. Am. Ceram. Soc. Bull. 77(1998) : 76-78.
60. Goldstein, J. I. *et al.* Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, New York: Plenum Press, 1992.
61. Lowell, S.; and Shield, J. E. Powder Surface Area and Porosity, Third Edition, Padstow, Cornwall: T. J. Press Ltd, 1991.
62. Cullity, B.D. Elements of X-ray Diffraction, Second Edition, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publish Company, Inc., 1978.
63. Cawley J. D.; and Lee W. E. Oxide Ceramics. In Cahn R. W.; Haasen P.; and Kramer E. J. (eds), Materials Science and Technology, Vol. 11, Structure and Properties of Ceramics, p.68. New York: Weinheim, 1994.

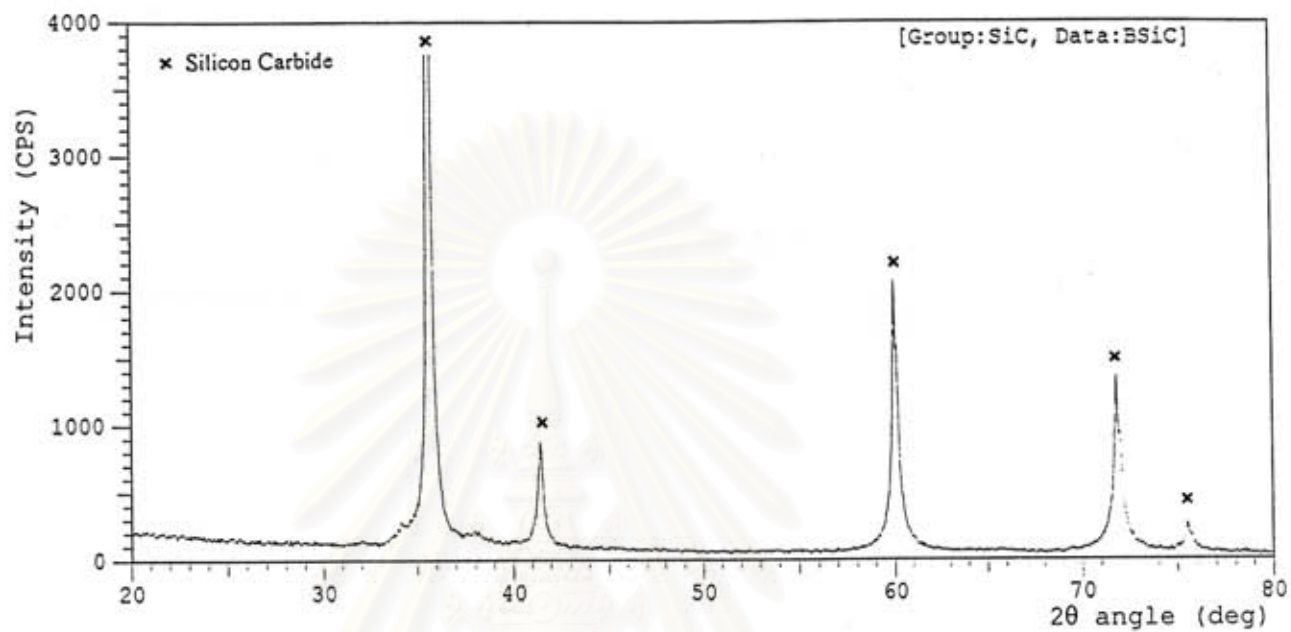


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

กราฟ XRD ของเบต้าซิลิกอนคาร์ไบด์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## การวัดมาตรฐาน JCPDS

29-1127						Wavelength= 1.54056						C	
SiC	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l			
Silicon Carbide	33.549	25	1	0	0	119.987	4	3	0	0			
	34.756	100	1	0	1	126.054	8	2	1	6			
	35.670	65	0	0	4	133.425	5	3	0	4			
	38.150	94	1	0	2	147.030	3	2	0	10			
Moissanite-4H, syn	43.297	16	1	0	3								
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54178 Filter:	d-sp: Calculated					49.774	7	1	0	4			
Cut off:	Int.: Calculated	I/cor.:				57.295	20	1	0	5			
Ref: Bind, J., Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1977)						59.994	47	1	1	0			
						65.712	32	1	0	6			
						70.521	2	2	0	0			
						71.233	8	2	0	1			
Sys.: Hexagonal	S.G.: P6 <sub>3</sub> mc (186)					71.783	30	1	1	4			
a: 3.081	b:	c: 10.061	A:	C: 3.2655		73.347	10	2	0	2			
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		74.988	4	1	0	7			
Ref: Hannam, Shaffer, J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)						75.534	2	0	0	8			
						76.821	2	2	0	3			
						87.678	4	2	0	5			
						95.079	7	2	0	6			
Dx: 3.220	Dm:	SS/FOM: F <sub>27</sub> = 51 (.0108, 49)					100.263	4	2	1	1		
						102.310	5	2	1	2			
Color: Yellow, black						104.483	3	1	1	8			
Peak height intensity. Wurtzite group, moissanite subgroup.						109.816	5	1	0	10			
PSC: hP8. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 82.71.						117.355	3	2	1	5			



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-1127						Wavelength= 1.54184						C	
SiC	d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l			
Silicon Carbide	2.669	25	1	0	0	.8895	4	3	0	0			
	2.579	100	1	0	1	.8643	8	2	1	6			
	2.515	65	0	0	4	.8386	5	3	0	4			
	2.357	94	1	0	2	.8033	3	2	0	10			
Moissanite-4H, syn	2.088	16	1	0	3								
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54178 Filter:	d-sp: Calculated					1.8304	7	1	0	4			
Cut off:	Int.: Calculated	I/cor.:				1.6067	20	1	0	5			
Ref: Bind, J., Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1977)						1.5407	47	1	1	0			
						1.4198	32	1	0	6			
						1.3343	2	2	0	0			
						1.3227	8	2	0	1			
Sys.: Hexagonal	S.G.: P6 <sub>3</sub> mc (186)					1.3139	30	1	1	4			
a: 3.081	b:	c: 10.061	A:	C: 3.2655		1.2897	10	2	0	2			
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		1.2655	4	1	0	7			
Ref: Hannam, Shaffer, J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)						1.2577	2	0	0	8			
						1.2398	2	2	0	3			
						1.1121	4	2	0	5			
						1.0441	7	2	0	6			
Dx: 3.220	Dm:	SS/FOM: F <sub>27</sub> = 51 (.0108, 49)					1.0036	4	2	1	1		
						.98	5	2	1	2			
Color: Yellow, black						.9743	3	1	1	8			
Peak height intensity. Wurtzite group, moissanite subgroup.						.9414	5	1	0	10			
PSC: hP8. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 82.71.						.9017	3	2	1	5			



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-1129		Wavelength= 1.54184				
SiC		2 $\theta$	Int	h	k	l
Silicon Carbide		35.627	100	1	1	1
		41.419	20	2	0	0
		60.032	35	2	2	0
Moissanite-3C, syn		71.846	25	3	1	1
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54178	Filter: Mono	d-sp:	75.565	5	2	2
Cut off:	Int.: Diffract.	I/cor.:	90.100	5	4	0
			100.887	10	3	3
Ref: Bind, J., Penn State Univ., University Park, PA, USA, ICDD			104.530	5	4	2
Grant-in-Aid, (1977)			120.152	5	4	2
			133.614	5	5	1
Sys.: Cubic	S.G.: F $\bar{4}3m$ (216)					
a: 4.3589	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 3.216	Dm:	SS/FOM: F $_{10}$ = 38 (0.027, 10 )				
Color: Greenish yellow						
Specimen from PPG Industries, Inc., Submicron SiC - lot no. 373-652. CAS #: 409-21-2. Described by Regis, A., Sand, L., Bull. Geol. Soc. Am., 69 1633 (1958). S Zn type.						
Sphalerite group, sphalerite subgroup. Silicon used as an internal stand. PSC: cF8. To replace 1-1119. Mwt: 40.10.						
Volume[CD]: 82.82.						



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-1129		Wavelength= 1.54184				
SiC		d(A)	Int	h	k	l
Silicon Carbide		2.52	100	1	1	1
		2.18	20	2	0	0
		1.5411	35	2	2	0
Moissanite-3C, syn		1.3140	25	3	1	1
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54178	Filter: Mono	d-sp:	1.2583	5	2	2
Cut off:	Int.: Diffract.	I/cor.:	1.0893	5	4	0
			.9999	10	3	3
Ref: Bind, J., Penn State Univ., University Park, PA, USA, ICDD			.9748	5	4	2
Grant-in-Aid, (1977)			.8895	5	4	2
			.8387	5	5	1
Sys.: Cubic	S.G.: F $\bar{4}3m$ (216)					
a: 4.3589	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 3.216	Dm:	SS/FOM: F $_{10}$ = 38 (0.027, 10 )				
Color: Greenish yellow						
Specimen from PPG Industries, Inc., Submicron SiC - lot no. 373-652. CAS #: 409-21-2. Described by Regis, A., Sand, L., Bull. Geol. Soc. Am., 69 1633 (1958). S Zn type.						
Sphalerite group, sphalerite subgroup. Silicon used as an internal stand. PSC: cF8. To replace 1-1119. Mwt: 40.10.						
Volume[CD]: 82.82.						



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-1131		Wavelength= 1.54184			
$\alpha$ -SiC	2 $\theta$	Int	h	k	l
Silicon Carbide	34.211	40	1	0	1
	35.759	100	1	0	2
	38.267	20	1	0	3
Moissanite-6H, syn	41.539	10	1	0	4
	60.208	35	1	1	0
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.54056 Filter:	d-sp: Debye-S. 114.6	65.867	15	1	0
Cut off:	Int.: Film	I/cor.:	72.036	40	1
Ref: Hannam, Shaffer, J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)			73.664	15	2
			75.728	7	0
			90.343	15	2
			95.437	7	2
Sys.: Hexagonal	S.G.: P6 <sub>3</sub> mc (186)	100.322	15	2	1
a: 3.073	b:	c: 15.08	A:	C: 4.9073	104.850
					120.580
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 6	mp:	126.741
Ref: Thibault, N., Am. Mineral., 29, 327 (1944)					134.161
					147.944

Dx: 3.239 Dm: 3.218 SS/FOM: F<sub>17</sub> = 13 (.0186, 73 )

$\omega$ :  $\eta\omega\beta$ : 2.648(1)  $\epsilon\gamma$ : 2.691(2) Sign:+ 2V:

Ref: Ibid.

Color: Yellow, black

CAS #: 409-21-2. I/11 corrected for tungsten carbide contamination. C Si type. Wurtzite group, moissanite subgroup. PSC: hP12. To replace 22-1273 and validated by calculated patterns 29-1128 and 31-1232. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 123.33.



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-1131		Wavelength= 1.54184			
$\alpha$ -SiC	d(A)	Int	h	k	l
Silicon Carbide	2.621	40	1	0	1
	2.511	100	1	0	2
	2.352	20	1	0	3
Moissanite-6H, syn	2.174	10	1	0	4
	1.537	35	1	1	0
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.54056 Filter:	d-sp: Debye-S. 114.6	1.418	15	1	0
Cut off:	Int.: Film	I/cor.:	1.311	40	1
Ref: Hannam, Shaffer, J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)			1.286	15	2
			1.256	7	0
			1.087	15	2
			1.042	7	2
Sys.: Hexagonal	S.G.: P6 <sub>3</sub> mc (186)	1.004	15	2	1
a: 3.073	b:	c: 15.08	A:	C: 4.9073	.9727
					.8876
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 6	mp:	.8624
Ref: Thibault, N., Am. Mineral., 29, 327 (1944)					.83
					.8021

Dx: 3.239 Dm: 3.218 SS/FOM: F<sub>17</sub> = 13 (.0186, 73 )

$\omega$ :  $\eta\omega\beta$ : 2.648(1)  $\epsilon\gamma$ : 2.691(2) Sign:+ 2V:

Ref: Ibid.

Color: Yellow, black

CAS #: 409-21-2. I/11 corrected for tungsten carbide contamination. C Si type. Wurtzite group, moissanite subgroup. PSC: hP12. To replace 22-1273 and validated by calculated patterns 29-1128 and 31-1232. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 123.33.



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

39-1196					Wavelength= 1.54184					C
SIC	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Silicon Carbide	33.764	48u	1	0	1	96.540	10	2	0	23
	34.022	u	0	1	2	97.740	5	1	0	34
	35.037	78	1	0	4	100.845	u	2	1	4
Moissanite-15R, syn	35.725	100u	0	0	15	101.096	10u	0	1	35
	35.781	u	0	1	5	101.193	u	0	2	25
	37.703	68	1	0	7	101.291	10u	1	2	5
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.5418	Filter:	d-sp: Calculated				103.200	10	1	2	8
Cut off:	Int.: Calculated	I/cor.:				108.234	14	1	0	37
Ref: Hannam, A., Shaffer, P., J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)						112.054	8	0	1	38
						120.399	u	1	0	40
						120.625	29u	1	2	20
Sys.: Rhombohedral	S.G.: R3m (160)					120.693	u	3	0	0
a: 3.073	b:	c: 37.70	A:	C: 12.2681						
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 15	mp:						
Ref: Shaffer, P., Acta Crystallogr., Sec. B, 25, 477 (1969)						60.157	86u	0	1	20
						60.230	u	1	1	0
						64.702	32	1	0	22
						67.063	24	0	1	23
						71.973	55u	1	0	25
						72.042	u	1	1	15
						72.074	55u	2	0	5
Dx: 3.239	Dm:	SS/FOM: F <sub>30</sub> = 173(.0025, 69)				73.279	13	0	2	7
						75.686	u	0	0	30
						75.820	6u	0	2	10
Polytype 15R. C Si type. PSC: hR10. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 308.32.						88.470	5	0	2	19
						94.363	17	0	2	22



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

39-1196					Wavelength= 1.54184					C
SIC	d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l
Silicon Carbide	2.6547	48u	1	0	1	1.0330	10	2	0	23
	2.6351	u	0	1	2	1.0235	5	1	0	34
	2.5611	78	1	0	4	1.0002	u	2	1	4
Moissanite-15R, syn	2.5133	100u	0	0	15	.9984	10u	0	1	35
	2.5095	u	0	1	5	.9977	u	0	2	25
	2.3859	68	1	0	7	.99	10u	1	2	5
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.5418	Filter:	d-sp: Calculated				.9837	10	1	2	8
Cut off:	Int.: Calculated	I/cor.:				.9515	14	1	0	37
Ref: Hannam, A., Shaffer, P., J. Appl. Crystallogr., 2, 45 (1969)						.9296	8	0	1	38
						.8884	u	1	0	40
						.8874	29u	1	2	20
Sys.: Rhombohedral	S.G.: R3m (160)					.8871	u	3	0	0
a: 3.073	b:	c: 37.70	A:	C: 12.2681						
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 15	mp:						
Ref: Shaffer, P., Acta Crystallogr., Sec. B, 25, 477 (1969)						1.5382	86u	0	1	20
						1.5365	u	1	1	0
						1.4407	32	1	0	22
						1.3956	24	0	1	23
						1.3120	55u	1	0	25
						1.3109	u	1	1	15
						1.3104	55u	2	0	5
Dx: 3.239	Dm:	SS/FOM: F <sub>30</sub> = 173(.0025, 69)				1.2918	13	0	2	7
						1.2566	u	0	0	30
						1.2547	6u	0	2	10
Polytype 15R. C Si type. PSC: hR10. Mwt: 40.10. Volume[CD]: 308.32.						1.1051	5	0	2	19
						1.0510	17	0	2	22



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

39-1425		Wavelength= 1.54056								
SiO <sub>2</sub>	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Silicon Oxide	21.984	100	1	0	1	78.018	<1	4	0	1
	25.319	<1	1	1	0	79.392	1	4	1	0
	28.438	8	1	1	1	81.147	1	3	2	3
Cristobalite, syn	31.461	9	1	0	2	81.860	<1	2	1	5
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.540598 Filter: Graph Mono d-sp: Diff.	36.079	13	2	0	0	82.881	<1	3	1	4
Cut off: 17.7 Int.: Diffract. I/cor.:	36.380	4	1	1	2	83.617	<1	3	3	1
Ref: Wong-Ng, W., McMurdie, H., Paretzkin, B., Hubbard, C., Dragoo, A., NBS, Gaithersburg, MD, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1988)	38.409	<1	2	0	1	87.837	<1	3	3	2
	42.655	2	2	1	1	89.117	1	4	2	1
	44.842	2	2	0	2	89.277	1	1	1	6
	47.062	4	1	1	3					
	48.610	4	2	1	2					
Sys.: Tetragonal S.G.: P4 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 (92)	51.939	<1	2	2	0					
a: 4.9732(4) b: c: 6.9236(8) A: C: 1.3922	52.868	<1	0	0	4					
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 4 mp:	54.155	2	2	0	3					
Ref: Wong-Ng, W et al., Powder Diffraction, 3, 253 (1988)	56.218	<1	1	0	4					
	57.082	3	3	0	1					
	57.506	1	2	1	3					
	58.678	<1	3	1	0					
	58.868	<1	2	2	2					
Dx: 2.331 Dm: SS/FOM: F <sub>30</sub> = 84 (.0100, 36 )	60.302	2	3	1	1					
Color: Colorless	62.017	2	3	0	2					
The temperature was ~25 C. Cristobalite was prepared by the Trans Tech Company using Berkeley 5 micron MIN-U-SIL(R). A two kilogram sample was heated at 1600 C for eight hours. The sample was then air quenched, treated with 6N HCl and then jet-milled. The +325 mesh fraction was then removed by sieving. There are a number of other forms of Si O <sub>2</sub> . The structure was determined by Peacor (1). O <sub>2</sub> Si type. Tungsten, fluorophlogopite used as an internal stands. PSC: tP12. To replace 11-695 and validated by calculated pattern. Mwt: 60.08. Volume[CD]: 171.24.	65.100	2	3	1	2					
	65.648	1	2	0	4					
	66.811	1	2	2	3					
	68.674	2	2	1	4					
	69.418	<1	3	2	1					
	69.788	<1	3	0	3					
	70.540	1	1	0	5					
	72.688	1	3	1	3					
	73.906	1	3	2	2					
	77.310	<1	2	2	4					



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

39-1425		Wavelength= 1.54056								
SiO <sub>2</sub>	d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l
Silicon Oxide	4.0397	100	1	0	1	1.2237	<1	4	0	1
	3.5147	<1	1	1	0	1.2059	1	4	1	0
	3.1359	8	1	1	1	1.1842	1	3	2	3
Cristobalite, syn	2.8411	9	1	0	2	1.1757	<1	2	1	5
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.540598 Filter: Graph Mono d-sp: Diff.	2.4874	13	2	0	0	1.1638	<1	3	1	4
Cut off: 17.7 Int.: Diffract. I/cor.:	2.4675	4	1	1	2	1.1554	<1	3	3	1
Ref: Wong-Ng, W., McMurdie, H., Paretzkin, B., Hubbard, C., Dragoo, A., NBS, Gaithersburg, MD, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1988)	2.3417	<1	2	0	1	1.1105	<1	3	3	2
	2.1179	2	2	1	1	1.0978	1	4	2	1
	2.0195	2	2	0	2	1.0962	1	1	1	6
	1.9293	4	1	1	3					
	1.8714	4	2	1	2					
Sys.: Tetragonal S.G.: P4 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 (92)	1.7590	<1	2	2	0					
a: 4.9732(4) b: c: 6.9236(8) A: C: 1.3922	1.7303	<1	0	0	4					
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 4 mp:	1.6922	2	2	0	3					
Ref: Wong-Ng, W et al., Powder Diffraction, 3, 253 (1988)	1.6348	<1	1	0	4					
	1.6121	3	3	0	1					
	1.6013	1	2	1	3					
	1.5720	<1	3	1	0					
	1.5674	<1	2	2	2					
Dx: 2.331 Dm: SS/FOM: F <sub>30</sub> = 84 (.0100, 36 )	1.5335	2	3	1	1					
Color: Colorless	1.4952	2	3	0	2					
The temperature was ~25 C. Cristobalite was prepared by the Trans Tech Company using Berkeley 5 micron MIN-U-SIL(R). A two kilogram sample was heated at 1600 C for eight hours. The sample was then air quenched, treated with 6N HCl and then jet-milled. The +325 mesh fraction was then removed by sieving. There are a number of other forms of Si O <sub>2</sub> . The structure was determined by Peacor (1). O <sub>2</sub> Si type. Tungsten, fluorophlogopite used as an internal stands. PSC: tP12. To replace 11-695 and validated by calculated pattern. Mwt: 60.08. Volume[CD]: 171.24.	1.4316	2	3	1	2					
	1.4210	1	2	0	4					
	1.3990	1	2	2	3					
	1.3656	2	2	1	4					
	1.3527	<1	3	2	1					
	1.3465	<1	3	0	3					
	1.3339	1	1	0	5					
	1.2997	1	3	1	3					
	1.2813	1	3	2	2					
	1.2331	<1	2	2	4					



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30



15-0776						Wavelength= 1.54184					
Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>						Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>					
Aluminum Silicate						Aluminum Silicate					
	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l	
	16.446	50	1	1	0	65.555	4	2	5	0	
	23.574	8	2	0	0	66.577	8	5	2	0	
	25.993	95	1	2	0	67.194	<2	1	1	2	
	26.289	100	2	1	0	69.683	6u	2	0	2	
	30.986	20	0	0	1	69.872	u	4	4	0	
	33.257	40	2	2	0	70.509	12	1	5	1	
	35.309	50	1	1	1	70.912	5u	1	2	2	
	37.025	14	1	3	0	71.059	u	2	1	2	
	37.587	<2	3	1	0	71.644	4	5	1	1	
	39.026	4	0	2	1	71.973	3	3	5	0	
	39.310	20	2	0	1	72.717	4	5	3	0	
	40.909	60	1	2	1	73.973	7	0	6	0	
	42.627	25	2	3	0	74.263	13	2	5	1	
	42.946	8	3	2	0	74.653	6	2	2	2	
	46.099	2	2	2	1	75.235	12	5	2	1	
	47.268	2	0	4	0	75.629	<2	6	0	0	
	48.227	8	4	0	0	76.912	6	1	3	2	
	48.888	<2	1	4	0	77.258	2	3	1	2	
	49.511	10	3	1	1	78.389	2	4	4	1	
	50.857	<2	3	3	0	78.914	<2	2	6	0	
	53.509	6	2	4	0	80.561	4	2	3	2	
	53.931	14	3	2	1	81.127	3	5	3	1	
	54.141	10	4	2	0	84.580	<2	4	0	2	
	57.613	20	0	4	1	87.092	1	2	6	1	
	58.465	12	4	0	1	88.662	4	2	4	2	
	59.048	2	1	4	1	89.183	5	4	2	2	
	59.818	2	4	1	1	93.919	<2	2	7	0	
	60.767	35	3	3	1	98.556	4	1	7	1	
	61.549	<2	1	5	0	99.070	4	2	5	2	
	62.732	<2	5	1	0	99.982	8	3	7	0	
	63.112	<2	2	4	1						
	63.720	8	4	2	1						
	64.631	18	0	0	2						
Sys.: Orthorhombic S.G.: Pbam (55)											
a: 7.5456 b: 7.6898 c: 2.8842 A: 0.9812 C: 0.3751											
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: .75 mp:											
Ref: Ibid.											
Dx: 3.171 Dm: 3.000 SS/FOM: F <sub>30</sub> = 60 (.0135, 37)											
$\omega$ : 1.637 $\eta\omega\beta$ : 1.641 $\epsilon\gamma$ : 1.652 Sign:+ 2V: 45-5 $\mu$											
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 2, 401											
Color: Colorless											
Pattern taken at 25 C. Sample was prepared from stoichiometric mixture of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O. Sample was repeatedly ground and heated up to temperature of 1725 C. Spectrographic analysis: 0.01 to 0.1% Fe, and 0.001 to 0.01% each of Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti and Zr. Chemical analysis showed Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 61.6, SiO <sub>2</sub> 38 (mole%). Tungsten used as an internal stand. PSC: oP15.75. Mwt: 426.05. Volume[CD]: 167.35.											



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

15-0776						Wavelength= 1.54184					
Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>						Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub>					
Aluminum Silicate						Aluminum Silicate					
	d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l	
	5.39	50	1	1	0	1.4240	4	2	5	0	
	3.774	8	2	0	0	1.4046	8	5	2	0	
	3.428	95	1	2	0	1.3932	<2	1	1	2	
	3.390	100	2	1	0	1.3494	6u	2	0	2	
	2.886	20	0	0	1	1.3462	u	4	4	0	
	2.694	40	2	2	0	1.3356	12	1	5	1	
	2.542	50	1	1	1	1.3290	5u	1	2	2	
	2.428	14	1	3	0	1.3266	u	2	1	2	
	2.393	<2	3	1	0	1.3172	4	5	1	1	
	2.308	4	0	2	1	1.3120	3	3	5	0	
	2.292	20	2	0	1	1.3004	4	5	3	0	
	2.206	60	1	2	1	1.2814	7	0	6	0	
	2.121	25	2	3	0	1.2771	13	2	5	1	
	2.106	8	3	2	0	1.2714	6	2	2	2	
	1.969	2	2	2	1	1.2630	12	5	2	1	
	1.923	2	0	4	0	1.2574	<2	6	0	0	
	1.887	8	4	0	0	1.2396	6	1	3	2	
	1.863	<2	1	4	0	1.2349	2	3	1	2	
	1.841	10	3	1	1	1.2199	2	4	4	1	
	1.7954	<2	3	3	0	1.2131	<2	2	6	0	
	1.7125	6	2	4	0	1.1924	4	2	3	2	
	1.7001	14	3	2	1	1.1855	3	5	3	1	
	1.6940	10	4	2	0	1.1457	<2	4	0	2	
	1.5999	20	0	4	1	1.1190	1	2	6	1	
	1.5786	12	4	0	1	1.1032	4	2	4	2	
	1.5644	2	1	4	1	1.0981	5	4	2	2	
	1.5461	2	4	1	1	1.0548	<2	2	7	0	
	1.5242	35	3	3	1	1.0172	4	1	7	1	
	1.5067	<2	1	5	0	1.0133	4	2	5	2	
	1.4811	<2	5	1	0	1.0065	8	3	7	0	
	1.4731	<2	2	4	1						
	1.4605	8	4	2	1						
	1.4421	18	0	0	2						
Sys.: Orthorhombic S.G.: Pbam (55)											
a: 7.5456 b: 7.6898 c: 2.8842 A: 0.9812 C: 0.3751											
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: .75 mp:											
Ref: Ibid.											
Dx: 3.171 Dm: 3.000 SS/FOM: F <sub>30</sub> = 60 (.0135, 37)											
$\omega$ : 1.637 $\eta\omega\beta$ : 1.641 $\epsilon\gamma$ : 1.652 Sign:+ 2V: 45-5 $\mu$											
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 2, 401											
Color: Colorless											
Pattern taken at 25 C. Sample was prepared from stoichiometric mixture of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O. Sample was repeatedly ground and heated up to temperature of 1725 C. Spectrographic analysis: 0.01 to 0.1% Fe, and 0.001 to 0.01% each of Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti and Zr. Chemical analysis showed Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 61.6, SiO <sub>2</sub> 38 (mole%). Tungsten used as an internal stand. PSC: oP15.75. Mwt: 426.05. Volume[CD]: 167.35.											



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

13-0294					Wavelength= 1.54056										
Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>					2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l	
Magnesium Aluminum Silicate					10.374	95	0	2	0	44.277	2	2	2	4	
					10.460	100	1	1	0	46.433	4	2	8	0	
					18.052	30	1	3	0	46.584	6	3	7	0	
Cordierite, syn					18.239	10	2	0	0	46.737	6	0	8	2	
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:					18.988	14	0	0	2	46.993	4	5	1	0	
Cut off: Int.: I/cor.:					20.785	2	0	4	0	47.175	4	4	4	2	
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 1, 28 (1961)					21.711	50	1	1	2						
					23.143	2	2	2	1						
					26.338	50	1	3	2						
					26.434	40	2	0	2						
					28.318	25	0	4	2						
Sys.: Orthorhombic S.G.: Cccm (66)					28.475	55	2	2	2						
a: 9.721 b: 17.062 c: 9.339 A: 0.5697 C: 0.5474					29.365	65	1	5	1						
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 4 mp:					29.405	65	2	4	1						
Ref: Ibid.					29.635	55	3	1	1						
					33.796	20	1	5	2						
					33.875	20	2	4	2						
					33.968	12	3	1	2						
Dx: 2.508 Dm: SS/FOM: F <sub>30</sub> = 35 (.0169, 51)					36.587	4	2	6	0						
					36.962	6	4	0	0						
cc: 1.540(18) $\omega$ $\beta$ : 1.549(25) $\gamma$ : 1.552(25) $\delta$ ign:+ 2V: 65-10 $\downarrow$					37.296	3	3	3	2						
Ref: Ibid.					37.883	2	2	6	1						
					38.541	12	0	0	4						
					39.258	2	1	7	1						
					39.527	2	3	5	1						
Color: Colorless					40.339	4	2	4	3						
Pattern taken at 25 C. Prepared at the Geophysical Laboratory, Washington, D.C., USA, from stoichiometric mixtures of the oxides. Heated at 1000 C for 3 days, 1180 C for 3 days, 1380 C for 7 days. Spectrographic analysis: 0.01-0.1% Ca, Fe, Na, and Pt; 0.001-0.01% Ba, Cr, Cu, Ni, and Ag. Measured density lies between 2.53 and 2.78. A hexagonal form, indialite, exists. Beryl group, cordierite subgroup. PSC: oC116. Mwt: 584.95. Volume[CD]: 1548.96.					40.509	6	3	1	3						
					41.523	6	2	6	2						
					41.866	2	4	0	2						
					42.359	<1	0	8	0						
					42.887	12	1	3	4						
					42.994	12	2	0	4						
					43.231	8	4	2	2						



© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

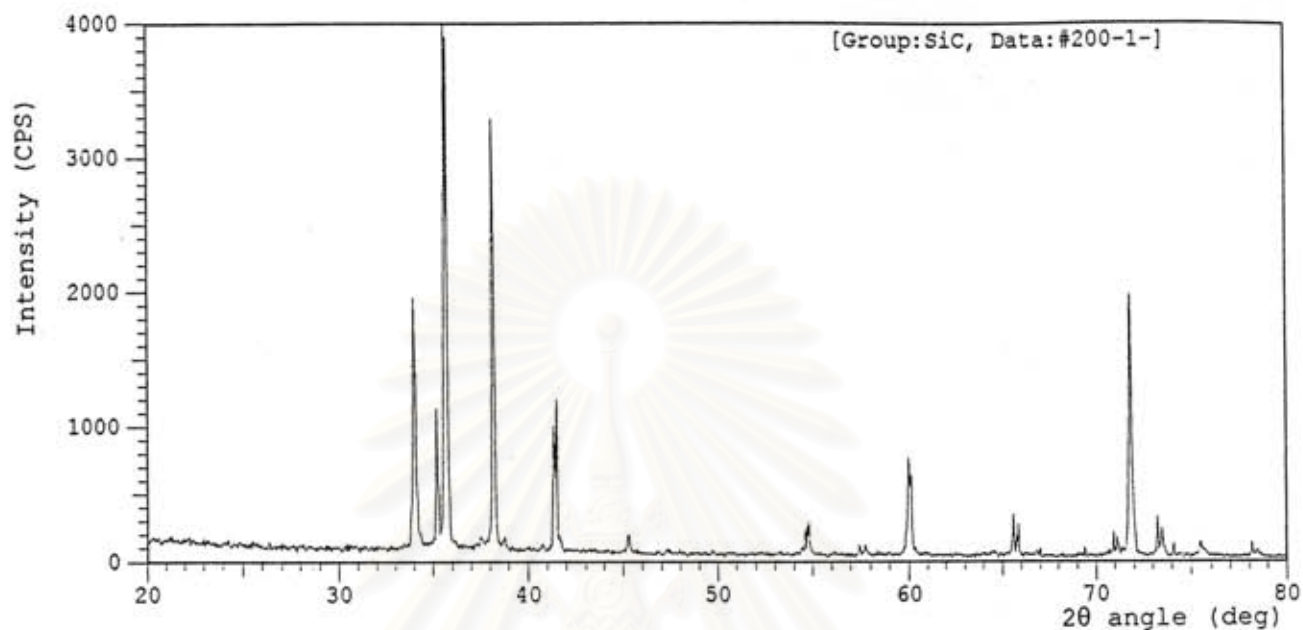
13-0294					Wavelength= 1.54056										
Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>					d(A)	Int	h	k	l	d(A)	Int	h	k	l	
Magnesium Aluminum Silicate					8.52	95	0	2	0	2.044	2	2	2	4	
					8.45	100	1	1	0	1.954	4	2	8	0	
					4.91	30	1	3	0	1.948	6	3	7	0	
Cordierite, syn					4.86	10	2	0	0	1.942	6	0	8	2	
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:					4.67	14	0	0	2	1.932	4	5	1	0	
Cut off: Int.: I/cor.:					4.27	2	0	4	0	1.925	4	4	4	2	
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, 1, 28 (1961)					4.09	50	1	1	2						
					3.84	2	2	2	1						
					3.381	50	1	3	2						
					3.369	40	2	0	2						
					3.149	25	0	4	2						
Sys.: Orthorhombic S.G.: Cccm (66)					3.132	55	2	2	2						
a: 9.721 b: 17.062 c: 9.339 A: 0.5697 C: 0.5474					3.039	65	1	5	1						
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 4 mp:					3.035	65	2	4	1						
Ref: Ibid.					3.012	55	3	1	1						
					2.650	20	1	5	2						
					2.644	20	2	4	2						
					2.637	12	3	1	2						
Dx: 2.508 Dm: SS/FOM: F <sub>30</sub> = 35 (.0169, 51)					2.454	4	2	6	0						
					2.430	6	4	0	0						
cc: 1.540(18) $\omega$ $\beta$ : 1.549(25) $\gamma$ : 1.552(25) $\delta$ ign:+ 2V: 65-10 $\downarrow$					2.409	3	3	3	2						
Ref: Ibid.					2.373	2	2	6	1						
					2.334	12	0	0	4						
					2.293	2	1	7	1						
					2.278	2	3	5	1						
Color: Colorless					2.234	4	2	4	3						
Pattern taken at 25 C. Prepared at the Geophysical Laboratory, Washington, D.C., USA, from stoichiometric mixtures of the oxides. Heated at 1000 C for 3 days, 1180 C for 3 days, 1380 C for 7 days. Spectrographic analysis: 0.01-0.1% Ca, Fe, Na, and Pt; 0.001-0.01% Ba, Cr, Cu, Ni, and Ag. Measured density lies between 2.53 and 2.78. A hexagonal form, indialite, exists. Beryl group, cordierite subgroup. PSC: oC116. Mwt: 584.95. Volume[CD]: 1548.96.					2.225	6	3	1	3						
					2.173	6	2	6	2						
					2.156	2	4	0	2						
					2.132	<1	0	8	0						
					2.107	12	1	3	4						
					2.102	12	2	0	4						
					2.091	8	4	2	2						



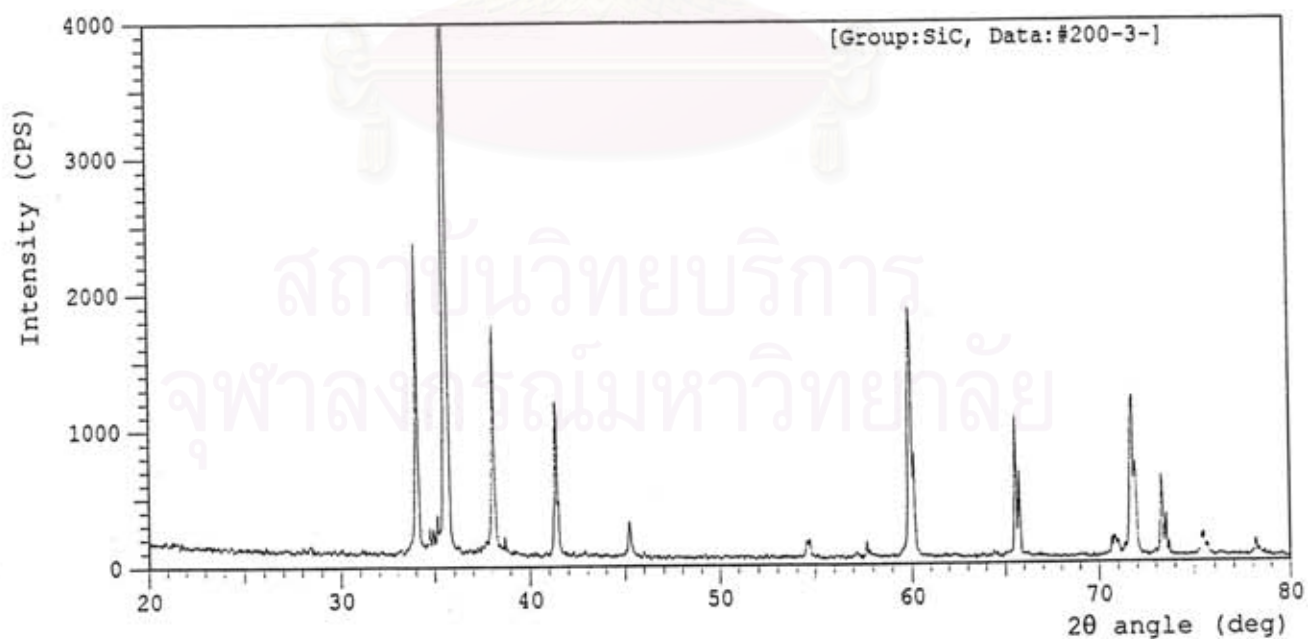
© 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

## ภาคผนวก ค

กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ 200



รูปที่ 1 กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ค้างบนตะแกรงร้อนเบอร์ 200



รูปที่ 2 กราฟ XRD ของซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่ผ่านตะแกรงร้อนเบอร์ 325

## ประวัติผู้วิจัย

นางสาวณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล เกิดวันที่ 14 ธันวาคม พ.ศ. 2518 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2539 และได้รับทุนบัณฑิตศึกษาภายในประเทศจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย