

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการลวดไฟฟ้า (Electrical Heating Element) ในเตาเผาอุณหภูมิสูง
สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี

โดย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสนอ

กองส่งเสริมประสานงานวิจัย ฝ่ายวิจัย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กันยายน 2541

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการลวดไฟฟ้า (Electrical Heating Element) ในเตาเผาอุณหภูมิสูง
สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี



คณะผู้จัดทำ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุตตมะคิล
นางสาวสิริพรรณ นิลไพรัช
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


เสนอ

สถาบันวิทยบริการ
กองส่งเสริมประสานงานวิจัย ฝ่ายวิจัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กันยายน 2541

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาหลอดไฟฟ้า (Electrical Heating Element) ในเดาเผา อุณหภูมิสูงสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ความร่วมมือการสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนการทำวิจัยจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือตลอดการทำวิจัยในสุดท้ายนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุทุกท่านที่ช่วยทำการวิจัยและอำนวยความสะดวกในดำเนินการวิจัย จนสำเร็จลุล่วง



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุดมมะศิริ
หัวหน้าโครงการ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูปภาพ	A-D
สารบัญตาราง	E
สารบัญภาคผนวก	F
บทคัดย่อภาษาไทย	G
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	H
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ข้อมูลพื้นฐานของซิลิกอนคาร์ไบด์	3
2.2 ลวดนำไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ซิลิกอนคาร์ไบด์	6
2.3 วิธีการผลิตลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์	9
2.4 ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการวิจัยและทดลอง	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	16
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี	17
3.3 ขั้นตอนของการทดลอง	18
3.3.1 การศึกษาสมบัติของลวดไฟฟ้า	18
3.3.2 การศึกษากระบวนการขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 ผลการศึกษาสมบัติของลวดไฟฟ้า	26
4.1.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมและวัฏภาค	26
4.1.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นและความพรุน	27
4.1.3 การตรวจและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	27
4.1.4 ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	31

สารบัญ

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาการขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ	31
4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติของสารตั้งต้น	31
4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติ	34
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะของผงผสมหลังการบด	38
4.2.4 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงาน	41
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	66



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 ลวดไฟฟ้ารูปทรงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในเชิงการค้า	7
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงการติดตั้งชุดลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ในเตา	9
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของลวดไฟฟ้า ที่ผลิตโดยวิธีต่างๆ	11
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Current-Voltage ที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อใช้สาร BeO 2% ในซิลิกอนคาร์ไบด์	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนกับปริมาณของ Si ₃ N ₄ ในซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งมี BeO 3.2 โมล	14
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิ	15
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดค่าความต้านทาน (Resistivity)	19
รูปที่ 3.2 Temperature Profile ของการเผา 1430°C	21
รูปที่ 3.3 Temperature profile ที่อุณหภูมิ 2200°C	23
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 Spectrum องค์ประกอบของลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว จากเครื่อง EDX	25
รูปที่ 4.2 Spectrum องค์ประกอบของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง จากเครื่อง EDX	25
รูปที่ 4.3 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคจากการวิเคราะห์ลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวด้วยเครื่อง XRD	26
รูปที่ 4.4 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคจากการวิเคราะห์ลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงด้วยเครื่อง XRD	26
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะทั่วไปของลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว	29
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะทั่วไปของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง	29
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะและขนาดเกรนของลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว	30
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงลักษณะและขนาดเกรนของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง	30
รูปที่ 4.9 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคของผงซิลิกอนคาร์ไบด์	33
รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายผงซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่อง TEM	33

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.11 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปริมาณสะสมของผงซิลิกอนคาร์ไบด์	34
รูปที่ 4.12 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของผงอลูมินาออกไซด์	36
รูปที่ 4.13 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของผงโบรอน	36
รูปที่ 4.14 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปริมาณสะสมของผงอลูมินาออกไซด์	37
รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายของอลูมินาออกไซด์ด้วยเครื่องTEM	37
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายของผงโบรอนด้วยเครื่องTEM	38
รูปที่ 4.17 ลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคผงผสม	39
รูปที่ 4.18 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปริมาณสะสมของอนุภาคผงผสม	39
รูปที่ 4.19 เทอร์โมแกรมของแกรนูล	40
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณPVA และความหนาแน่น ของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา 1430°C นาน 4 ชั่วโมง	41
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนขนาดแกรนูลกับความหนาแน่น ของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา 1430°C นาน 4 ชั่วโมง	42
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้น ของสารปรับปรุงสมบัติ เมื่อเผาที่ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	45
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้น ของสารปรับปรุงสมบัติ เมื่อเผาที่ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	45
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความพรุน หลังเผา 1 และ 3 ชั่วโมง	46
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และความพรุน หลังเผา 1 และ 3 ชั่วโมง	46
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเปอร์เซ็นต์ การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 2200°C	48
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร A ซึ่งมี Al ₂ O ₃ 0.25 % และ B 0.25 % เผานาน 1 ชั่วโมง	50

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร B Al_2O_3 0.75% และ B 0.75 % เผา 1 ชั่วโมง	50
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร C Al_2O_3 1.5% และ B 1.5 % เผา 1 ชั่วโมง	51
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร A Al_2O_3 0.25% และ B 0.25 % เผา 3 ชั่วโมง	51
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร B Al_2O_3 0.75% และ B 0.75 % เผา 3 ชั่วโมง	52
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร C Al_2O_3 1.5% และ B 1.5 % เผา 3 ชั่วโมง	52
รูปที่ 4.33 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	54
รูปที่ 4.34 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	54
รูปที่ 4.35 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.5% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	55
รูปที่ 4.36 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	55
รูปที่ 4.37 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	56
รูปที่ 4.38 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง	56
รูปที่ 4.39 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	57
รูปที่ 4.40 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	57

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.41 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เเผที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	58
รูปที่ 4.42 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เเผที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	58
รูปที่ 4.43 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เเผที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	59
รูปที่ 4.44 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เเผที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง	59
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับสูตรความเข้มข้น ของสารปรับปรุงสมบัติ	61
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ความต้านทานการดัดโค้งกับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ	62

E

สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 2	
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของเซรามิกต่างๆ	5
ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนและความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อใช้ตัวช่วยซินเทอร์ริงชนิดต่างๆ	12
บทที่ 3	
ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
ตารางที่ 3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี	17
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนการผสมสารต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาปริมาณ PVA	20
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการผสมสารต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาส่วนผลระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์ และสารปรับปรุงสมบัติ	22
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและวัฏภาคของลวดไฟฟ้า	24
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นและความพรุนในลวดไฟฟ้า ชนิดท่อเกลียวและท่อกลวง	27
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	28
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	31
ตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะเฉพาะของผงซิลิกอนคาร์ไบด์	32
ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอลูมิเนียมออกไซด์และโบรอน	35
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสูตรความเข้มข้น ของสารปรับปรุงสมบัติต่อความหนาแน่น	44
ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้น ของสารปรับปรุงสมบัติและเวลาเผา	47
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	49
ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีและวัฏภาคเมื่อเผาที่เวลาต่างๆ กัน	53
ตารางที่ 4.11 สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง	60
ตารางที่ 4.12 สมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งกับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ	62

F

สารบัญภาคผนวก

หน้า

ภาคผนวกที่ 1

66



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ลวดไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในเตาเผาอุณหภูมิสูง ซึ่งใช้กันแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ อัญมณีและห้องปฏิบัติการซึ่งส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นเพื่อเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมและพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิตลวดไฟฟ้า จึงได้จัดทำโครงการนี้เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตลวดไฟฟ้าซึ่งมีซิลิกอนเป็นส่วนผสมหลัก และศึกษาวิธีการขึ้นรูปลวดไฟฟ้าแบบต่างๆ ที่ใช้กันในอุตสาหกรรม ตลอดจนการพัฒนาปรับปรุงลวดไฟฟ้าให้มีสมบัติใกล้เคียงการค้า

จากผลการศึกษาพบว่า การผลิตลวดไฟฟ้าในเชิงการค้ามีด้วยกัน 3 วิธีคือ การ form SiC ในที่เดิม จากคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ การใช้ Reaction bonding ของ SiC และการซินเทอริงโดยไม่ใช้ความดัน

ผลการทดลองเพื่อหาส่วนผสมในการผลิตลวดไฟฟ้าโดยการผันแปรความเข้มข้นของส่วนผสมต่างๆ 3 สูตร พบว่า สูตร B ซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์ 92% อลูมินาออกไซด์ 0.75% โบรอน 0.75% PEG 2.5% และ PVA 1.5% ที่เผานาน 1 ชั่วโมง มีแนวโน้มดีที่สุดในการนำไปปรับปรุงและวิจัยพัฒนาต่อไป เพื่อผลิตลวดไฟฟ้าเพราะจะได้ชิ้นงานที่มีธาตุ และวัฏภาคที่คล้ายกับลวดไฟฟ้าในเชิงการค้าและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

A high temperature electric furnace is widely used in industries such as jewelry and laboratories. A important device in the high electric furnace is an heating element imported from abroad. For industries supporting and developing of heating element technology, this project was set up. The objects of this investigation is it study process for producing silicon carbide heating element, the fabrication technique for heating element as using in industries as well as the development of specimen properties close to commercial products.

There are 3 fabrication technique for heating element : in situ formation of SiC from carbon and SiO, Reaction-bonding and Pressureless sintering. The result of composition experiment showed that after sintering 1 hour, the formula B, which its composition is SiC 92%, Al₂O₃ 0.75%, B 0.75%, PEG 5% and PVA 1.5%, has a trend suitable composition as its properties, phase and element, is similar to commercial product. In addition to the resistivity is the lowest value when it was compared to other formula.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำงานวิจัย

อุตสาหกรรมในประเทศไทยปัจจุบันมีการขยายตัวเป็นอย่างมาก อุตสาหกรรมอัญมณีเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีอนาคตการส่งออกสดใสซึ่งในแต่ละปีสามารถส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศมีมูลค่ากว่าพันล้านบาท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมพลอยได้มีการนำเข้าพลอยคุณภาพต่ำจากต่างประเทศ เช่น ประเทศศรีลังกา กับพลอยคุณภาพต่ำในประเทศมาใช้เทคโนโลยีการหุง (เผา) เพื่อให้พลอยเปลี่ยนไปเป็นพลอยที่มีคุณภาพดีและราคาสูง อุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ใช้ในการเผาที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมประเภทนี้รวมถึงอุตสาหกรรมที่ต้องเกี่ยวข้องกับการเผาและความร้อนอื่น อาทิ อุตสาหกรรมโลหะ, อุตสาหกรรมเซรามิก ตลอดจนห้องปฏิบัติการอุณหภูมิสูง คือ เตาเผาอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นเตาไฟฟ้าที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทั้งเตาและชิ้นส่วนอุปกรณ์ โดยเฉพาะลวดไฟฟ้าที่เป็นวัสดุให้ความร้อนที่ทำมาจากซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งในการใช้งานมักจะชำรุดหรือหมดอายุ โดยปัญหาที่พบบ่อยก็คือ ลวดไฟฟ้าขาดต้องจัดซื้อจากต่างประเทศและมีราคาแพงมาก เช่น ลวดไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ยาว 10 นิ้ว ราคาประมาณ 15,000 บาท และในเตาขนาด 1 ลูกบาศก์ฟุต ต้องใช้ไฟฟ้านี้ประมาณ 6-8 แห่ง ทั้งยังต้องใช้เวลานานในการสั่งซื้อกว่าจะได้ชิ้นส่วนใหม่มาเปลี่ยน ซึ่งทำให้การผลิตหยุดชะงักลงหรือต้องหยุดการผลิต

ดังนั้นเพื่อเป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมดังกล่าวในประเทศ ตลอดจนสงวนเงินตราต่างประเทศ ในการสั่งซื้อลวดไฟฟ้า ตลอดจนเป็นการสนับสนุนเทคโนโลยีการสร้างเตาเผาอุณหภูมิสูง จึงได้ริเริ่มโครงการวิจัยที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการทำลวดไฟฟ้าขึ้นมา เพื่อในขั้นต้นสุดท้ายสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ ทำให้เตาเผาที่มีราคาถูกลงจะได้มีการลงทุนเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมข้างต้น

นอกจากนี้เทคโนโลยีการผลิตลวดไฟฟ้านี้ สามารถนำไปดัดแปลงและพัฒนาไปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ ซึ่งใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารตั้งต้นเหมือนกันได้ เช่น ตัวป้องกันค่าความดันไฟฟ้าสูงเกิน (Overvoltage Protective Device หรือ Lightning Arrester)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผลิตลวดไฟฟ้า ซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นส่วนผสมหลัก
2. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปลวดไฟฟ้า แบบต่างๆ ที่ใช้กันในอุตสาหกรรม
3. ปรับปรุงและพัฒนาลวดไฟฟ้า ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับต่างประเทศ

ขอบเขตการวิจัย

วิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตขึ้นในประเทศ โดยเน้นการขึ้นรูปในระดับห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตลวดชนิดให้ความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นของลวดไฟฟ้า
2. ได้ทราบส่วนผสม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยขั้นต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ข้อมูลพื้นฐานของซิลิกอนคาร์ไบด์

สารประกอบ Non-oxide เซรามิกกำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย ในบรรดาวัสดุเหล่านี้ซิลิกอนคาร์ไบด์ก็เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในงานทั้งทางด้าน Functional และ Electrical Ceramic

ซิลิกอนคาร์ไบด์มี 2 รูปแบบ คือ รูปแบบรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) เรียกว่า รูปแบบแอลฟา (α) และรูปแบบทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเรียกว่า แบบ เบต้า (β) ในทางการค้าและอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้รูปแบบแอลฟา ผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์มีตั้งแต่สี่เหลี่ยมจนถึงสี่ด้านขึ้นกับปริมาณสิ่งเจือปน ค่าความถ่วงจำเพาะของซิลิกอนคาร์ไบด์รูปแบบต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ตามปกติในทางการค้ามักใช้ค่าความถ่วงจำเพาะเป็น 3.21 กรัม/ซม.³

ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับเพชร คือ มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 9-10 (Mohr's hardness scale) มีความคงทนต่อสารเคมี และการกัดกร่อนของกรดได้ดี จะทำปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น เช่น ทำปฏิกิริยากับไฮเดรียมซิลิเกตที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300 °C และสามารถทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C ซิลิกอนคาร์ไบด์จัดเป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) G.Bush พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าต่างๆ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอนคาร์ไบด์จะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิโดยไม่ขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซิลิกอนคาร์ไบด์สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีมีค่า Thermal Emissivity และ Thermal Conductivity สูงซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 80-90 w/mK ส่วนค่า Thermal Expansion ปกติจะค่อนข้างต่ำคือ ประมาณ $4-5 \times 10^{-6} /k$

วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ ททราย ประมาณ 60% และโค้ก (Coke) ประมาณ 40% อาจมีการเติมซีลีเนียมลงไป ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเพิ่มความพรุน (Porosity) ของวัตถุดิบให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นจึงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้น นอกจากนั้นมักจะเติมเกลือ (Salt) เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับเหล็กหรือสิ่งเจือปนจำพวกเหล็กเกิดเป็นสารประกอบคลอไรด์ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

การใช้งานของซิลิกอนคาร์ไบด์มีมากมายหลายด้าน โดยอาศัยสมบัติดีเด่นในการนำไปประยุกต์ใช้ เช่น นำไปใช้ในการขัดทั้งทางโลหะ ไม้ แก้ว และกับวัสดุอื่นๆ ซึ่งต้องมีการผลิตออกมาให้เป็นรูปร่างมีขนาดและคุณภาพของเกรน (Grain) ตามลักษณะของงานที่ใช้ ส่วนการประยุกต์ใช้ในงานด้านวัตถุทนไฟ ก็อาศัยสมบัติทางความร้อนคือ ซิลิกอนคาร์ไบด์มีค่า Thermal Emissivity และ Thermal Conductivity สูงไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อให้ความร้อน มีความต้านทานต่อการยึดหดตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน (Thermal Shock) ดีกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 2.1) นอกจากนั้นยังไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับออกซิเจน สมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับรูพรุน ขนาดของเกรน การยึดเกาะกันและบรรยากาศในเตาเผา การพัฒนาคุณภาพด้านต่างๆ ทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่เหมาะสมมากสำหรับวัตถุทนไฟ

สำหรับงานโลหะได้นำซิลิกอนคาร์ไบด์มาใช้เป็นสารช่วยลดการเกิดปฏิกิริยากับอากาศในงานเหล็กและเหล็กกล้า เมื่อเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ลงในเหล็กหลอมจะสลายตัวตัวให้ซิลิกอนและคาร์ไบด์ ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยาออกซิเจนและซิลิกอนบางส่วนจะไปแทนที่เหล็กในเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมได้เป็นซิลิกาซึ่งเสถียรกว่าออกไซด์ของเหล็ก นอกจากนี้ซิลิกอนคาร์ไบด์ยังเป็นตัวเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของเซรามิกต่างๆ

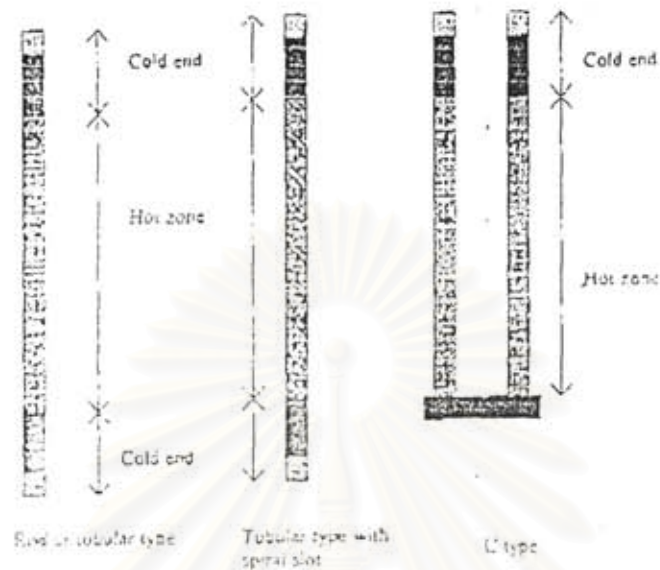
Material	Crystal Structure	Theoretical Density (g/cm ³)	Knoop or Vickers Hardness (Ga)	Fracture Toughness (K _{IC}) (Mpa M)	Young ' s Modulus (Gpa)	Thermal Expansion (X10)	Thermal Conductivity [W/(m-k)]	Thermal Shock Resistance Parameter
Glass Ceramic	Variable	2.4-5.9	6-7	2.4	63-138	5-17	2.0-5.4 at400k 2.7-3.0 at1200k	1.2
Pyrex glass	Amorphous	2.52	5	0.75	70	4.6	1.3 at400k 1.7 at1400k	0.2
TiO ₂	Rutile tetragonal	4.25	7-11	2.5	283	9.4	8.8 at400k	0.2
	Anatase tetragonal	3.84					3.3 at1400k	
	Brookite orthorhombic	4.17						
Al ₂ O ₃	Hexagonal	3.97	18-23	2.7-4.2	380	7.2-8.6	27.2 at400k 5.8 at1400k	6.5
Mullite	Orthorhombic	2.8	-	2.2	145	5.7	5.2 at400k 3.3 at1400k	0.9
SiC	a hexagonal	3.21	20-30	-	207-483	4.3-5.6	63-155 at400k	31
SiC(CVD)	cubic	3.21	28-44	5-7	415-441	5.5	121 at400k 9-30 at400k	16
Si ₃ N ₄	a hexagonal	3.18	8-19	-	304	3.0	9-30 at400k	16
	p hexagonal	3.19						
Cast irons	Cubic	5.5-7.8	1-7	37-45	83-211	8.1-19.3	46-53 at1400k	32

2.2 ลวดนำไฟฟ้าและอิเล็กโทรดซิลิกอนคาร์ไบด์

ในบรรดาวัสดุเซรามิกที่ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุหนึ่งที่ยอมรับใช้เป็นลวดไฟฟ้า ซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้าของซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ถูกพัฒนามาใช้เป็นลวดไฟฟ้า (Heating Element) ในเครื่องทำความร้อนเตาและเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิ โดยข้อดีของลวดนำความร้อนที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ

1. ความสามารถในการทนต่อการให้แรงบนพื้นผิวมากกว่าวัสดุอื่นๆ เช่น นิเกิล-โครเมียม หรือแพลตตินัม
2. ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาขณะที่เตายังอยู่ในระหว่างการใช้งาน
3. อายุการใช้งานนานที่อุณหภูมิสูงเมื่อใช้ในสภาวะที่ถูกต้อง
4. ไม่ต้องการ Protective Atmosphere ถึงแม้จะต้องใช้อากาศหรือบรรยากาศที่มีออกซิเจนเพื่อให้ได้ผลในการสะสม Protective Silica Coating Elements สามารถใช้ได้ ในบรรยากาศที่เป็นกลางหรือไม่มีออกซิเจนแต่ต้องใช้ที่อุณหภูมิต่ำๆ ที่สำคัญคือ บรรยากาศต้องแห้ง
5. สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย มีการจำกัดอุณหภูมิในการใช้งานในขบวนการทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้ดี สำหรับโมลิบดีนัมไดซิลไซด์ ก็นิยมใช้ทำลวดนำความร้อนแต่จะสูญเสียความแข็งแรงอย่างมากที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C มีการปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิสูงโดยการเติม Silicon Carbide Whiskers 20% โดยปริมาตร

จากสมบัติดังกล่าว ทำให้ลวดไฟฟ้ายิลิกอนคาร์ไบด์ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางและดูเหมือนจะพบทุกแห่งที่มีเกี่ยวกับอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในห้องปฏิบัติการเซรามิกและอุตสาหกรรมโลหะ สำหรับในทางการค้าลวดไฟฟ้ายิลิกอนคาร์ไบด์มีหลายรูปทรง อาทิ รูปทรงแท่งกลวง (Tubular Type) รูปตัว U (U-Type)



รูปที่ 2.1 ลวดไฟฟ้าทรงชนิดต่างๆ ที่ใช้ในเชิงการค้า

สมบัติของซิลิกอนคาร์ไบด์และลวดไฟฟ้า

สำหรับสมบัติที่สำคัญของลวดไฟฟ้าและอิเล็กโทรดนั้น จะเน้นด้านความต้านทานมากกว่าความเป็นตัวนำ เนื่องจากความต้านทานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ Joule heating ดังนั้นองค์ประกอบของลวดไฟฟ้าควรมีค่าของกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนตามแรงเคลื่อน (Voltage) หรือที่เรียกว่า Ohmic ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อสมบัติด้านความต้านทาน อย่างไรก็ตามพฤติกรรมดังกล่าวอาจไม่จำเป็นเพราะการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถชดเชย ผลที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อน (Voltage) กับกระแส (Current) ที่ไม่เป็นเส้นตรง รวมทั้งผลจากค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอุณหภูมิสูง (High Temperature Coefficient of Resistance) ทำให้ค่าความต้านทานผันแปรตามอุณหภูมิ

ซิลิกอนคาร์ไบด์มีสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบที่อุณหภูมิสูง 500 ถึง 750 °C (930 ถึง 1380 °F) ความต้านทานจะลดลงเป็นแฟคเตอร์ของ 2 และเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจนถึง 2 เท่าของค่าที่อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิ 1500 °C (2730 °F) ซึ่งเป็นข้อดีในด้านการควบคุมความร้อนและแหล่งจ่ายกำลัง เมื่อใช้เป็นลวดไฟฟ้าค่าความต้านทานของลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เหมาะสมจะมีค่าระหว่าง 0.01 – 1 Ω .cm เนื่องจากสามารถขยายระยะความถี่ต่อกระแสสลับ (Impedance) ของแท่ง (rod) ยาว 1 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 – 2 ให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟที่มีอยู่แล้ว

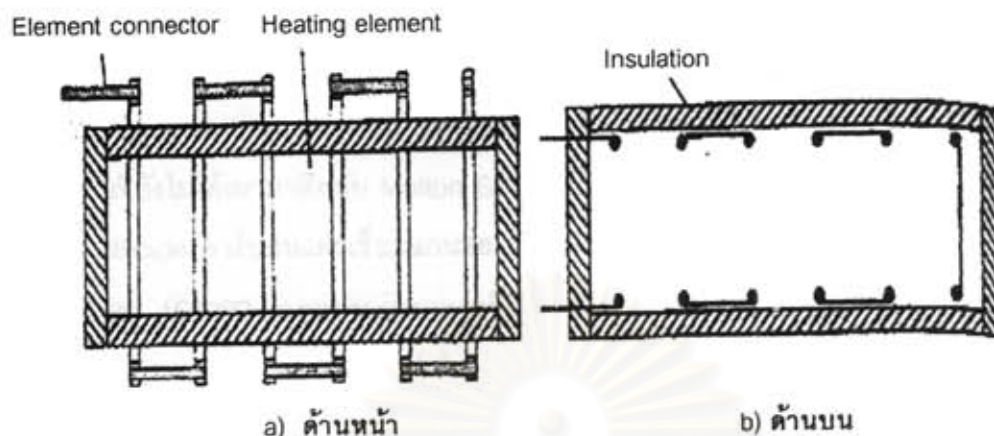
เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์มีความต้านทานสูง (สูงกว่ากราฟไฟต์อยู่ 100 เท่า) จึงต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าและกระแสไฟฟ้าทำให้บริเวณปลายแท่งลวดไฟฟ้ามักเกิดความร้อนสูงเกินไป ในทางการค้าได้รับการออกแบบให้มีความต้านทานที่รอยเชื่อมตรงที่ปลายต่ำเพื่อลดการร้อนเกินไปที่จุดเชื่อม

อุณหภูมิและข้อควรระวังในการใช้งาน

การใช้งานลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ในสภาพอากาศปกติจะอยู่ระหว่าง 1500–1600°C ข้อจำกัดในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่ากำหนดก็คือ จากการเกิดปฏิกิริยาแยกตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ตามสมการ



ปฏิกิริยานี้จะปรากฏในรูปของกลุ่มควันซิลิกาสีขาวกลุ่มใหญ่หลังเกิดการแตกหักลวดไฟฟ้า อุณหภูมิที่แน่นอนของการเกิดปฏิกิริยาข้างต้น ขึ้นกับปัจจัยในการออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนาแน่นของผง ลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่จะผ่านการใช้งานจะเกิดกระบวนการหมัก (aging) ในกระบวนการนี้ความต้านทานจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากเกิดการ Oxidize ระหว่างเกรน ดังนั้นถ้ามีลวดไฟฟ้าหนึ่งเสี้ยนแนะนำว่าให้เปลี่ยนลวดไฟฟ้าทั้งหมด เนื่องจากลวดไฟฟ้าใหม่จะมีความต้านทานต่ำกว่า ถ้าเปลี่ยนเฉพาะลวดไฟฟ้าที่เสีย ลวดไฟฟ้าอันใหม่จะทำงานช้าหรือไม่ทำงานเลย (Run Cold) เนื่องจากความต้านทานต่ำกว่าในชุดวงจร ในทางตรงกันข้ามถ้าต่อลวดไฟฟ้าแบบขนาน ลวดไฟฟ้าใหม่จะทำงานหนัก (Run Hot) และเสื่อมสภาพก่อนกำหนด ปกติอายุการใช้งานของลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์จะอยู่ในช่วง 4000–9000 ชั่วโมง ซึ่งอายุการใช้งานขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศและอุณหภูมิในการใช้ในการติดตั้งลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ในเตาเผานั้นก็เป็นสิ่งสำคัญ โดยปกติจะนิยมติดตั้งแนวตั้งและมัดด้วยกันเป็นชุดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของ Native Passivating Silica Film ซึ่งช่วยป้องกันการเกิด Oxidation โดยทั่วไปลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์จะเสื่อมสภาพในบรรยากาศ Reducing มากกว่า เนื่องจากชั้นฟิล์ม Silica layer จะกลายเป็นซิลิกอนออกไซด์



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองแสดงการติดตั้งชุดลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ในเตา

a) ด้านหน้า b) ด้านบน

2.3 วิธีการผลิตลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์

ในกระบวนการผลิตลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์มีวิธีการผลิตที่สำคัญ 3 วิธี คือ

1. การขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ในที่เกิดจากคาร์บอนและซิลิกอนออกไซด์
(in situ Formation of SiC from Carbon and SiO)
2. Reaction - Bonding ของซิลิกอนคาร์ไบด์ (Reaction -Bonding SiC)
3. การซินเทอริ์โดยไม่ใช้แรงดัน (Pressureless Sintering)

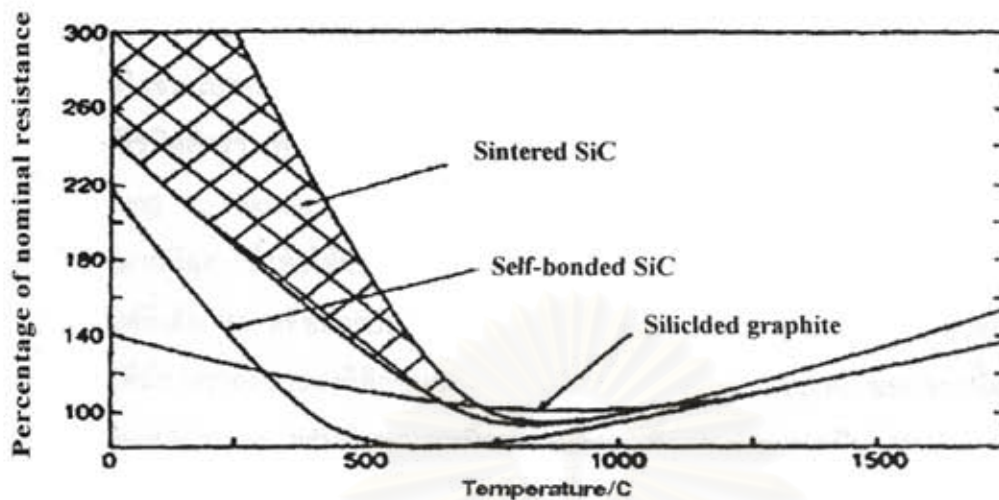
วิธีที่ 1 ให้ความร้อนกับ Carbon Tube จนถึงอุณหภูมิประมาณ 1900°C ในอ่างทราย (SiO_2) และโด๊ก (คาร์บอน) สำหรับความร้อนที่ให้กับ Carbon tube อาจใช้วิธีการผ่านกระแสไฟฟ้าไปยัง Carbon tube โดยตรง หรือโดยให้ความร้อนจากการเผา Carbon tube ที่มีขนาดเล็กกว่า หลังจากการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 -C ทำให้เกิด SiO ซึ่ง SiO จะซึมเข้าไปใน Carbon Tube และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนกลายเป็น β -SiC ดังนั้น Carbon Tube จึงกลายเป็น SiC tube เมื่อนำไปผ่านขั้นตอน Siliciding ก็นำ SiC tube ออกจากอ่างและเผาไล่ Residual Carbon ซึ่งมี SiC Tube ที่ได้จะมีความพรุนตัวประมาณ 30% และมีพื้นผิวภายในใหญ่มาก ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิด Oxidation ภายใต้วงการใช้งานจึงเคลือบพื้นผิวภายนอกด้วย Calcium Aluminosilicate Glaze แล้ว เผาที่ประมาณ 1450°C ในการขึ้นรูปวิธีนี้ Tube จะมีความต้านทานสม่ำเสมอตลอดความยาวและเพิ่มค่า Higher-Resistance Heating ในบางบริเวณโดยใช้เพชรเลื่อยเป็นเกลียวผ่านผนังของ Tube ความต้านทานของส่วนที่ให้ความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามการปรับ Pitch ของการตัด

วิธีที่ 2 ผลิต self-bonded SiC โดยกระบวนการสำคัญเหมือนกับที่ใช้ในการผลิต Refel Silicon Carbide ของ British Nuclear Fuels Ltd. นำส่วนผสม α -SiC grains และผงคาร์บอนมาขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ต้องการโดยกระบวนการทางเซรามิกมาตรฐาน ซึ่งปกติใช้การ Extrusion หรือ Slip-Casting จากนั้นนำชิ้นงานที่ยังไม่ได้เผามาติดกับ Molton Silicon ซึ่งจะซึมเข้าไปใน Pore Space โดยกระบวนการ Capillary เพื่อ Silicide คาร์บอนและเชื่อมแกนของซิลิกอนคาร์ไบด์เข้าด้วยกัน เนื่องจากเกิดการซึมผ่านที่อุณหภูมิประมาณ 1500°C (จุดหลอมเหลวของซิลิกอนประมาณ 1410°C) จะเกิดรูป β -SiC และเปลี่ยนรูปเป็น α -SiC โดยกระบวนการตกผลึกใหม่ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อนของแท่ง (rod) ที่อุณหภูมิประมาณ 2500°C ในบรรยากาศเฉื่อยเซรามิกที่ได้จะมีความพรุนตัวต่ำ จึงมีอายุการใช้งานนาน ความต้านทานของ rod ส่วนที่ร้อนสามารถปรับให้ได้ที่ต้องการโดยทำเกลียว (Spiralling) ซึ่งจะสามารถขึ้นรูปได้ในช่วงก่อนเผา

วิธีที่ 3 เป็นการซินเทอร์ α - SiC Grit โดยตรงโดยไม่ใช้ความดัน α - SiC Grit จะขึ้นรูปในลักษณะแท่ง และซินเทอร์ในเตาคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ 2300°C เพื่อให้ได้แท่งที่มีความต้านทานต่ำ จะจุ่มส่วนปลายใน Molton Silicon ซึ่งจะเกิดการซึมผ่านตลอดความยาวในทุกกรณี ส่วนปลายของลวดไฟฟ้าจะนำมาทำ Flame-Sprayer ด้วยอลูมิเนียมเพื่อให้มีการสัมผัสทางไฟฟ้าดี

รูปแบบโดยทั่วไปของคุณลักษณะ Resistance-Temperature ของลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการผลิตทั้ง 3 แบบ แสดงในรูปที่ 2.3 ที่อุณหภูมิ 800°C ความต้านทานในการผลิตแต่ละครั้งจะพิจารณาจากสารเจือปน เหนืออุณหภูมินี้ขึ้นไปจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในทางปฏิบัติถึงแม้ว่าลวดไฟฟ้า ชนิดต่างๆ จะไม่มีความเป็นไปได้อันจะมีค่าความต้านทานเพียงส่วนเดียว แต่ก็เป็นที่สมมติค่าความต้านทานที่ 1000°C มีค่าประมาณ $10^{-3} \Omega\text{m}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิของลวดไฟฟ้าที่ผลิตโดยวิธีต่างๆ

2.4 ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

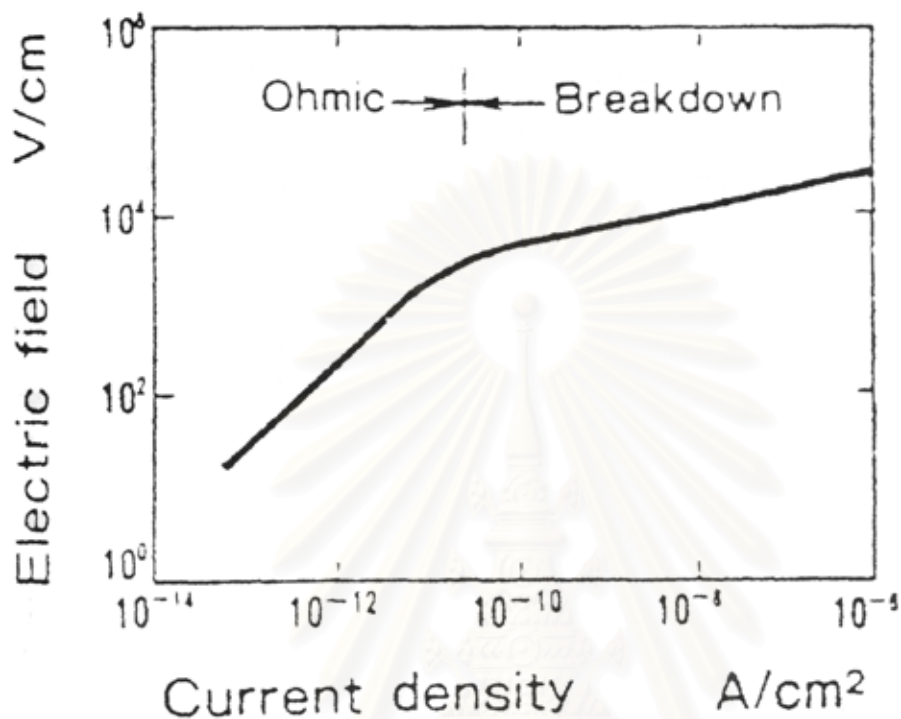
สำหรับการเผาขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์เพื่อใช้ในงานต่างๆ นั้น มีวิธีการ สภาพ และ การเติมสารช่วยในการเผาขึ้นรูปหลายตัวแตกต่างกันไปตามสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น Watanabe และคณะได้พัฒนาวิธีการผลิตลวดนำความร้อนซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยการเผาของผสมของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ 0.1-3.0% ในสุญญากาศหรือบรรยากาศเฉื่อยอื่นๆ ที่ไม่ใช่บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1800-2050°C หลังจากนั้นเผาอีกครั้งในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1950°C จะได้ลวดนำความร้อนที่มีความแข็งแรงโดยมีความหนาแน่นสูงถึง 80% ของค่าทางทฤษฎีและมีค่าความต้านทานจำเพาะ (Specific Resistivity) ต่ำกว่า

M. Watanabe และคณะได้ทำการทดสอบขบวนการในการผลิตลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ ซึ่งประกอบด้วย การเติมโบรอนหรือสารประกอบของโบรอนในปริมาณตั้งแต่ 0.3-3.0% โดยน้ำหนัก และเติมคาร์บอนและสารประกอบของคาร์บอนในปริมาณตั้งแต่ 0.1-60% โดยน้ำหนักผสมกับผง SiC ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.0 μm หรือน้อยกว่า ผสมและขึ้นรูป จากนั้นนำไป Sintering ครั้งแรกในสุญญากาศหรือในบรรยากาศเฉื่อยยกเว้นไนโตรเจนและนำไป Sintering ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1500-2300°C ในบรรยากาศของไนโตรเจนจะได้ลวดไฟฟ้าซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความหนาแน่นอย่างน้อย 80% TD และมีความต้านทานไฟฟ้า 1.0 $\Omega\text{-cm}$ หรือน้อยกว่า

เนื่องจากซิลิกอนคาร์ไบด์มีลักษณะเป็นโควาเลนต์ที่แข็งแกร่งมาก จึงจำเป็นต้องเติมสารปรับปรุงสมบัติ เช่น โบรอน หรืออลูมิเนียม ปริมาณเล็กน้อยเพื่อทำให้วัสดุหนาแน่นขึ้น มีการทดลองใช้สารปรับปรุงสมบัติชนิดต่างๆ เพื่อตรวจสอบความสามารถในการผลิต ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีความแน่นสูง โดยวิธี Hot Pressing Y. Takeda พบว่า Be, B และ Al หรือสารประกอบของมันเป็นสารช่วยซินเทอร์ริงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์มีความหนาแน่นมากกว่า 98% TD จากการทดลองซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม Be หรือสารประกอบของมันเป็นค่าการนำความร้อนสูงมากกว่า 260 W/m.k ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดที่มีการรายงานของซิลิกอนคาร์ไบด์ และมากกว่าค่าของโลหะ Al นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง Current-Voltage จะมีลักษณะเหมือน varistor ซึ่งกราฟจะแบ่งเป็น Ohmic region และ breakdown region ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จาก Ohmic ดังแสดงในตารางที่ 2.2 รูปที่ 2.4 ซึ่งซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เติม Be และสารประกอบของมันเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมากกว่า $1 \times 10^{13} \Omega\text{-cm}$ ที่ electrical field strength น้อยกว่า $2 \times 10^3 \text{ V/cm}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อใช้สารช่วยซินเทอร์ริงอื่นๆ ในกรณีการเติม B และสารประกอบของมันเป็นค่าการนำความร้อน 170 ถึง 110 W/m.k ขณะที่การเติม Al และสารประกอบของมันจะใช้ค่าการนำความร้อน 80 ถึง 60 W/m.k และทั้ง B และ Al หรือสารประกอบของมันจะให้ความสัมพันธ์ Current-Voltage เป็นเส้นกราฟโดยได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า 2×10^4 ถึง $1 \times 10^{11} \Omega\text{-cm}$ และ 0.6 ถึง 27 $\Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนและความต้านทานไฟฟ้าของซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อใช้ตัวช่วยซินเทอร์ริงชนิดต่างๆ

Additive	Thermal conductivity W/m.k	Electrical resistivity $\Omega\text{-cm}$
Be	260	3×10^{13}
Be ₂ ^C	260	1×10^{13}
BeO	270	4×10^{13}
B	170	2×10^4
B ₄ ^C	120	3×10^4
BN	110	1×10^{11}
Al	60	0.8
AlN	80	27
Al ₂ O ₃	70	0.6
AlPO ₄	60	0.7

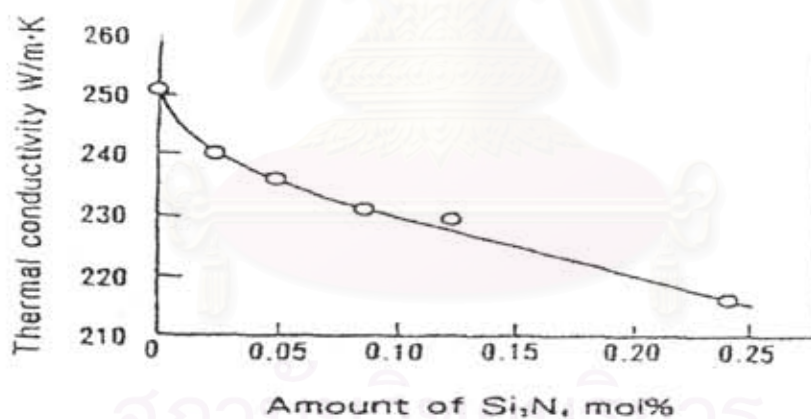


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Current-Voltage ที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อใช้สาร BeO 2% ในซิลิกอนคาร์ไบด์

ที่อุณหภูมิของสารประกอบ adamantine เช่น เพชร ซิลิกอนคาร์ไบด์และซิลิกอน จะเกิดการพาความร้อน โดยฟอนอนในวัสดุเหล่านี้ การนำความร้อนจะได้รับผลกระทบโดยสิ่งเจือปนหรือความเข้มข้นของตัวนำอิสระในผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ เริ่มต้นเป็น Semiconductor ชนิด N และสารเจือปนหลักที่ไวไฟฟ้า คือ ไนโตรเจน ในทางตรงกันข้ามซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มี BeO เป็น Additive Semiconductor จะเป็น Semiconductor ชนิด P จะมีอะตอม Be ซึ่งแพร่เข้าไปในผลึกของซิลิกอนคาร์ไบด์ SiC Ceramic จะทำหน้าที่เป็นตัวรับ (Acceptor) และชดเชยตัวพา (Carrier) ของชนิด N สมมติ N_D แทนความเข้มข้นของตัวให้ (Donor) และ N_A แทนความเข้มข้นของตัวรับ (Acceptor) ดังนั้นความเข้มข้นของตัวพา N ในเกรนของซิลิกอนคาร์ไบด์ มีค่า $n = [N_D - N_A]$ Maeda และคณะพยายามที่จะควบคุมความเข้มข้นของตัวพาภายในเกรนโดยการเติม Si_3N_4 ปริมาณเล็กน้อยเพื่อให้เป็น Donor Dopant

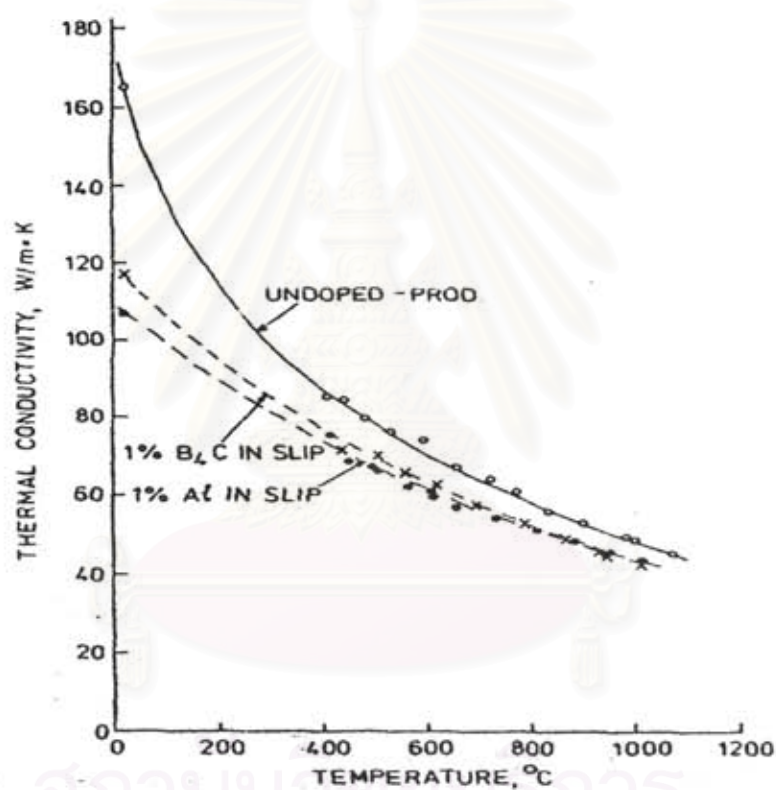
ดังนั้นความเข้มข้นของตัวนำจะมีค่าน้อยที่สุดที่ปริมาณการเติม Si_3N_4 ค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของสารเจือปนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม Si_3N_4 ที่เพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง คือ พงซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดเกรนเฉลี่ย 2 ไมครอน และประกอบด้วยสารเจือปนดังนี้ (ในรูปเปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก) free Si 0.68 free C 0.24, Fe 0.045, Al 0.024 และ SiO_2 0.93 ผสมกับผง BeO ที่เป็น Reagent Grade (ความบริสุทธิ์ 99.5 ถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ขนาดเกรนต่ำกว่า 0.25 และ ผง Si_3N_4 ซึ่งเป็น Reagent Grade ด้วย (บริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และขนาดเกรนเล็กกว่า $10\ \mu\text{m}$

การเติม Si_3N_4 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ไม่เติม จะมีการนำความร้อนสูงที่สุด (252 W/m.K) ถึงแม้ความเข้มข้นของตัวนำจะมีค่าต่ำสุดที่ 0.04 Mol% ถ้าการนำความร้อนลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์นี้ จะชี้ให้เห็นว่าการนำความร้อนขึ้นกับความเข้มข้นของสิ่งเจือปน แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของตัวนำ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนกับปริมาณของ Si_3N_4 ในซิลิกอน ซึ่งมี BeO 3.2 โมล

B. north พบว่า Reaction-Bonded Silicon Carbide ที่ Dope ด้วยโบรอนและอลูมิเนียม มีค่าการนำความร้อนลดลงอย่างมาก แต่การเติม Si_3N_4 , Ga, Bi, และ Sb ไม่มีผลกระทบต่อการนำความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าการเติมสารทุกตัวจะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ลักษณะที่เด่นชัดที่สุดของกราฟคือ การมารวมกันของเส้นกราฟที่ค่าประมาณ 40 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ที่ 1100°C การรวมกันนี้เกิดจากขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น การกระจายโฟนอน โดยอะตอมของสารเจือปนจะมีค่าความสำคัญน้อยลง และผลการสั่นของ Lattice จะเด่นกว่า



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิ

บทที่ 3
วิธีการวิจัยและทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดลองวิเคราะห์ และทดสอบแสดงใน
 ทงที่ 3.1

ทงที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	เครื่องหมายการค้า	แบบรุ่น
Ball Mill	-	-
Cold Isostatic Press	Unipress	CIP :300/40
Drying Oven	Memmert	UM 100-800
High Temperature Furnace -1700 °C -2400°C	Carbolite	-
Hydraulic Press	-	-
Digital Multimeter	Kiethley	-
Electronic Balance	Satorious	MC-1
Optical Microscope	Olympus	PM 20
Particle Size Analyzer	Micromeristic	Sedigraph 5100
Scanning Electron Microscope & Energy Dispersive X-ray Spectrometer	Phillips	PN 6800/70
Surface Area Analysis	Micromeristic	FlowsorbII
Thermal Analysis	-	-
X-ray Diffractometer	Phillips	PW 3719
X-ray Fluorescence	-	-

3.2 วัสดุติบและสารเคมี

วัสดุติบและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วัสดุติบและสารเคมี

ประเภทสาร	ชื่อ
ชิ้นส่วน Heating Element	-
สารตั้งต้น	- Silicon Carbide (SiC)
สารปรับปรุงสมบัติ	- Aluminum Oxide - Boron
สารเพิ่มการยึดเกาะ	- Polyvinyl Alcohol (PVA) - Polyethylene Glycol (PE)
สารช่วยกระจายตัว	- Ethyl Alcohol
สารกัดผิว	- Sodium Hydroxide (NaOH) - Potassium Ferro Cyanate ($KFe(CN)_6$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ขั้นตอนของการทดลอง

ในการทดลองนี้ประกอบด้วยการศึกษาสมบัติผลิตภัณฑ์ และการศึกษากระบวนการขึ้นรูปฟิลิกอนคาร์ไบด์

3.3.1 สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์มีดังนี้

3.3.1.1 การความหนาแน่น การตรวจวัดความหนาแน่น ใช้วิธีแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส ตามมาตรฐาน ASTM C373

3.3.1.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค การศึกษาเริ่มจากนำชิ้นผลิตภัณฑ์มาตัดเป็นชิ้นย่อยด้วยใบตัดเพชร แล้วแบ่งเป็นส่วนๆ เพื่อศึกษาสมบัติดังต่อไปนี้

ก. ส่วนที่นำไปหาองค์ประกอบทางเคมี ให้ทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้ Ultrasonic Cleaner แล้วเช็ดด้วย Acetone เป่าให้แห้งเพื่อขจัดความชื้น นำไปวิเคราะห์ค่าทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer EDX

ข. ส่วนที่วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน และความพรุน นำชิ้นงานไปขัดด้วยกริท ขนาด 180, 240, 450, 600, 800 และ 1200 ตามลำดับ แล้วขัดด้วยผงเพชร ขนาด 1 ไมครอน จากนั้นนำไปกัดผิวด้วยสารละลายผสมระหว่างไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์และโปตัสเซียมเพอร์โรซายานต ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที ถ่ายภาพตัวอย่างทั้งก่อนและหลังผ่านการกัดผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.1.3 การวัดค่า Resistivity (Ohms.cm) โดยใช้อุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถวัดค่า Current/Area (amp./cm²) กับค่า Potential/Thickness (Volt/cm) แล้วนำไปค่า Resistivity ดังสูตรคือ

$$\text{Ohms.cm} = \frac{\text{amp./cm}^2}{\text{Volt/cm}}$$



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดค่าความต้านทาน (Resistivity)

3.3.2 การศึกษากระบวนการขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์

3.3.2.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของสารตั้งต้นและสารปรับปรุงสมบัติ

- ก. วิเคราะห์ภูมิภาคด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer
- ข. วัดขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Sedigraph 5100
- ค. ตรวจวัดพื้นที่ผิวอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว Flowsorb 2300 ตามมาตรฐาน ASTM C 1069-80
- ง. ศึกษาลักษณะ รูปร่าง และขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscope

3.3.2.2 การศึกษาปริมาณของ PVA

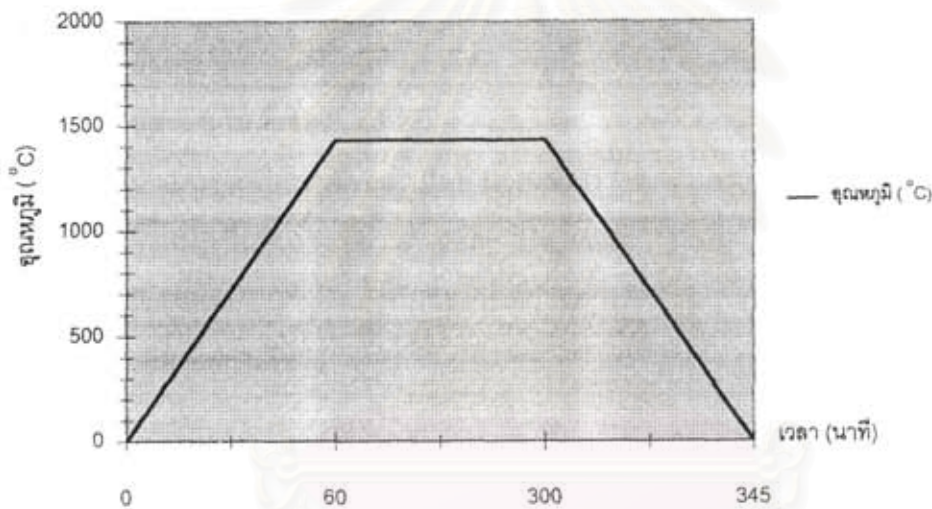
- ก. เตรียมส่วนผสมประมาณ 100 กรัม โดยคิดเปอร์เซ็นต์สารต่างๆ ต่อน้ำหนักของผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังระบุในตารางที่ 3.3 โดยจะผันแปรปริมาณ PVA เป็น 0.5, 1 และ 1.5 %

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนการผสมสารต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาปริมาณPVA

ส่วนผสม	ความเข้มข้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ซิลิกอนคาร์ไบด์	93
อลูมินาไดออกไซด์	0.25
โบรอน	0.25
โพลีเอทิลีนไกลคอล	5.00
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	0.5 , 1, 1.5

- ข. ทำการบดผสมเพื่อให้เกิดการกระจายที่สม่ำเสมอ ลดขนาดอนุภาค และเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยการบดผสมสารตามส่วนผสมในตารางที่ 3.3 ยกเว้น PVA ในหม้อบดอะลูมินากับลูกบดอะลูมินา ด้วยเครื่องบดแบบ Low Speed นาน 24 ชั่วโมง
- ค. นำสเลอริที่ได้อะไประเหย Acetone ให้แห้งโดยการกวนบน Hot plate stirrer หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C จนแห้งและบดให้ละเอียดด้วยโกร่งอลูมินา
- ง. นำผงที่บดละเอียดมาผสมกับ PVA ตามสัดส่วนที่กำหนด หลังจากนั้นนำไปผสมน้ำแล้วกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที นาน 30 นาที นำไประเหยให้แห้งด้วย Hot Plate Stirrer
- จ. นำของผสมในข้อ ง มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C ประมาณ 24 ชั่วโมง บดให้ละเอียด
- ฉ. นำผงที่ละเอียดมาคัดขนาดและเตรียมแกรนูล โดยการร่อนผ่านตะแกรงช่วงขนาด -50+100 (ผงที่ผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช แต่ค้างตะแกรง 100 เมช, ส่วนที่1) และ -100+140 เมช (ผงที่ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช แต่ค้างตะแกรง 140 เมช,ส่วนที่2) ผสมผงทั้ง 2 ส่วนในอัตราส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 : ส่วนที่ 2 = 60:40 จนเข้ากันดี และนำไปอบเพื่อควบคุมให้มีความชื้น 2.5 % ก่อนนำผงไปอัดขึ้นรูป

- ข. นำผงที่ผ่านการผสมจากข้อ จ มาอัดขึ้นรูปโดยเครื่อง Cold Isostatic Press ความดันในการอัด 250 Mpa นาน 3 นาที โดยใช้เป้าอัดรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 มิลลิเมตร
- ข. นำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผา ตามวิธีในข้อ 3.3.1.1 และไปเผาที่อุณหภูมิ 1430°C นาน 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ N_2 ตาม Temperature Profile (รูปที่ 3.2) แล้วจึงหาความหนาแน่นเช่นเดียวกับชิ้นงานก่อนเผา



รูปที่ 3.2 Temperature profile ของการเผา 1430°C

3.3.2.3 การศึกษาหาอัตราส่วนผสมของผงที่ร่อนผ่านตะแกรง

การศึกษาหาอัตราส่วนผสมของผงที่ร่อนผ่านตะแกรง เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของผงที่ผ่านการคัดขนาดต่างๆ โดยการผันแปรอัตราส่วนระหว่างผง - 50 + 100 กับผง -100 +140 คือ 60:40, 70:30, 80:20 ซึ่งจะทำการเตรียมผงตามตารางที่ 3.3 โดยกำหนดใช้ปริมาณ PVA 0.5% ส่วนการขั้นตอนอื่น ๆ อาทิ การอัดขึ้นรูป การเผา การตรวจวัดชิ้นงาน ก็เป็นไปทำนองเดียวกับการศึกษาหาปริมาณของ PVA ในหัวข้อ 3.3.3.1

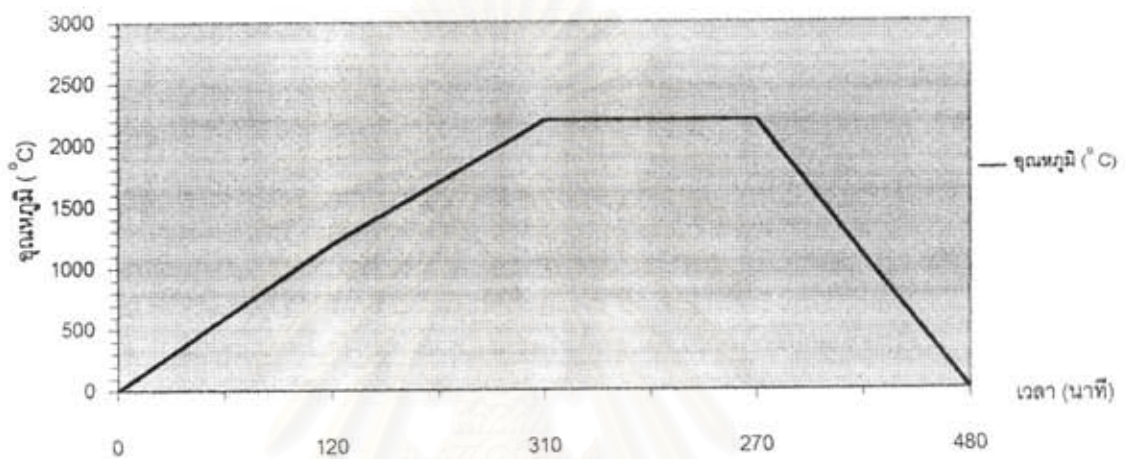
3.3.2.4 การศึกษาส่วนผสมระหว่างระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์และสารปรับปรุงสมบัติ

- ก. เตรียมส่วนผสมโดยผันแปรปริมาณสัดส่วนของซิลิกอนคาร์ไบด์ อลูมินาออกไซด์ และโบรอน ดังระบุในตารางที่ 3.4
- ข. สำหรับขั้นตอนตั้งแต่การบดผสม จนถึงการเตรียมแกรนูลจะใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้อ ก-ข ในหัวข้อ 3.3.2
- ค. นำแกรนูลที่ได้มาอัดขึ้นรูปโดย Hydraulic Press และ Cold Isostatic Press โดยจะแบ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอัด Hydraulic Press แล้วมาอัดซ้ำด้วย Cold Isostatic Press กับชิ้นงานที่ผ่านการอัดด้วย Cold Isostatic Press เพียงอย่างเดียว

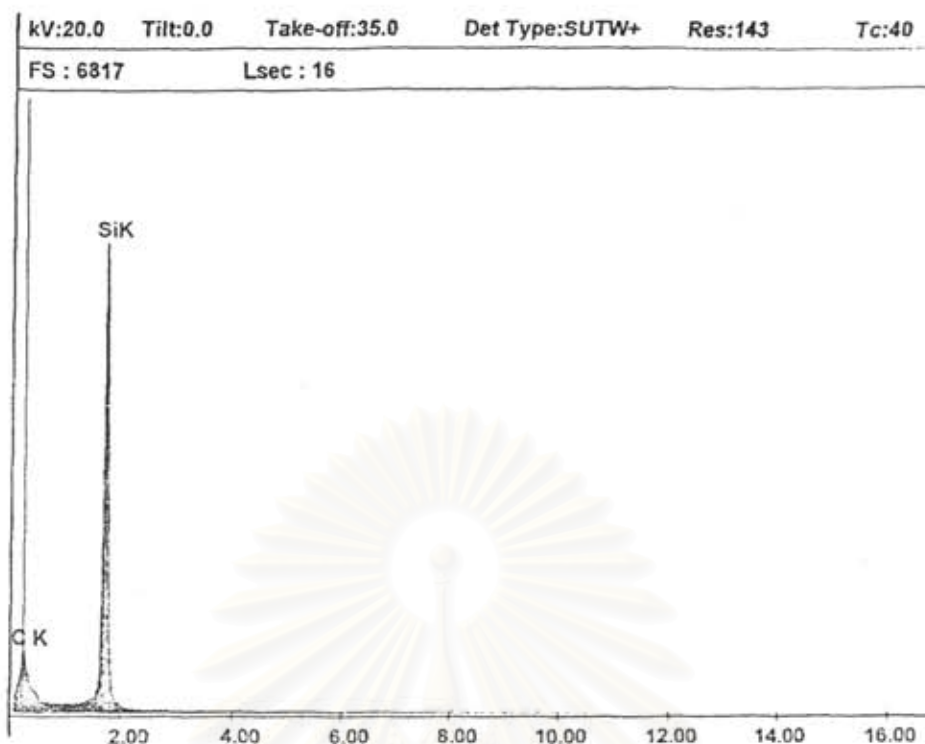
ตารางที่ 3.4 สัดส่วนการผสมสารต่างๆ ที่ใช้ศึกษาส่วนผสมระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์และสารปรับปรุงสมบัติ

สูตร	น้ำหนักสาร (%)				
	SiC	Al ₂ O ₃	B	PEG	PVA
A	93	0.25	0.25	5.00	1.5
B	92	0.75	0.75	5.00	1.5
C	90.5	1.50	1.50	5.00	1.5

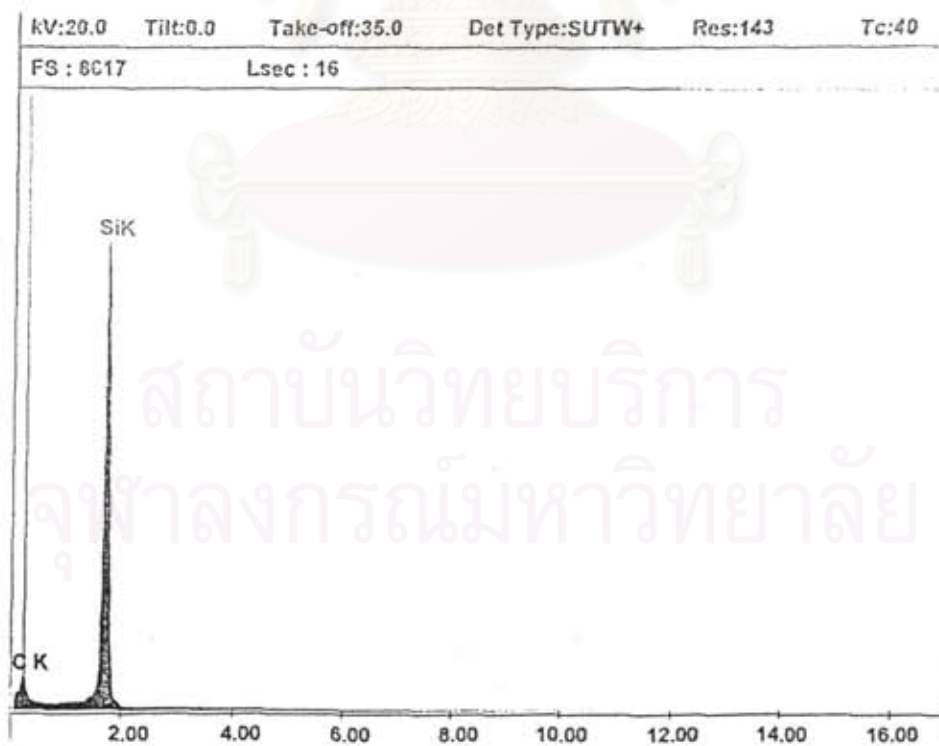
- ง. การเผาซินเทอร์ริงนำชิ้นงานที่ผ่านการเผา Calcite ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 1 ชั่วโมง มาเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 60 และ 180 นาที ตาม Temperature profile ในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นก็ตรวจวัดสมบัติดังต่อไปนี้ ความหนาแน่น, วัฏภาค, โครงสร้างจุลภาค และความต้านทานทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับลวดไฟฟ้า



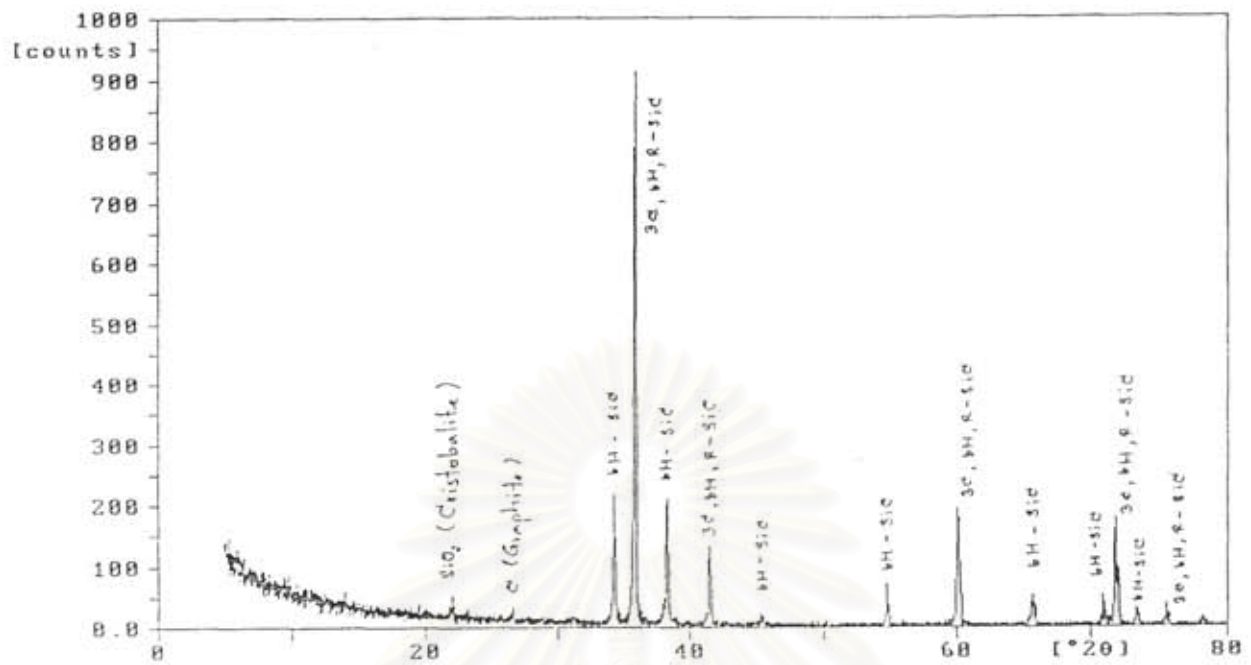
รูปที่ 3.3 Temperature Profile ที่อุณหภูมิ 2200°C



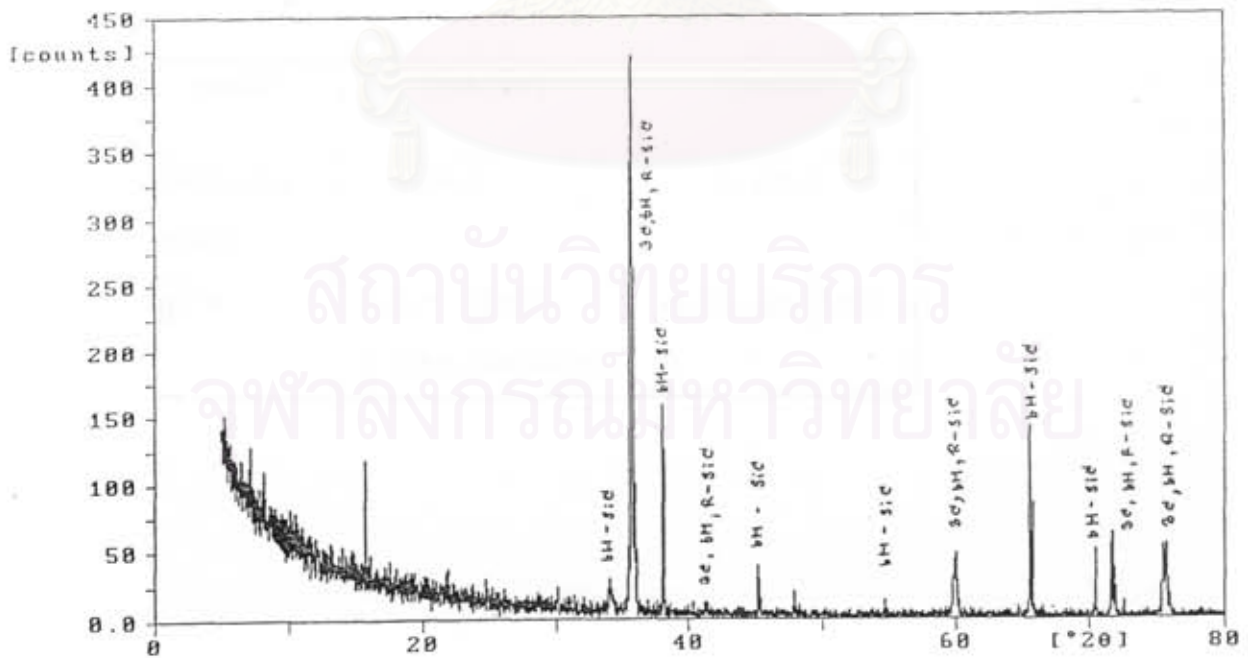
รูปที่ 4.1 Spectrum องค์ประกอบของลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวจากเครื่องEDX



รูปที่ 4.2 Spectrum องค์ประกอบของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงจากเครื่องEDX



รูปที่ 4.3 Pattern ของ XRD แสดงวิฤภาคจากการวิเคราะห์ผลวัดไฟฟ้าชนิดท่อเคลือบด้วยเครื่อง XRD



รูปที่ 4.4 Pattern ของ XRD แสดงวิฤภาคจากการวิเคราะห์ผลวัดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงด้วยเครื่อง XRD

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษามีผลการทดลองดังต่อไปนี้คือ

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของลวดไฟฟ้า

4.1.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมและวัฏภาค

ในตารางที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและวัฏภาคของลวดไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ท่อกลวง และท่อเกลียว พบว่าทั้ง 2 ชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกัน คือประกอบด้วยธาตุซิลิกอน และคาร์บอน ซึ่ง Spectrum ขององค์ประกอบลวดไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX ได้แสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 และเมื่อศึกษาผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าลวดไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด จะประกอบด้วยวัฏภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ คือ α -SiC มีรูปผลึกเป็น Cubic และ β -SiC โดย α -SiC มีทั้งที่อยู่ในรูปผลึกของ Hexagonal และ Rhombohedral สำหรับวัฏภาคของ Graphite กับ Silicon เฉพาะในลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและวัฏภาคของลวดไฟฟ้า

สมบัติ	ท่อเกลียว	ท่อกลวง
องค์ประกอบทางเคมี	Si และ C	Si และ C
วัฏภาค	α -SiC, β -SiC, Graphite และ Silicon	α -SiC และ β -SiC

4.1.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นและความพรุน

ผลการวัดความหนาแน่นของลวดไฟฟ้าของชนิดท่อเกลียวและชนิดท่อกลวง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่า 2.87 กรัม/ซม.³ และ 2.52 กรัม /ซม.³ ตามลำดับ โดยมีปริมาณของความพรุนในท่อเกลียวและในท่อกลวงมีค่า 2.7% และ 20.55% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงมีค่ามากกว่าชนิดท่อเกลียว ประมาณ 8 เท่า

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นและความพรุนในลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวและท่อกลวง

ชนิดลวดไฟฟ้า	ค่าความหนาแน่น(กรัม/ซม. ³)	ค่าความพรุน (%)
ท่อเกลียว	2.87	2.7
ท่อกลวง	2.52	20.55

4.1.3 การตรวจและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายจุลโครงสร้างของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงและท่อเกลียว ถ่ายจากบริเวณ Heat zone ด้วยเครื่อง SEM พบว่ามีการกระจายของตำแหน่งรูพรุนโดยทั่วไปทั้งชิ้นงาน ลักษณะของรูพรุนในลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวจะพบรูพรุนชนิดที่เป็นรูปอิกวิแอกซ์และรูพรุนที่มีรูปร่างยาว ส่วนในลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงจะพบเฉพาะรูพรุนรูปร่างอิกวิแอกซ์ โดยเมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายระหว่างลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวกับชนิดท่อกลวง ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงมีความพรุนมากกว่าชนิดท่อเกลียวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความพรุน

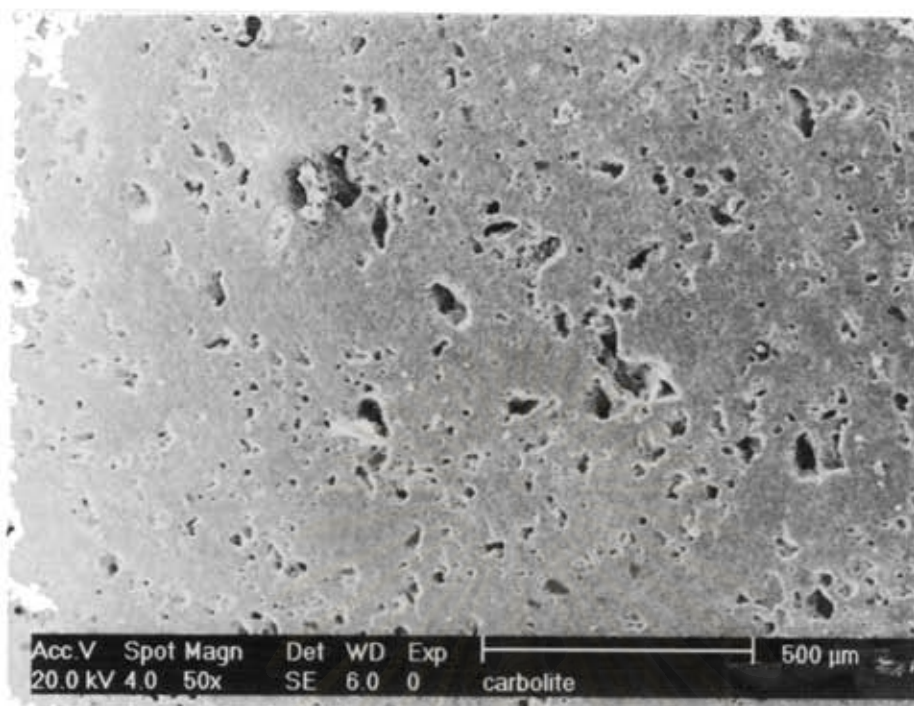
จากภาพถ่ายรูปร่างหรือลักษณะของเกรนในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่า ในลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวเกรนจะมีขนาดสม่ำเสมอมีค่าเฉลี่ย 1.25 ไมครอน และมีรูปร่างเป็นอิกวิแอกซ์ ส่วนลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงขนาดของเกรนจะมีความสม่ำเสมอเช่นกัน ขนาดเฉลี่ยของเกรนจะมีค่า 1.20 ไมครอน และเกรนจะมีรูปร่างอิกวิแอกซ์ สำหรับสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าความพรุนและโครงสร้างจุลภาคของลวดทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูป

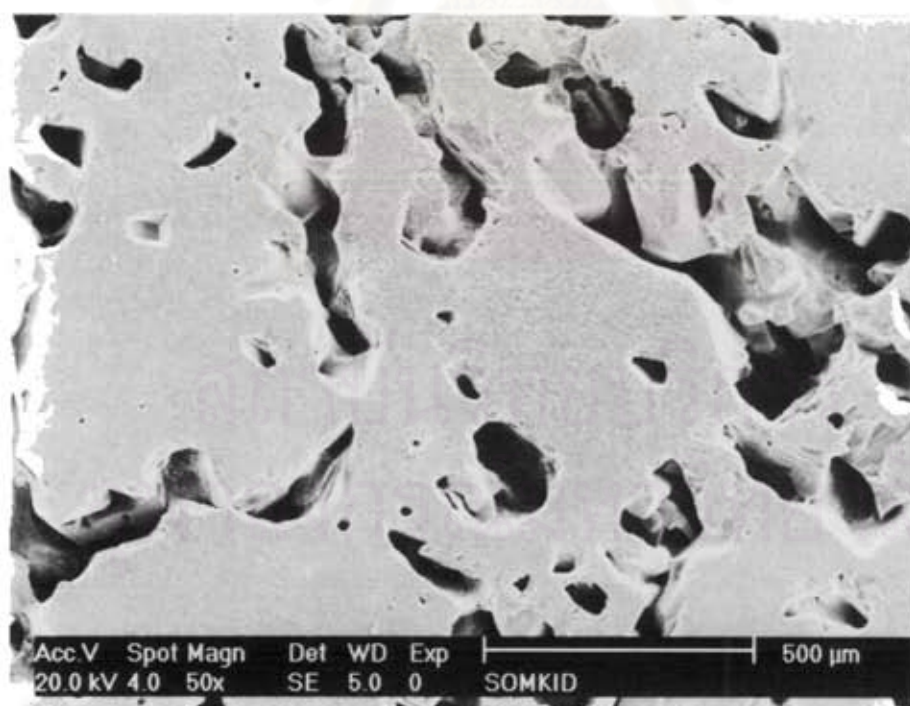
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

สมบัติทางโครงสร้างจุลภาค	ลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว	ลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง
ลักษณะทั่วไปของรูพรุน	รูพรุนเปิด (open pore) มีรูปร่างเป็นอิควิแอกซ์ รูพรุนเดี่ยว กระจายทั่วไป	รูพรุนเปิด รูปร่างยาว กระจาย ทั่วไปบนพื้นผิว
รูปร่างลักษณะของเกรน	อิควิแอกซ์	อิควิแอกซ์
ขนาดเฉลี่ยของเกรน (ไมครอน)	1.25	1.42

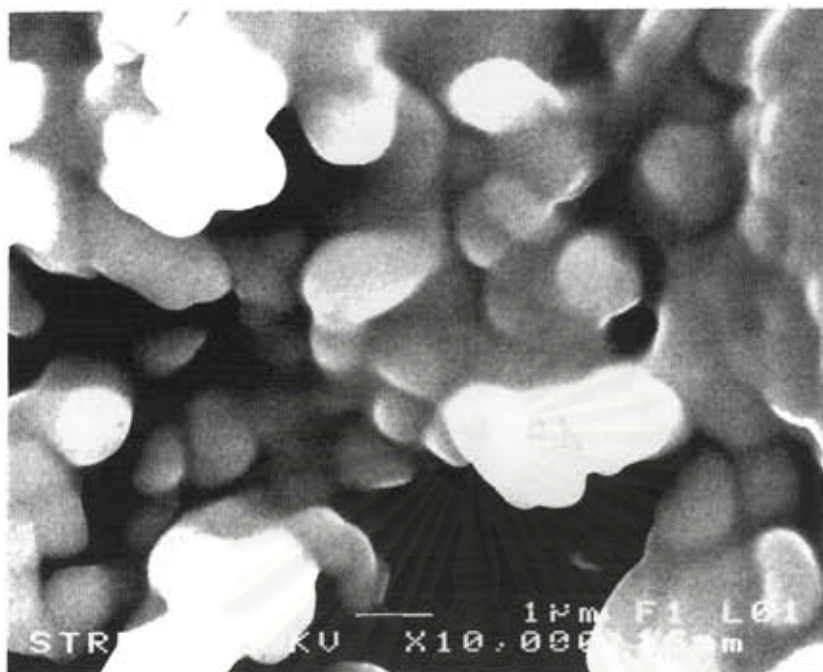
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



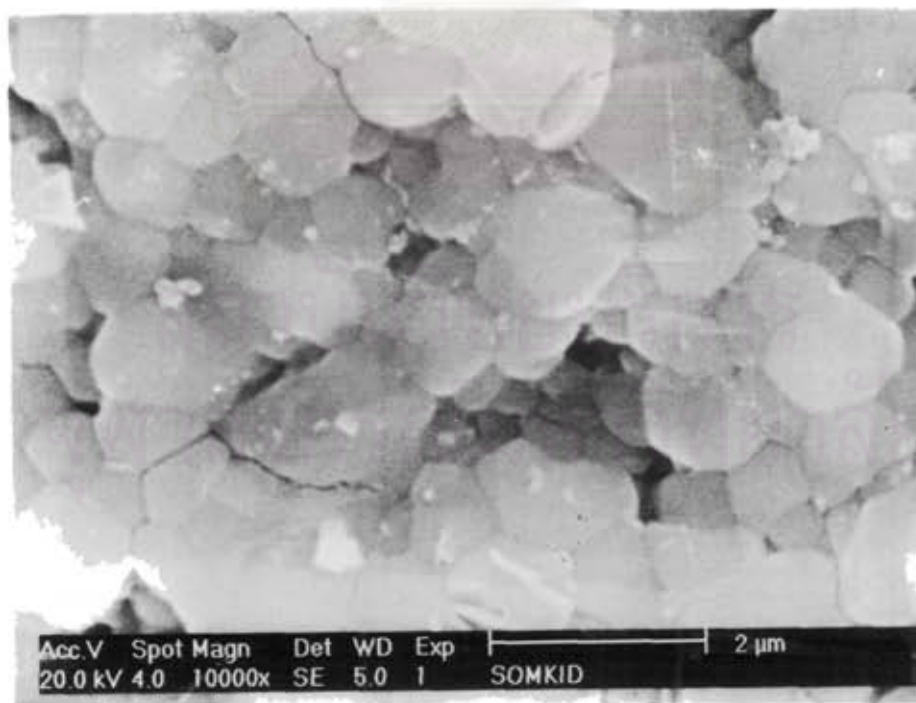
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะทั่วไปของลวดไฟฟ้าชนิดทอเกลียว



รูปที่ 4.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะทั่วไปของลวดไฟฟ้าชนิดทอกลวง



รูปที่ 4.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะและขนาดเกรนของลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM แสดงลักษณะและขนาดเกรนของลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง

4.1.4 ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)

จากผลการวัดค่าความต้านทานในลวดไฟฟ้าทั้งท่อเกลียวและท่อกลวงพบว่ามีค่าความต้านทานเท่ากัน คือ มีค่า $0.14 \Omega \cdot \text{cm}$ เมื่อให้แรงเคลื่อน 380 โวลต์ และลดลงเป็น $0.80 \Omega \cdot \text{cm}$ เมื่อให้แรงเคลื่อน 1000 โวลต์ ซึ่งค่าความต้านทานของลวดไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่า $1 \Omega \cdot \text{cm}$ สำหรับค่าความต้านทานลวดไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ($\leq 1 \Omega \cdot \text{cm}$) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่อุณหภูมิสูงลดลงสามารถควบคุมความร้อนได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้การออกแบบลวดไฟฟ้ามีรูปร่างที่เหมาะสมเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทาน

ชนิดลวดไฟฟ้า	ค่าความต้านทาน ($\Omega \cdot \text{cm}$)	
	1000 โวลต์	380 โวลต์
ท่อเกลียว	0.08	0.14
ท่อกลวง	0.08	0.14

4.2 ผลการศึกษาการขึ้นรูปในห้องปฏิบัติการ

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของสารตั้งต้น

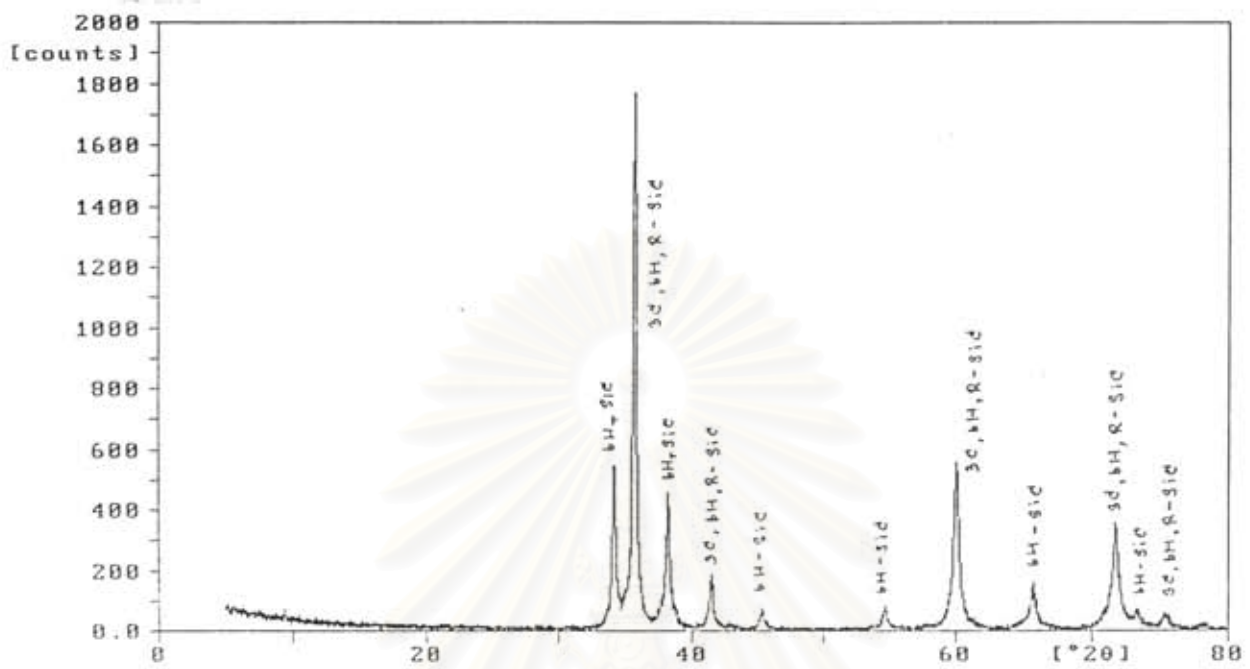
ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นคือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบพีคที่ได้เครื่อง XRD ในรูปที่ 4.9 สูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 35.656 พีคที่รองลงมาจะอยู่ที่มุม 2θ เท่ากับ 59.996 และ 34.089 องศา ตามลำดับ (Pattern 29-1128) พบว่าสารตั้งต้นมีวิภาคอยู่ในรูป β -SiC มีรูปผลึก เป็นแบบ Cubic และ α -SiC มี รูปทรงผลึกเป็นแบบ Hexagonal และ Rhombohedral สำหรับปริมาณสารปนเปื้อนมีค่าต่ำกว่าค่า Detection limit ของเครื่องจึงไม่สามารถวัดได้

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิคอนคาร์ไบด์พบว่ามีค่า 10.85 ตารางเมตร/กรัม และรูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจากกราฟพบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d50) มีค่า 0.70 ไมครอน ช่วงการกระจายของอนุภาคมีตั้งแต่ 10 ไมครอน จนถึงน้อยกว่า 1 ไมครอน

ตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะเฉพาะของผงซิลิคอนคาร์ไบด์

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
วัสดุภาค	β -SiC และ α -SiC
พื้นที่ผิวจำเพาะ(เมตร ² /กรัม)	10.85
การกระจายขนาด(ไมครอน)	
- ร้อยละ 90	2.6
- ร้อยละ 50	0.70
- ร้อยละ 10	-

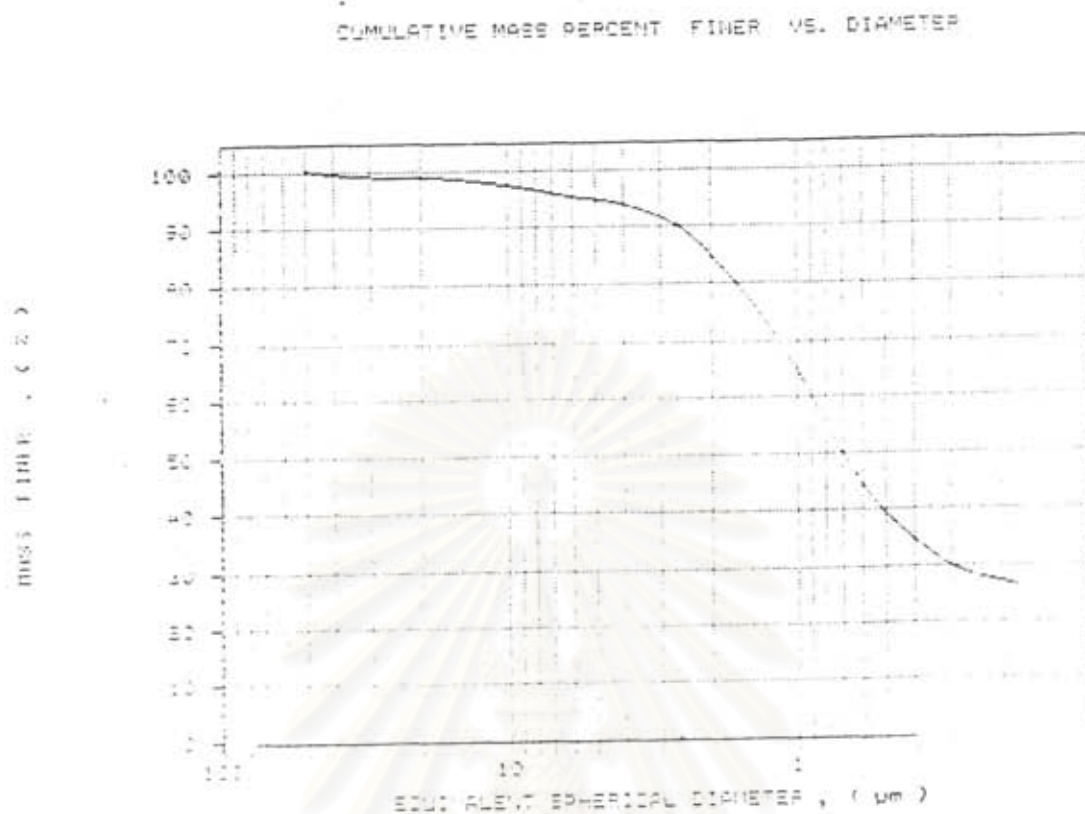
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของผงซิลิกอนคาร์ไบด์



รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายผงซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องTEM



รูปที่ 4.11 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปริมาณสะสมของผงซิลิกอนคาร์ไบด์

4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสารปรับปรุงสมบัติ คือ อลูมินาออกไซด์และโบรอน แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.12-4.16 พบว่า ทั้งผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และโบรอน มีรูปแบบ Pattern XRD ดังแสดงต่อไปนี้ คือ อลูมินาออกไซด์ประกอบด้วยวัฏภาค หลักคือ คอร์ันดัม ส่วนมากของโบรอน พบว่ามีโบรอนเป็นวัฏภาคหลักรองลงมา คือ อลูมินบอไรต์

การวิเคราะห์ที่พื้นผิวจำเพาะพบว่า โบรอนมีค่า 8.23 ตารางเมตร/กรัม และอลูมินาออกไซด์มีค่า 8.16 ตารางเมตร/กรัม รูปแบบการกระจายขนาดอนุภาคของอลูมินาออกไซด์และโบรอน ดังในรูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 พบว่ามีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ 0.34 ไมครอน ส่วนโบรอนมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 4.08 ไมครอน

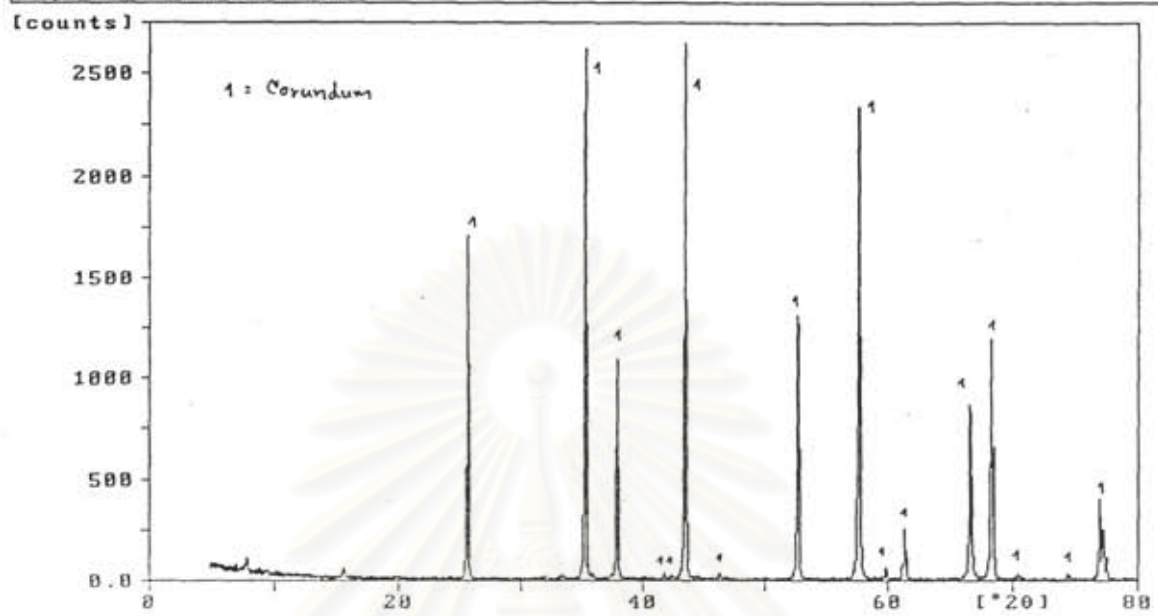
ลักษณะของอนุภาคขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะ และการกระจายของอนุภาคต่างๆ ของวัตถุดิบใน ผงผสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องทำการควบคุม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการบดขนาดของอนุภาคลง และเพิ่มการกระจายอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มพื้นที่จำเพาะที่จะให้มีผลเชิงบวกในขั้นตอน การซินเทอร์ริงมากขึ้น ซึ่งได้มีการใช้ผงเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กจะทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผาซินเทอร์ริงมีความ แข็งแรงดีขึ้น

ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะเฉพาะที่วัดได้ของผงอลูมิเนียมไดออกไซด์และโบรอน

สมบัติ	ค่าที่วัดได้	
	อลูมิเนียมไดออกไซด์	โบรอน
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	8.16	8.23
วิฏภาค	คอรัันดัม	โบรอน อลูมิเนียมบอไรด์
การกระจายขนาด (ไมครอน)		
- ร้อยละ 90	1	-
- ร้อยละ 50	0.34	-
- ร้อยละ 10	-	-

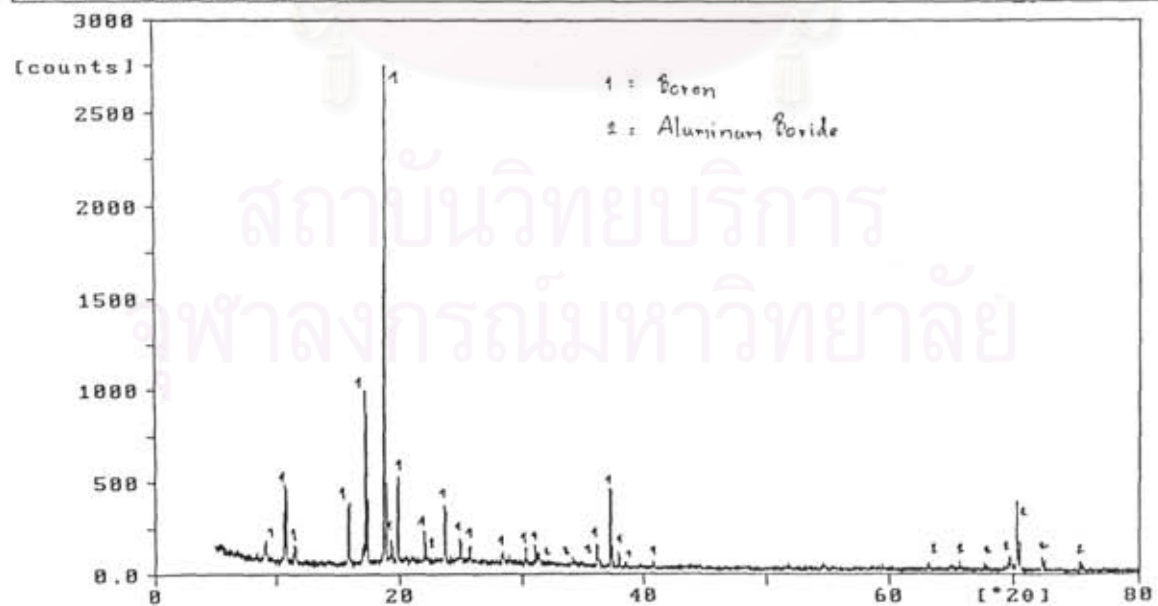
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample identification: Al2O3



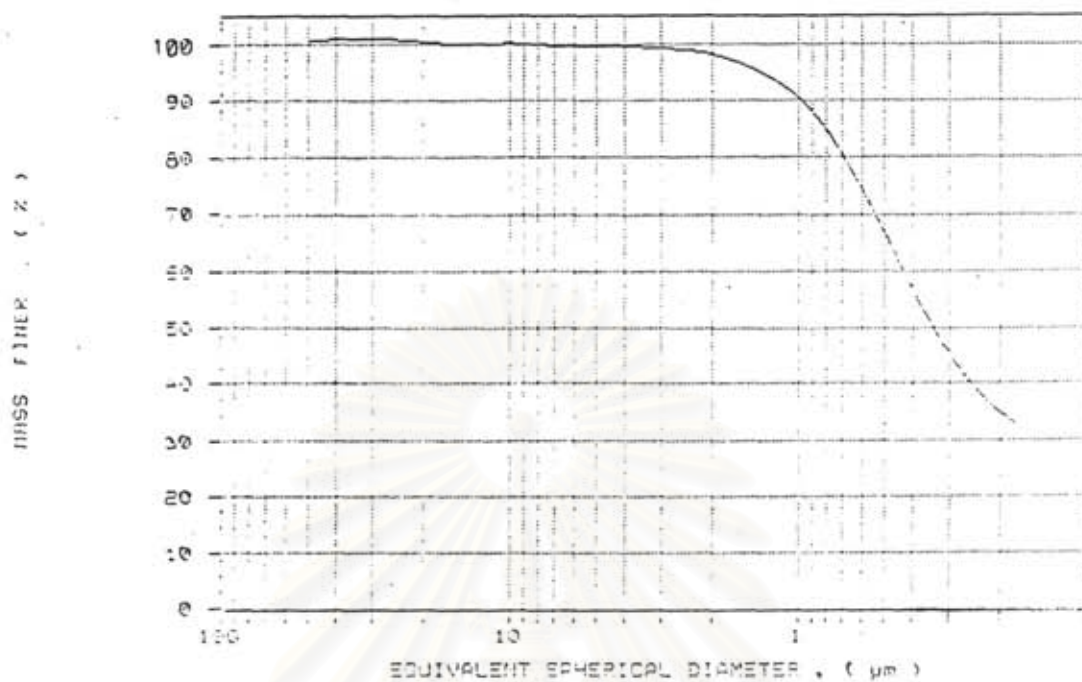
รูปที่ 4.12 Pattern ของ XRD แสดงวิฤภาคของผงอลูมินาออกไซด์

Sample identification: Boron



รูปที่ 4.13 Pattern ของ XRD แสดงวิฤภาคของผงโบรอน

CUMULATIVE MASS PERCENT FINER VS. DIAMETER



รูปที่ 4.14 รูปแบบการกระจายขนาดแบบประมาณสะสมของผงอลูมินาออกไซด์



รูปที่ 4.15 แสดงภาพถ่ายของผงอลูมินาออกไซด์ด้วยเครื่องTEM

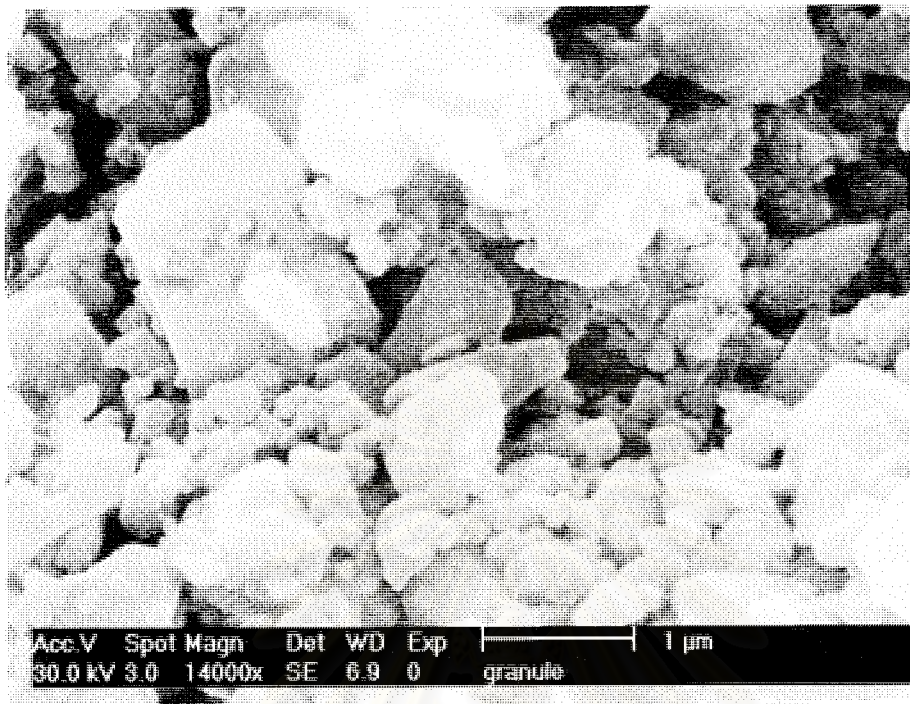


รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายของผงโบรอนด้วยเครื่องTEM

4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะของผงผสมหลังการบด

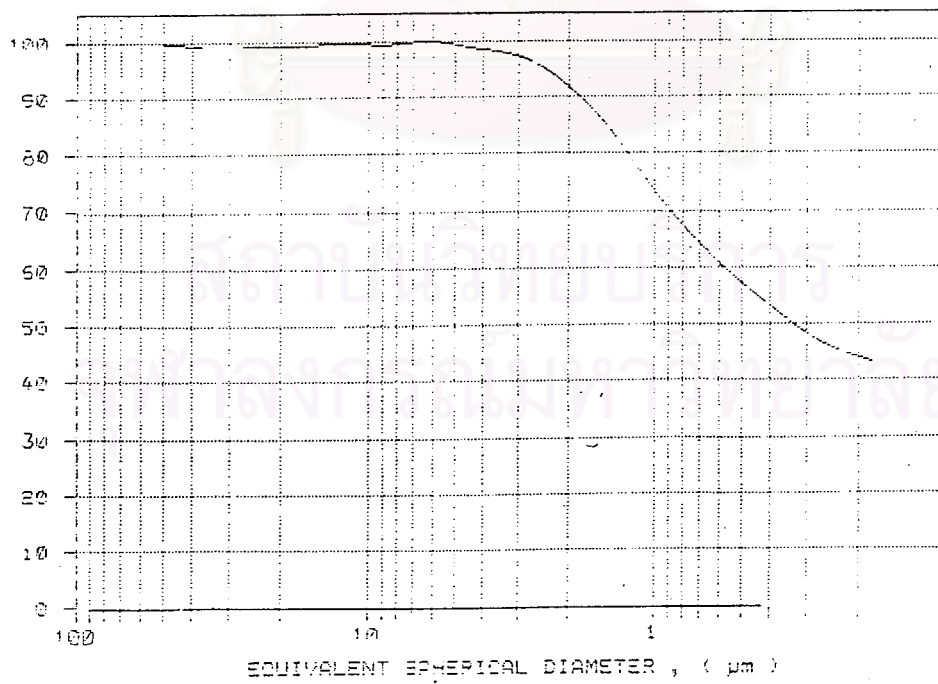
4.2.3.1 การตรวจวัดลักษณะของผงผสม

จากผลการตรวจวัดการกระจายตัวของผงผสมหลังการบดพบว่า มีอนุภาคขนาดเล็ก 0.33 ไมครอน ลักษณะการกระจายของขนาดอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.17 สำหรับรูปร่างของผงผสมที่ผ่านการบดและผสมสารเพิ่มการยึดเกาะจะจับตัวกันเป็นแอมพลูลมีหลายขนาดอยู่ในช่วง 0.41-1.8 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 การที่ต้องใช้สารเพิ่มการยึดเกาะเป็นเพราะอนุภาคของวัสดุประเภทเซรามิกมีความแข็งมาก ดังนั้นอนุภาคจึงเปลี่ยนรูปร่างแบบอพลาสติกเพียงอย่างเดียว ทำให้อนุภาคไม่สามารถยึดเกาะกันเป็นชิ้นงานได้ สารเพิ่มการยึดเกาะซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์จึงทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกด้วย ทำให้การแตกหักขณะการขึ้นรูปไม่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.17 ลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาคผงผสม

CUMULATIVE MASS PERCENT FINER VS. DIAMETER



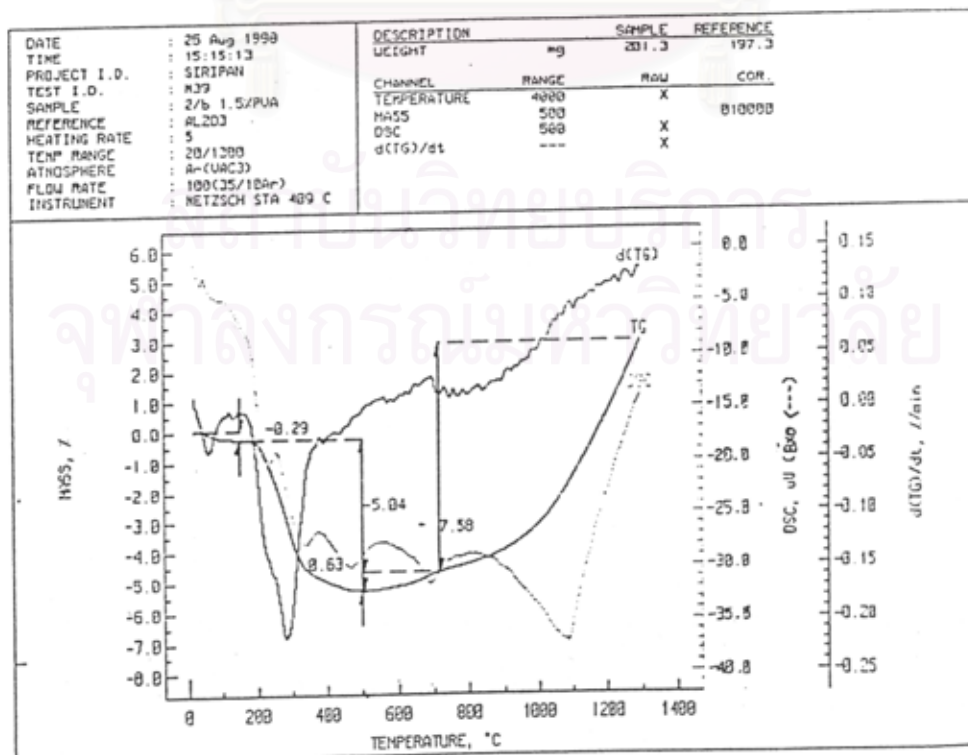
รูปที่ 4.18 รูปแบบการกระจายขนาดแบบปริมาณสะสมของผงผสม

4.2.3.2 การศึกษาด้านความร้อนของแกรนูล

จากการพิจารณาเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นมากใน 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิ 80-500 °C กับ 500-1300 °C การสูญเสียน้ำหนักเริ่มเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 80 °C จนถึงอุณหภูมิ 500 °C ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 5.3 และช่วงอุณหภูมิ 500-1300 °C จะเริ่มมีการเพิ่มของน้ำหนักสารคิดเป็นร้อยละ 8.21

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิถึง 110 °C เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 200 °C จนถึงอุณหภูมิ 500-600 °C เป็นปฏิกิริยาดีโพลิเมอไรเซชันและออกซิเดชันของสารเติมการยึดเกาะ คือ PVA และ PEG สำหรับน้ำหนักของสารที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C น่าจะเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานเริ่มเกิดกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดมีมวลของสารใหม่ซึ่งมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์ผลทางความร้อนหรือเทอร์โมแกรมที่ได้นี้มีความสำคัญ คือ สามารถนำไปใช้พิจารณาตารางแสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาไล่สารประเภทอินทรีย์และการแคลไซน์ เพราะการให้ความร้อนในอัตราที่สูงเกินไป จะทำให้สารอินทรีย์เกิดการเผาไม่สมบูรณ์ เหลือชีง์ไว้ในผลิตภัณฑ์กลายเป็นสิ่งมลทินในชิ้นงาน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดรอยแตกขึ้นในชิ้นงาน การเผาไล่สารจึงควรให้อัตราการเพิ่มความร้อนต่ำแต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงขนาดชิ้นงานด้วย



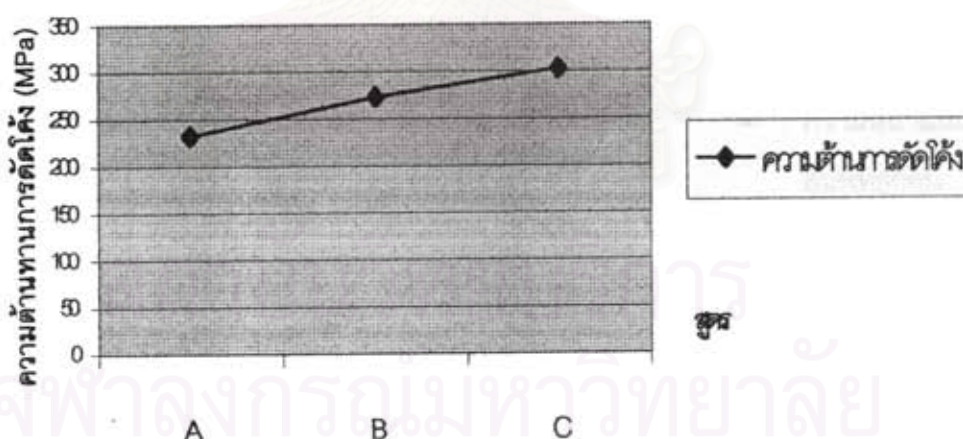
รูปที่ 4.19 เทอร์โมแกรมของแกรนูล

4.2.4 ปัจจัยที่มีผลการขึ้นรูปและสมบัติของชิ้นงาน

สำหรับผลของปัจจัยในการเตรียมชิ้นงานก่อนและหลังการเผา มีดังต่อไปนี้

4.2.4.1 อิทธิพลของปริมาณ PVA ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผา

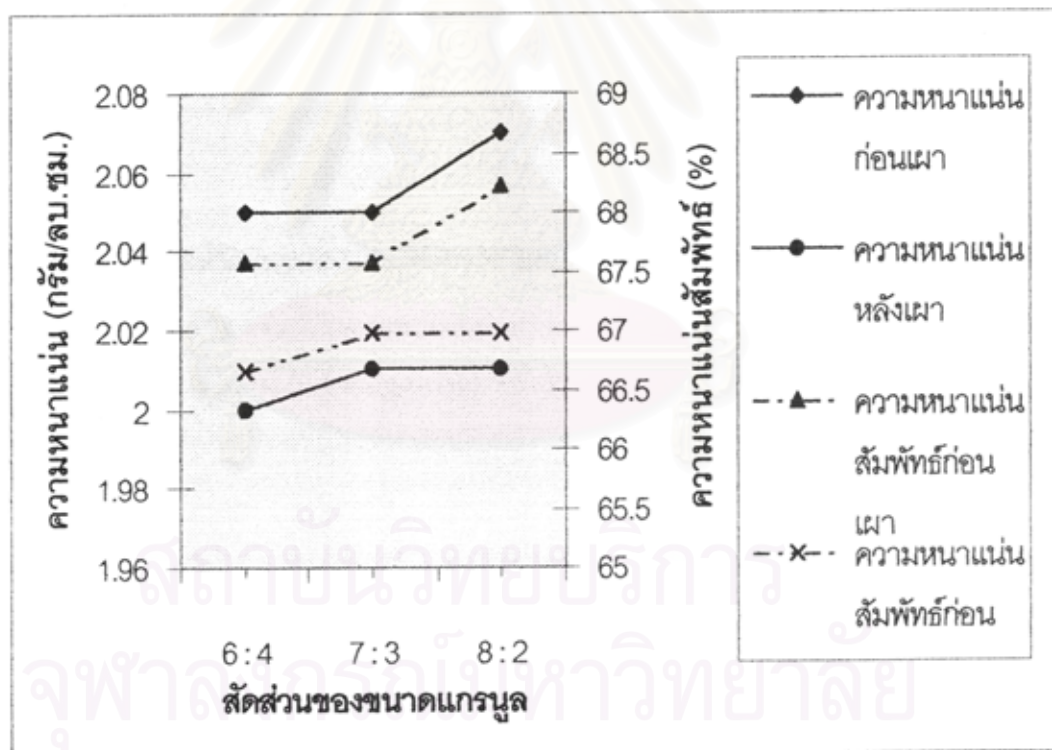
การใช้ปริมาณสารเพิ่มการยึดเกาะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการขึ้นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ สาร PVA เป็นสารเพิ่มการยึดเกาะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางเซรามิก ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งของ PVA ที่มีต่อความหนาแน่นของชิ้นงานคือ ความเข้มข้น จากการขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้ผ่านการแกว่งและใช้ปริมาณ PVA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผา ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็น 65.62, 68.37 และ 67.62% เมื่อความเข้มข้น PVA มีค่า 0.5, 1 และ 1.5 ตามลำดับ และพบว่าปริมาณความแตกต่างของความเข้มข้นของ PVA ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผา และหลังเผาที่ 1430°C นาน 4 ชั่วโมง ความหนาแน่นก่อนเผา ดังนั้นในการเลือกใช้ปริมาณ PVA จึงใช้ความเข้มข้นใดก็ได้ เพราะให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาในระดับที่น่าพอใจทุกระดับ แต่ในการศึกษานี้จะเลือกใช้ที่ความเข้มข้น 1.5 % เพื่อใช้ในการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA และความหนาแน่นของชิ้นก่อนเผา และหลังเผา 1430°C นาน 4 ชั่วโมง

4.2.4.2 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดแกรนูลต่อความหนาแน่น

ขนาดของอนุภาคหรือแกรนูลมีผลต่อการอัดแน่นของชิ้นงาน การอัดตัวของชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคหรือแกรนูลที่แตกต่างกันจะมีการอัดตัวได้ดีกว่าการอัดตัวที่มีอนุภาคหรือแกรนูลขนาดเดียว อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของแต่ละขนาดนั้นเป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งจากการศึกษาสัดส่วนแกรนูลที่ผ่านเมชขนาด -50+100 กับ -100+140 ในอัตรา -50+100 : -100+140 เท่ากับ 6 : 4, 7 : 3 และ 8 : 2 ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาและหลังการเผา 1430°C นาน 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดทั้งก่อนเผาและหลังเผา ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ที่สัดส่วน 6 : 4 เพื่อให้มีอนุภาคนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะอันจะช่วยเสริมกระบวนการเกิดซินเทอร์ริงเมื่อเผาถึงอุณหภูมิสูง (>2000°C)



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนขนาดแกรนูลกับความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนเผาและหลังเผา 1430°C นาน 4 ชั่วโมง

4.2.4.3 การศึกษาอิทธิพลของสารสารปรับปรุงสมบัติในส่วนผสมสูตรต่าง ๆ

สำหรับผลการศึกษาร่วมผสมสูตรต่างๆ ที่มีซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นสารตั้งต้นและมีอลูมินาออกไซด์และโบรอนเป็นสารปรับปรุงสมบัติที่จะได้กล่าวถึงผลต่อไปนี้จะเน้นเฉพาะอิทธิพลของสารปรับปรุงสมบัติคือ อลูมินาออกไซด์และโบรอนเป็นหลัก

ก. ผลการศึกษาด้านความหนาแน่น

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.22-4.25 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกับความเข้มข้นต่างๆ ของอลูมินาออกไซด์กับโบรอน ซึ่งใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 2200/ชม.³ นาน 1 และ 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นพบว่า ค่าความหนาแน่นเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 1.72-1.96 กรัม/ชม.³ และไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน และเมื่อเพิ่มเวลาเผาเป็น 3 ชั่วโมง ก็พบว่าค่าความหนาแน่นเป็นไปทำนองเดียวกับการเผา 1 ชั่วโมง โดยมีค่าความหนาแน่นระหว่าง 1-1.76 กรัม/ชม.³ เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของเวลาเผาที่ 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มไม่แตกต่างตามเวลาการเผา

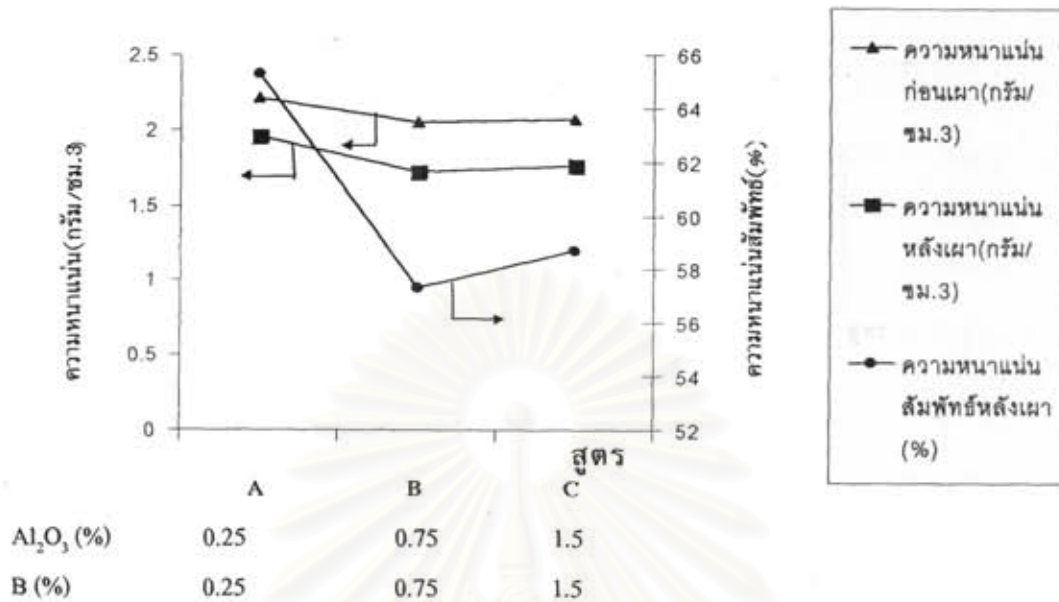
สำหรับความหนาแน่นของ SiC ได้มีการรายงานพบว่า การเผา SiC โดยไม่มีแรงดันที่อุณหภูมิสูง (>2000°C) เพื่อให้เกิด Recrystalline silicon carbide ความหนาแน่นจะเป็นผลจากการระเหย (Evaporation) และควบแน่น (Condensation) ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Self-bonded SiC ซึ่งจะไม่มี การหดตัวของชิ้นงาน ความหนาแน่นก่อนเผากับหลังเผาจึงไม่แตกต่างกัน ชิ้นงานมีความหนาแน่น 2.6 กรัม/ชม.³

จากการวิเคราะห์ความพรุนพบว่า ค่าความพรุนของชิ้นงานที่เผา 2200°C นาน 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง จะเป็นไปทำนองเดียวกับค่าความหนาแน่น โดยไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน ค่าความพรุนเมื่อเผา 1 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 36.22-42.21% ส่วนชิ้นงานที่เผานาน 3 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 42.25-43.03%

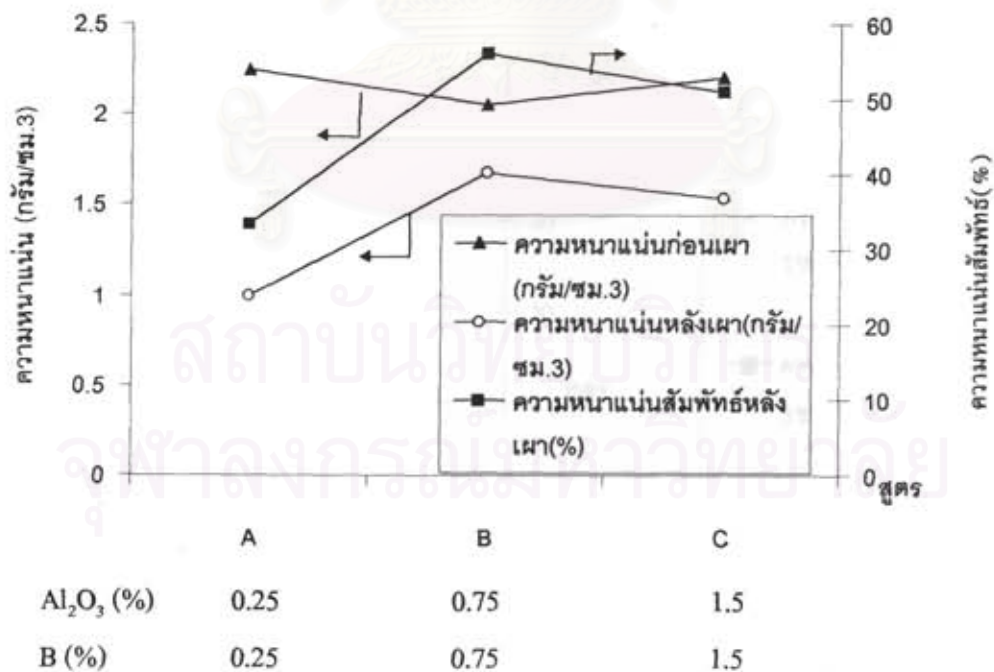
สำหรับผลการทดลองนี้พบว่าค่าความหนาแน่นหลังเผาจะลดลงและมีความพรุนสูง ซึ่งคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation หรืออื่นๆ ที่ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนัก โดยสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหลังการเผาซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติต่อความหนาแน่น

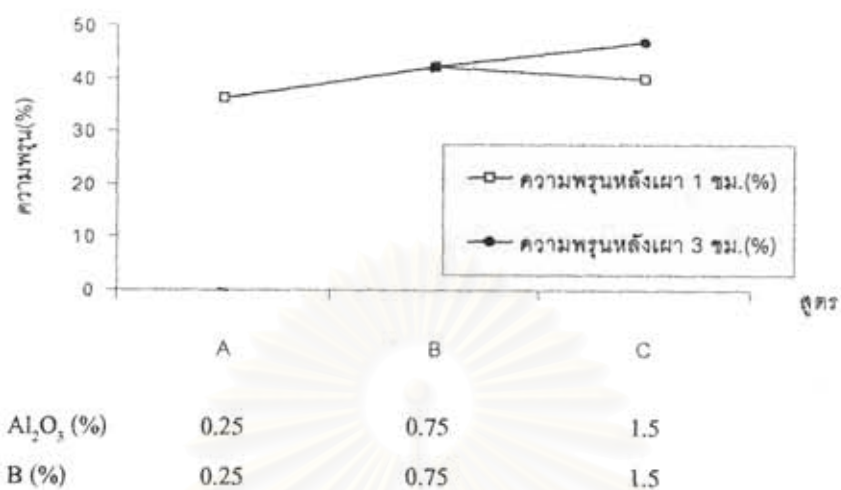
สูตร	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)			ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)		ความพรุน (%)	
	ก่อนเผา	เผา 1 ชม.	เผา 3 ชม.	หลังเผา 1 ชม.	หลังเผา 3 ชม.	หลังเผา 1 ชม.	หลังเผา 3 ชม.
A	2.21	1.96	1	65.32	33.32	36.22	-
B	2.05	1.72	1.68	57.35	56.02	42.21	42.25
C	2.07	1.76	1.53	58.73	51.06	39.9	47.03



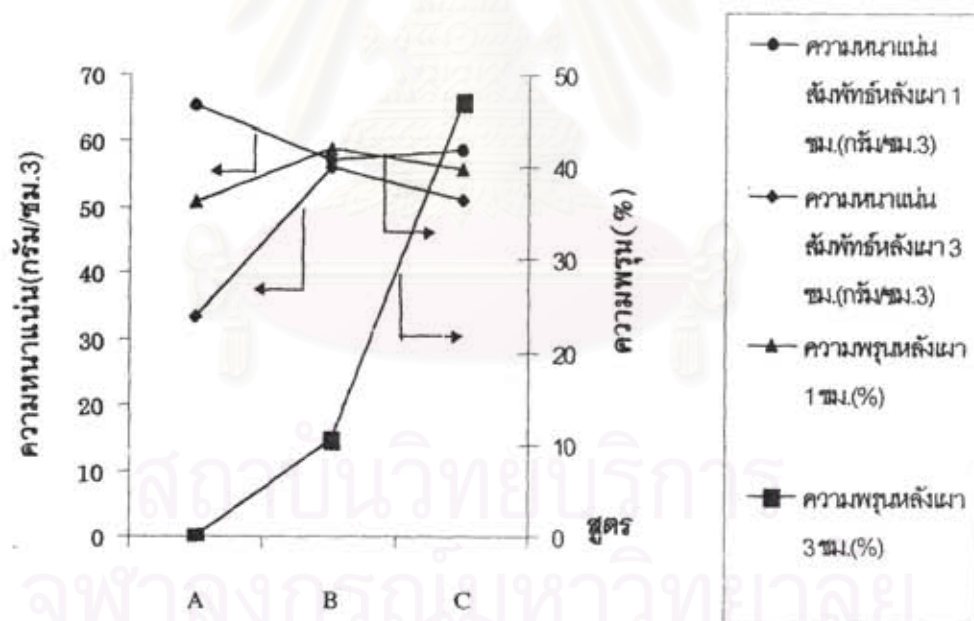
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติเมื่อเผาที่ 2200°C 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติเมื่อเผาที่ 2200°C 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความพรุนหลังเผา 1 และ 3 ชั่วโมง

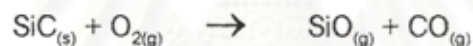


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และความพรุนหลังเผา 1 และ 3 ชั่วโมง

ข. ผลการศึกษาน้ำหนักที่สูญเสีย

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติกับน้ำหนักที่สูญเสียที่อุณหภูมิ 2200°C 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง แสดงผลตารางที่ 4.8 และในรูปที่ 4.22 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของน้ำหนักหลังการเผาไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน และเวลาในการเผาทุกสูตร A ที่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด เมื่อเผา 1 ชั่วโมง ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักที่ 3 ชั่วโมง น่าจะเป็นผลจากการเผาไหม้เพราะชิ้นงานจะกรอบและร่วน โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวด้านนอก

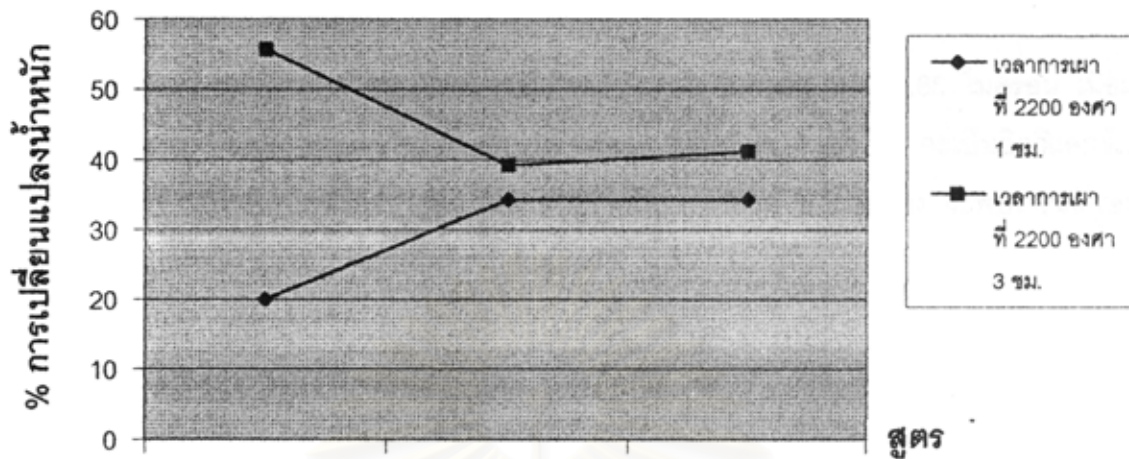
สำหรับการสูญเสียน้ำหนักเกิดจากการเผาไหม้ของสารเพิ่มการยึดเหนี่ยว คือ PVA และ PEG ตลอดจนความชื้น คิดเป็นประมาณ 8% ซึ่งแสดงได้จากผลทดสอบได้จากผลการทดสอบด้านความร้อนของแกรนูล การสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่านี้เป็นผลจากการเกิดเผาไหม้ของ SiC เนื่องจากการเกิด Oxidation ของ SiC กลายเป็นไอระเหยของ SiO และ CO ตัวสมการ



จากการเผาชิ้นงานในการทดลองนี้ คาดว่าการเกิดของ O₂ น่าจะมาจาก O₂ และความชื้นที่ดูดซับอยู่ที่บริเวณรูพรุนของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานมีรูพรุนสูง (>30%) ทำให้มีโอกาสดูดซับ O₂ และความชื้นได้เมื่อทิ้งไว้บรรยากาศปกติ นอกจากนี้ก็มีรายงานว่า Al₂O₃ สามารถปลดปล่อย O₂ ได้เช่นกัน และกลายเป็นโลหะอลูมิเนียม สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของ SiC ในการเผาที่อุณหภูมิสูง นอกจากเป็นผลของ Oxidation แล้ว ยังมีรายงานว่าธาตุ Al และ B ก็มีส่วนทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการสูญเสียน้ำหนักในการทดลองนี้ก็มีความโน้มไปตามรายงานเช่นกันเพราะค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสารปรับปรุงสมบัติ

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ และเวลาเผา

เวลาการเผา ที่ 2200 °C (ชั่วโมง)	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (%)		
	สูตร A	สูตร B	สูตร C
1	19.91	34.37	34.16
3	55.73	39.20	41.15



	A	B	C
Al ₂ O ₃ (%)	0.25	0.75	1.5
B (%)	0.25	0.75	1.5

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 2200 °C

ค. การตรวจดูโครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายจุลโครงสร้างของชิ้นงานหลังการเผาที่ 2200 °C นาน 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง เมื่อใช้ส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.27-4.32 และซึ่งพบว่า ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ ในชิ้นงานจะมีความพรุนตัวสูง รูพรุนจะมีรูปร่างไม่แน่นอน และเชื่อมติดต่อกันถึงพื้นผิวซึ่งเป็นลักษณะของรูพรุนเปิด

รูปร่างหรือลักษณะของเกรนของชิ้นงานในสูตร A ที่มี Al₂O₃ และ B 0.25% เผานาน 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง พบว่า ขนาดเกรนจะมีค่าเฉลี่ย 2.30 และ 61.07 ไมครอน ตามลำดับ การโตของเกรนเมื่อเผา 3 ชั่วโมง เกิดจากการปนเปื้อนของสาร Ti ทำให้เกรนมีรูปร่างโตกว่าปกติ สำหรับรูปร่างของเกรนจะมีรูปเป็นอิคิวแอ็กซ์เมื่อเผานาน 1 ชั่วโมง และมีลักษณะเป็นแผ่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาเป็น 3 ชั่วโมง จะพบเกรนในลักษณะเป็นแผ่นเพิ่มขึ้น

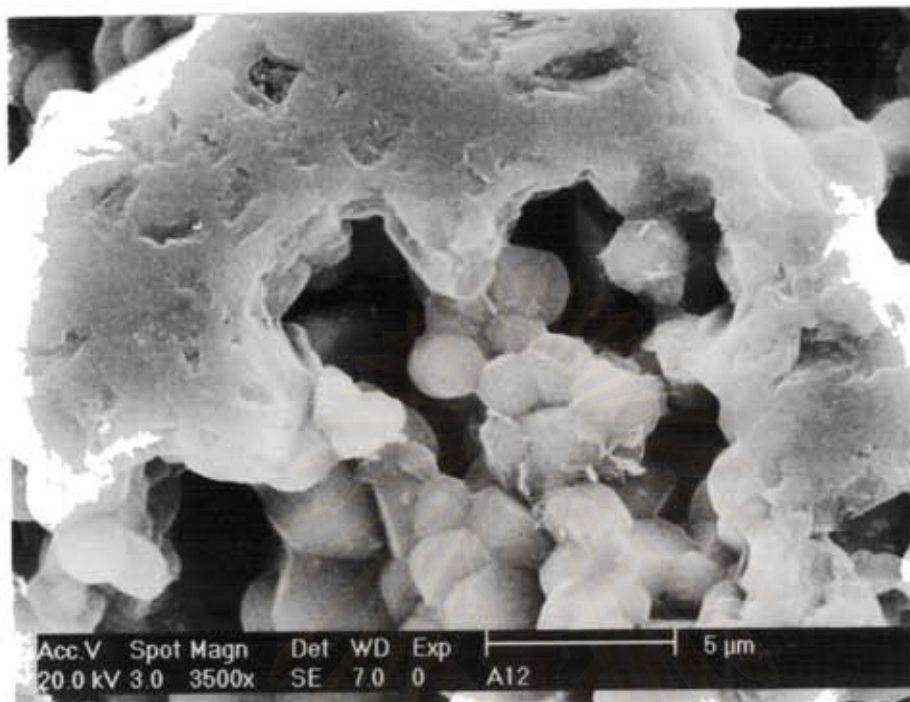
จากการวิเคราะห์ชิ้นงานของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% จะเห็นได้ว่าเมื่อเผา 1 ชั่วโมง เกรนจะโตกว่าสูตร A ขนาดเกรนจะมีค่าเฉลี่ย 3.12 ไมครอน และ 2.85 ไมครอน เมื่อเผา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับรูปร่างของเกรนเมื่อเผา 1 ชั่วโมง จะเป็นอิควิแอกซ์เป็นส่วนใหญ่ และเริ่มมีเกรนรูปแท่งปะปนกัน และหลังจากเพิ่มการเผาเป็น 3 ชั่วโมง จะพบเกรนลักษณะแผ่นปะปนอยู่รอบนอกเหนือจากเกรนรูปอิควิแอกซ์และแท่ง

จากการวิเคราะห์ชิ้นงานของสูตร C ที่มี Al_2O_3 1.5% และ B 0.75% พบว่าขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ย 5.62 ไมครอน เมื่อเผานาน 1 ชั่วโมง และมีขนาดเฉลี่ย 3.37 ไมครอน หลังเผานาน 3 ชั่วโมง เกรนขนาดเล็กจะมีรูปร่างเป็นอิควิแอกซ์ ส่วนเกรนขนาดใหญ่เป็นแผ่นและแท่ง

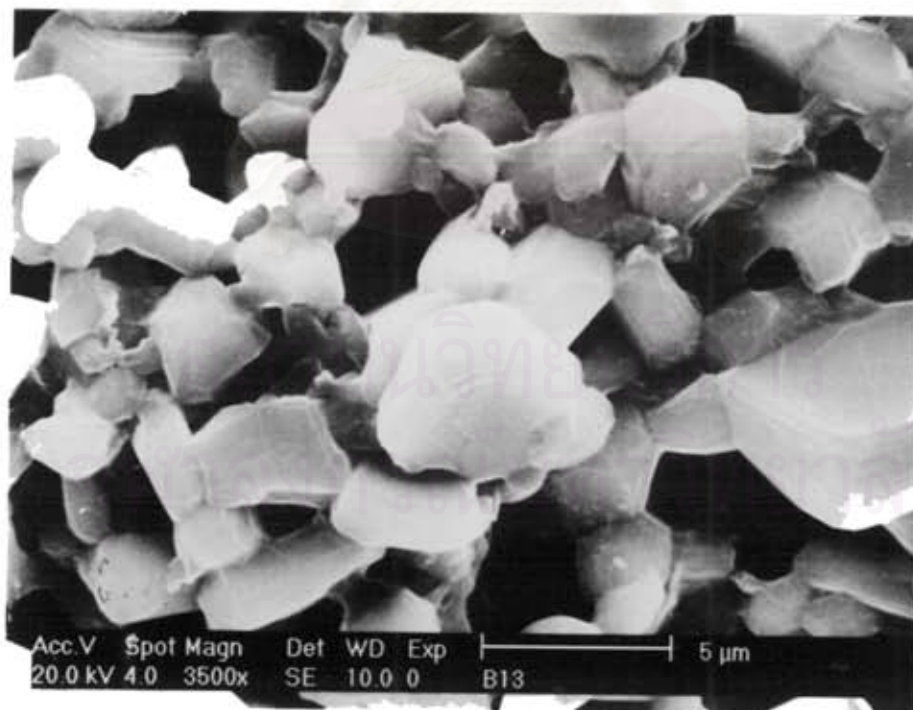
จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่า ขนาดเฉลี่ยของเกรนจะผันแปรตามความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มของโบรอน เนื่องจากโบรอนจะช่วยให้เกิดการโตของเกรนในการซินเทอร์ SiC ส่วนรูปร่างของเกรนจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของการเผา ซึ่งเมื่อเผานานขึ้นจะพบการเกรนรูปร่างแผ่นและแท่งยาวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

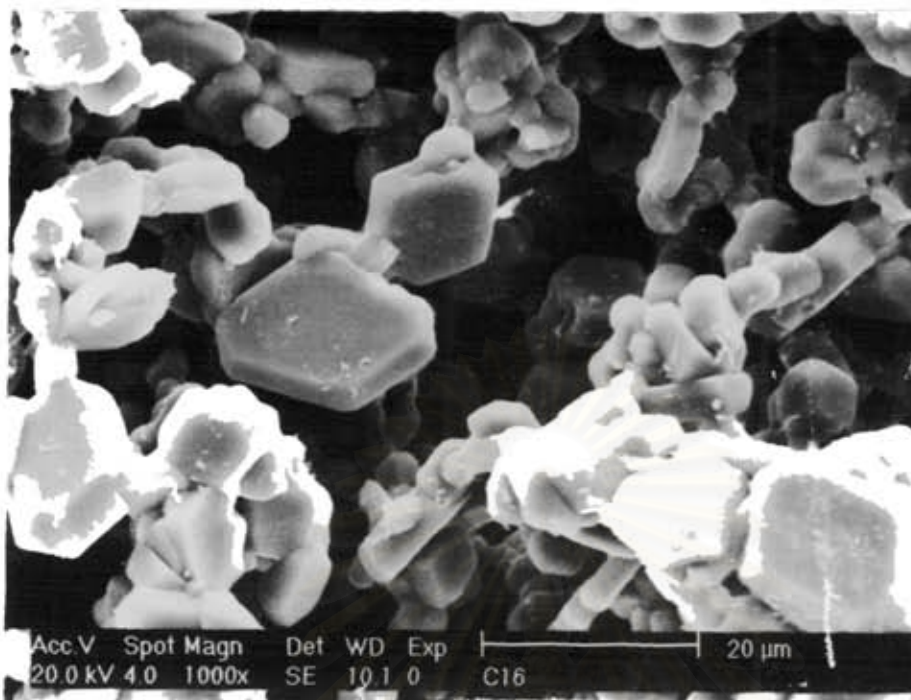
อุณหภูมิ 2200° C เผานาน 1 ชั่วโมง			อุณหภูมิ 2200° C เผานาน 3 ชั่วโมง		
ลักษณะของรูพรุน	รูปร่าง/ลักษณะของเกรน	ขนาดเฉลี่ยของเกรน	ลักษณะของรูพรุน	รูปร่าง/ลักษณะของเกรน	ขนาดเฉลี่ยของเกรน
รูพรุนเปิด รูปร่างไม่แน่นอน	อิควิแอกซ์	2.30	รูพรุนเปิด	แผ่น	61.07
รูพรุนเปิด รูปร่างไม่แน่นอน	อิควิแอกซ์และ แท่งยาว	3.12	รูพรุนเปิด	อิควิแอกซ์ รูปแท่งยาว และ แผ่นหกเหลี่ยม	2.87
รูพรุนเปิด รูปร่างไม่แน่นอน	อิควิแอกซ์และ แท่งยาวและรูป แผ่นหกเหลี่ยม	5.62	รูพรุนเปิด	อิควิแอกซ์ แท่งยาวและ แผ่นหกเหลี่ยม	3.37



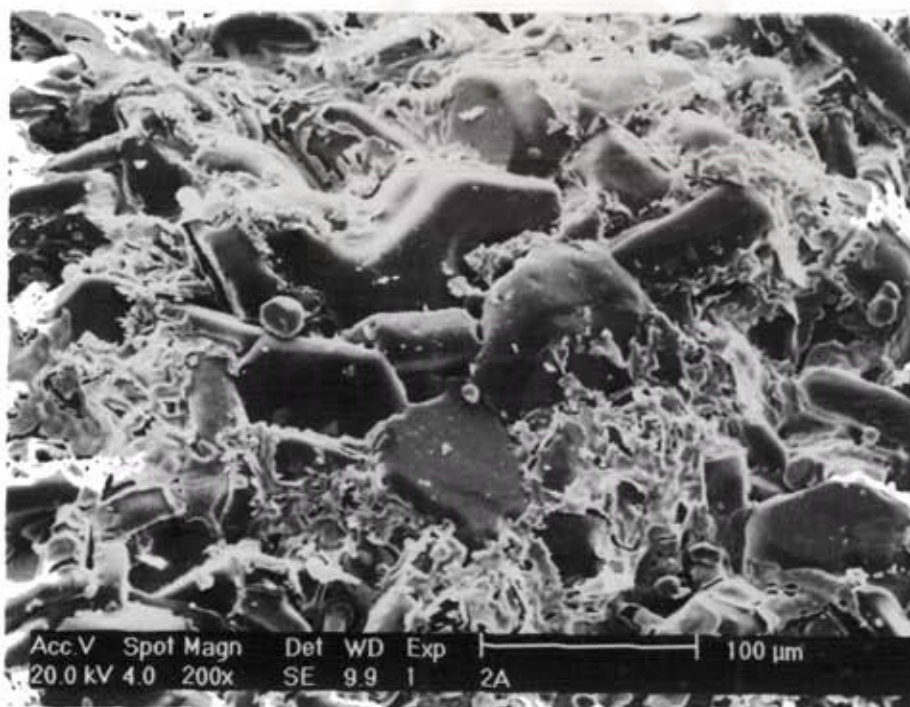
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25%
เผานาน 1 ชั่วโมง



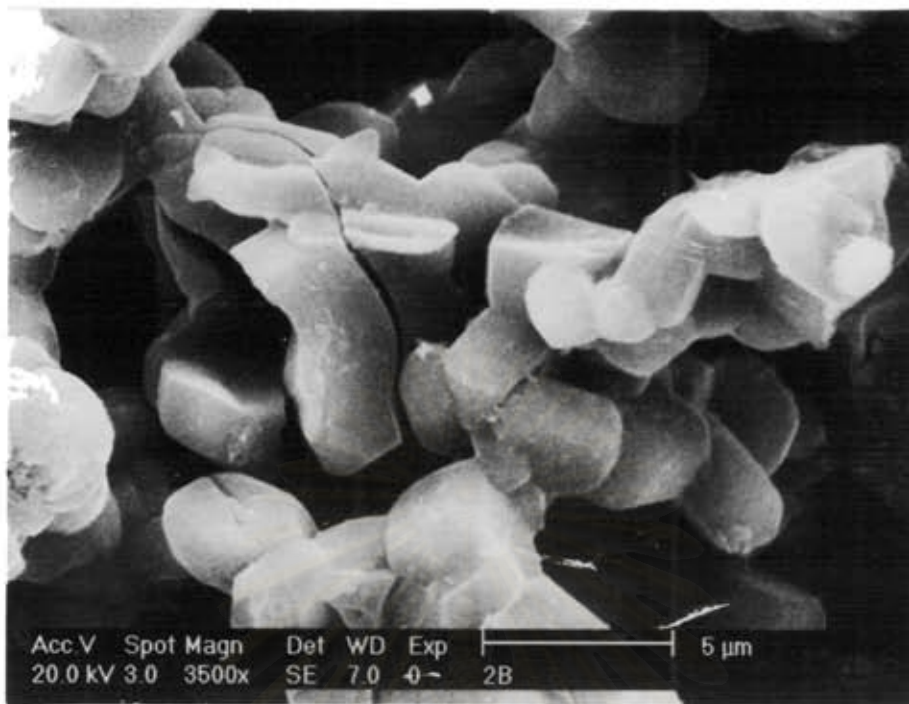
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75%
เผานาน 1 ชั่วโมง



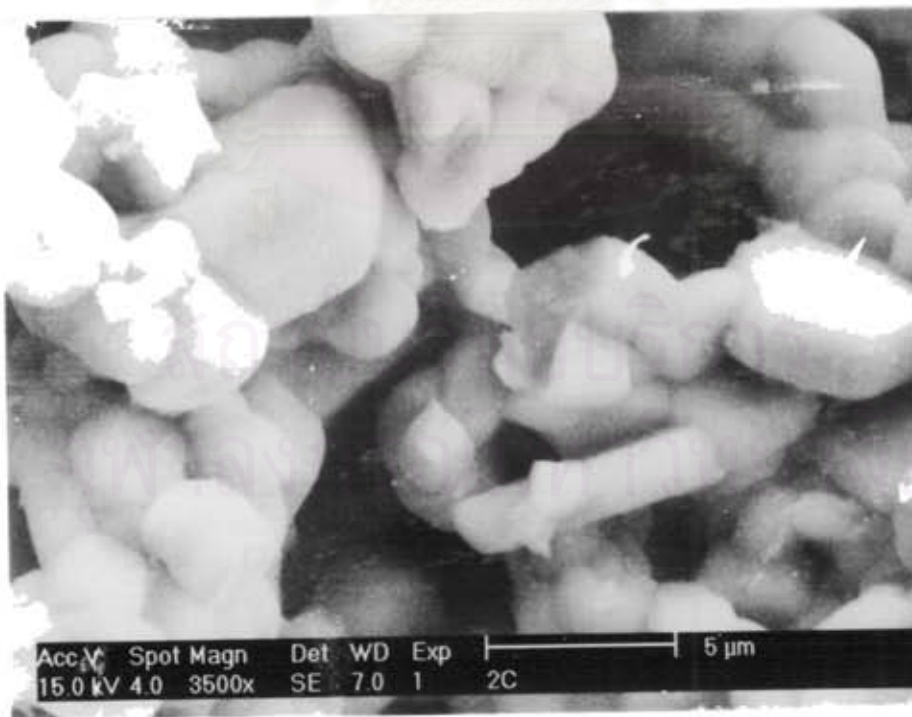
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5%
 เผา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25%
 เผา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75%
เผานาน 3 ชั่วโมง



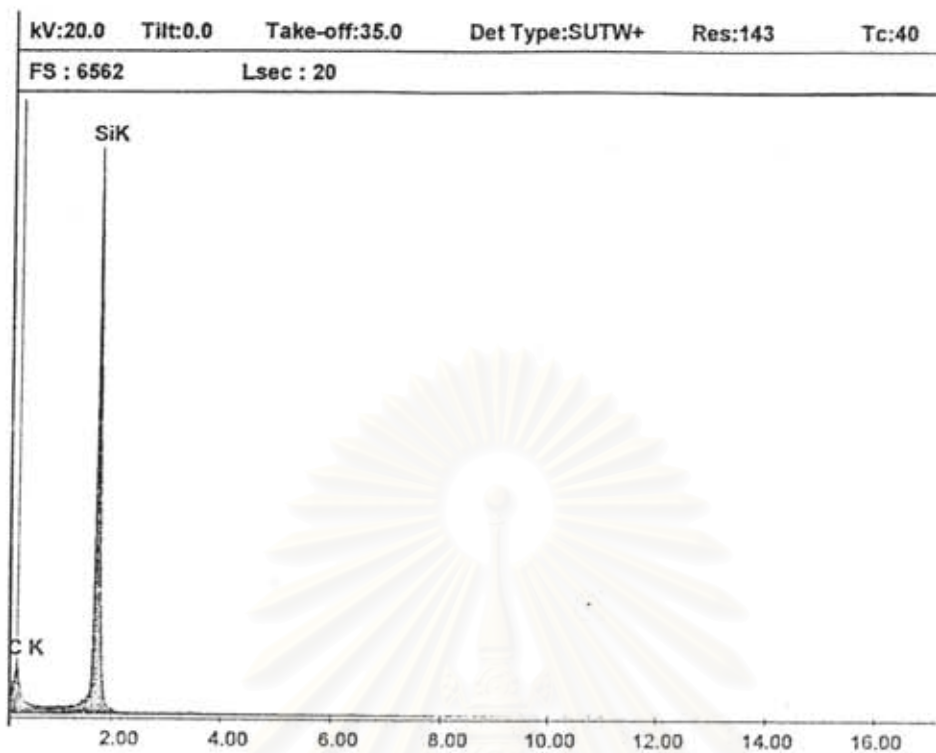
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายแสดงโครงสร้างจุลภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5%
เผานาน 3 ชั่วโมง

ง. องค์ประกอบทางเคมีและวิภาค

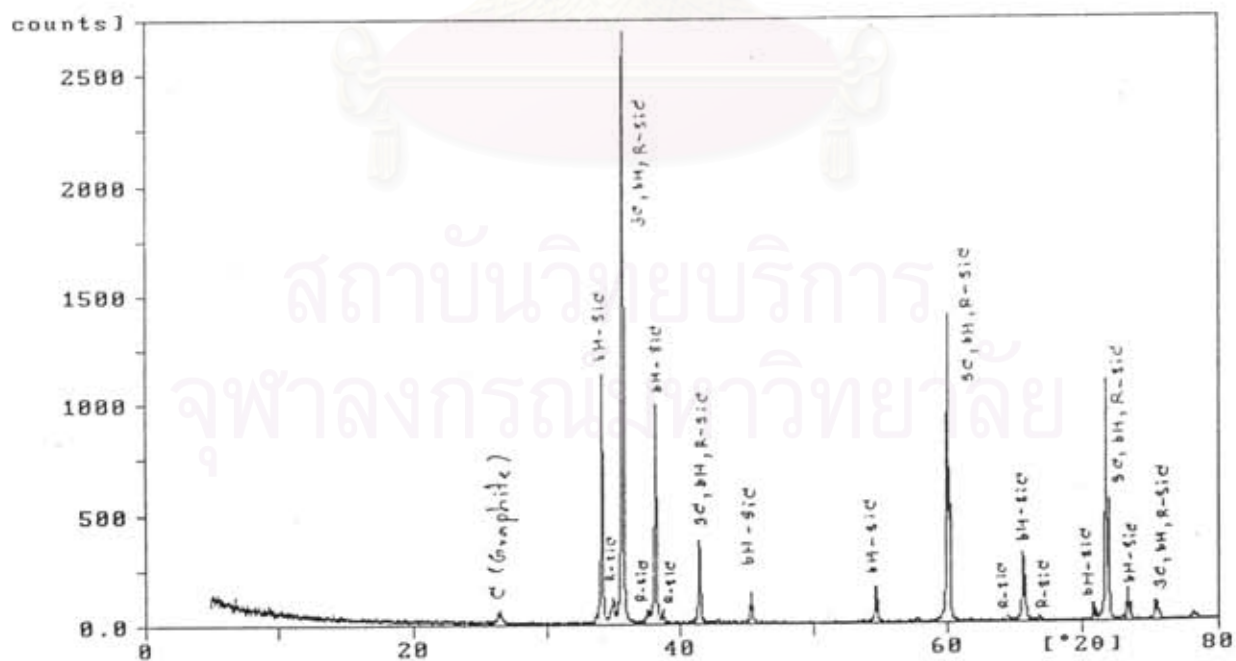
ในตารางที่ 4.10 เป็นการวิเคราะห์ของค์ประกอบทางเคมีและวิภาคของชิ้นงานที่ความเข้มข้นต่างๆ ของอลูมินาออกไซด์และโบรอน เมื่อเผา 1 และ 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหลังเผาพบว่า ธาตุ Si และ C จะเป็นธาตุที่พบในทุกสูตรความเข้มข้น โดยวิภาคที่พบเมื่อเผา 1 ชั่วโมงจะประกอบด้วย α -SiC และ β -SiC และ Graphite และเมื่อเผานาน 3 ชั่วโมง จะพบเฉพาะ α -SiC และ β -SiC สำหรับ α -SiC จะพบทั้งในรูปผลึกของ Hexagonal และ Rhombohedral ในทุกชิ้นงาน

ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประกอบทางเคมีและวิภาคเมื่อเผาที่ เวลาต่างๆ กัน

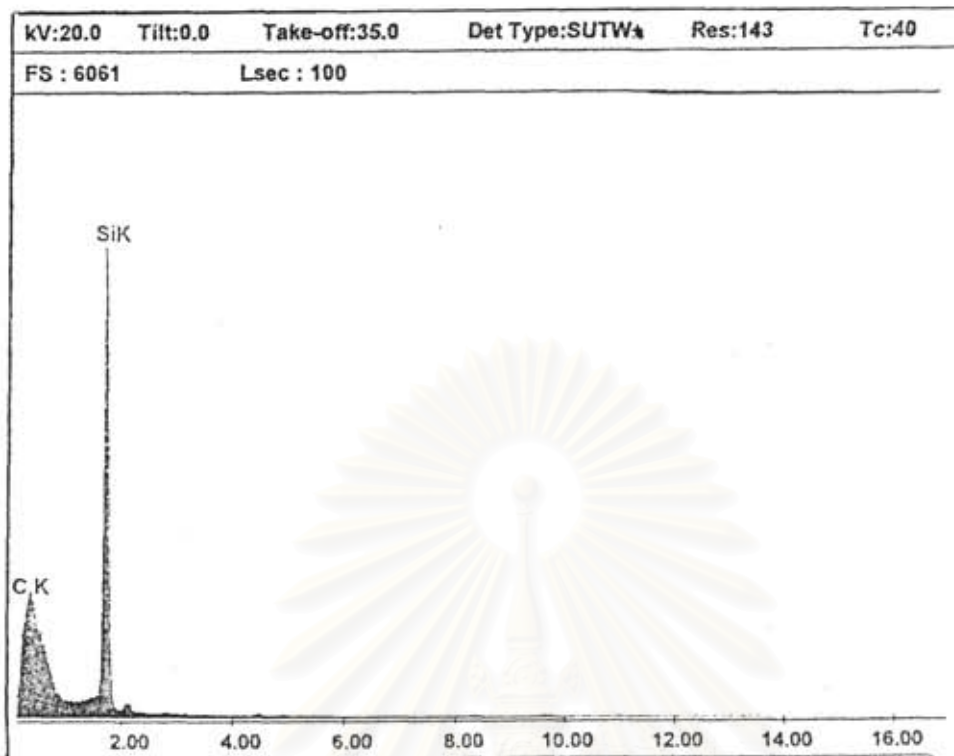
ส่วนผสม	อุณหภูมิเผา 2200°C นาน 1 ชม.		อุณหภูมิเผา 2200°C นาน 1 ชม.	
	องค์ประกอบทางเคมี	วิภาค	องค์ประกอบทางเคมี	วิภาค
A	Si และ C	α -SiC, β -SiC และ Graphite	Si และ C	α -SiC, β -SiC
B	Si และ C	α -SiC, β -SiC และ Graphite	Si และ C	α -SiC, β -SiC
C	Si และ C	α -SiC, β -SiC และ Graphite	Si และ C	α -SiC, β -SiC



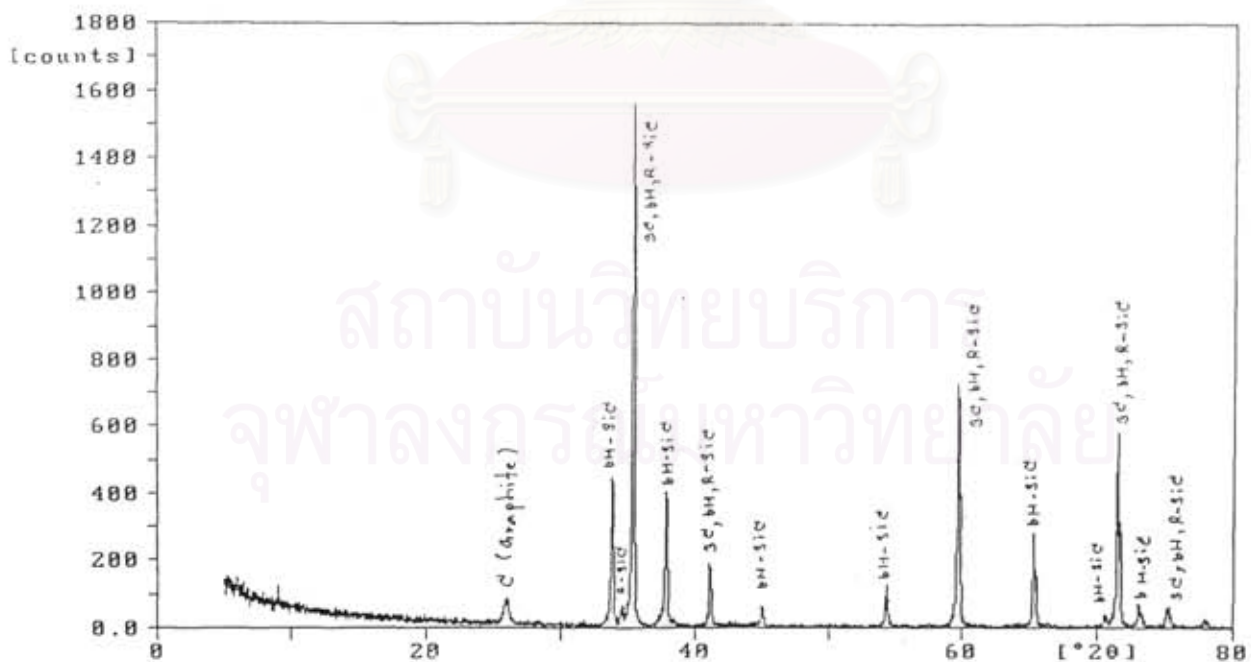
รูปที่ 4.33 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง



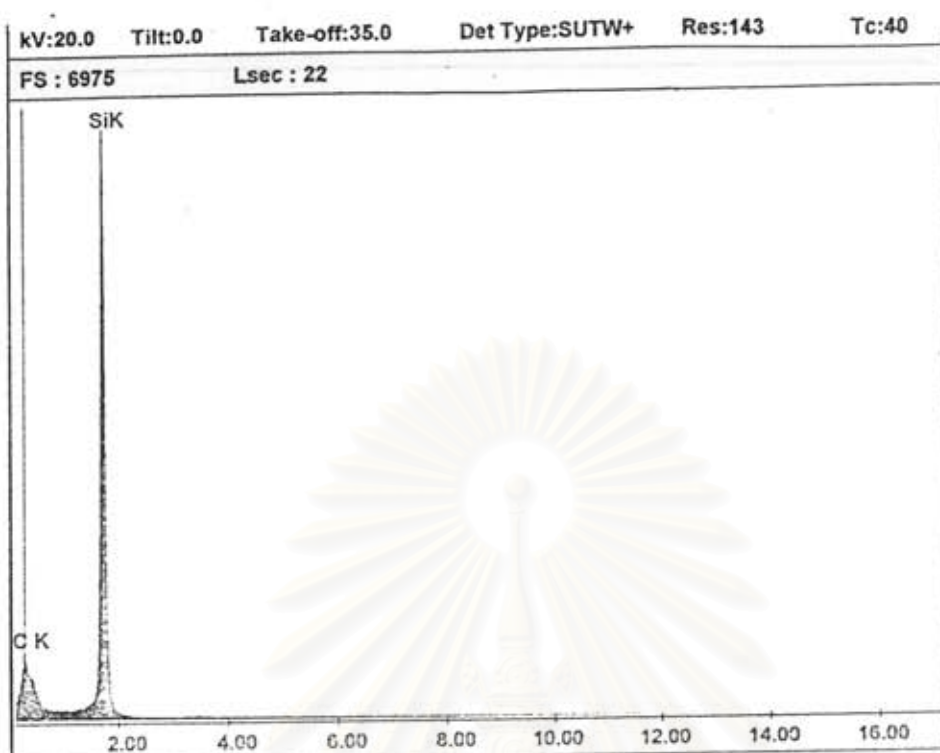
รูปที่ 4.34 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง



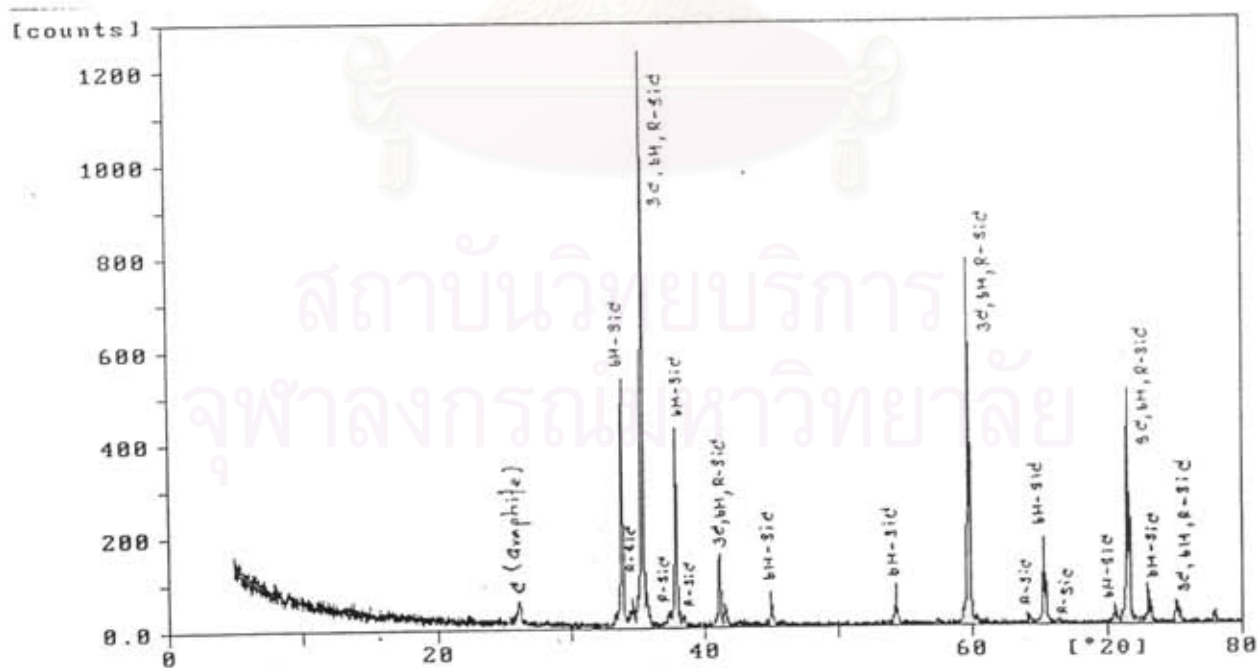
รูปที่ 4.35 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.5% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง



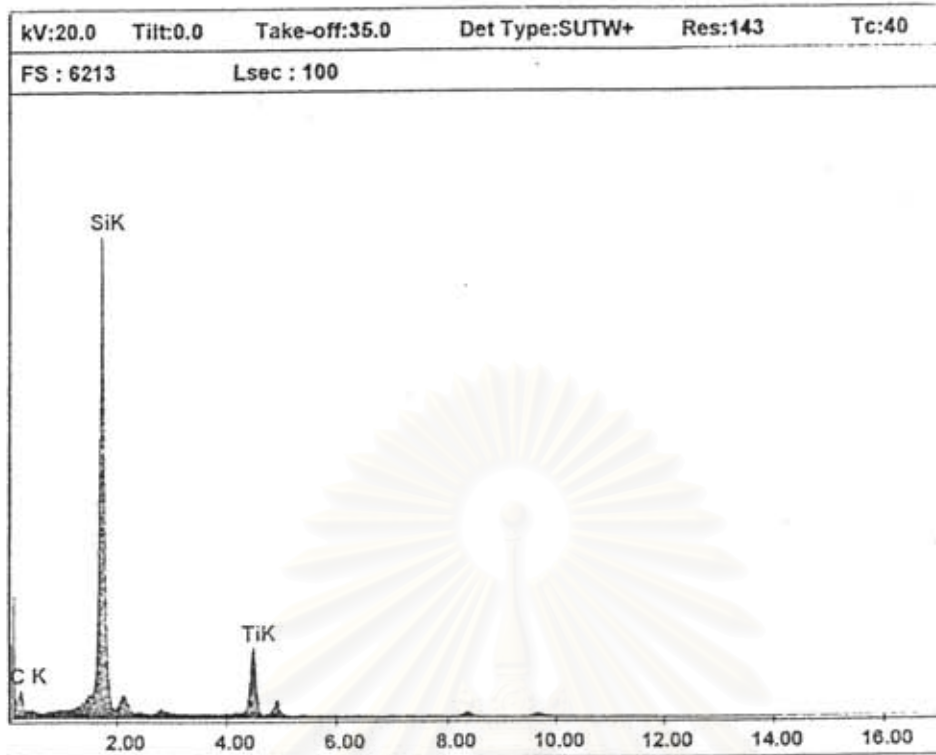
รูปที่ 4.36 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.37 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง

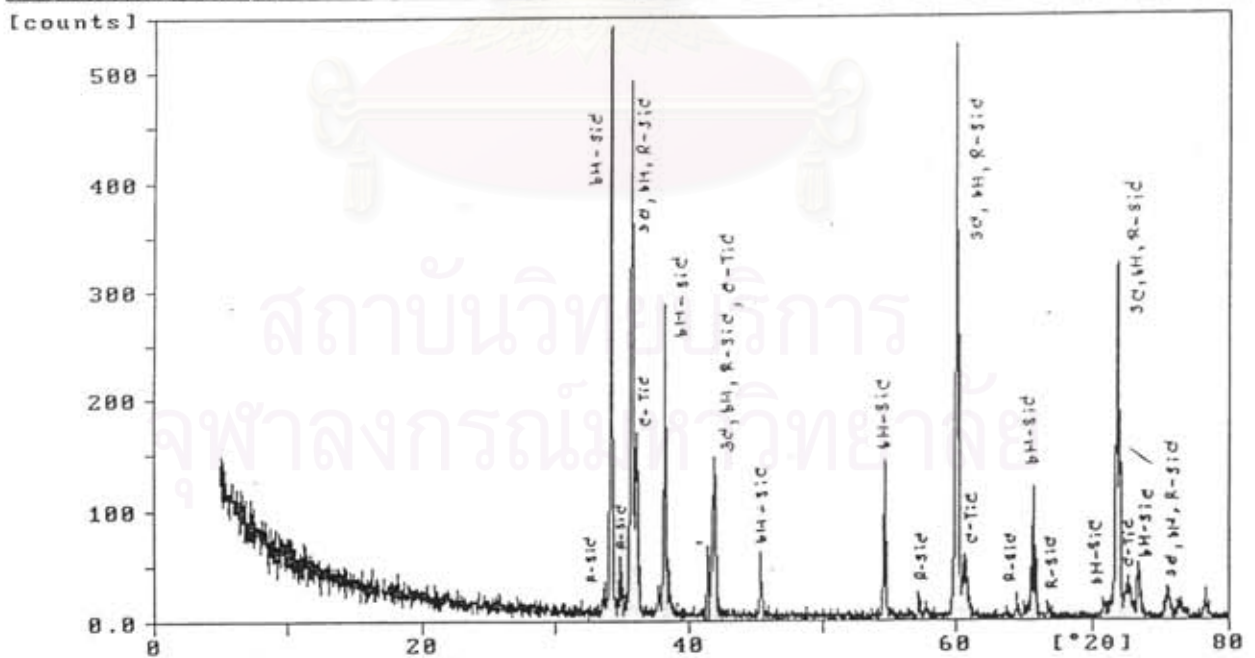


รูปที่ 4.38 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง

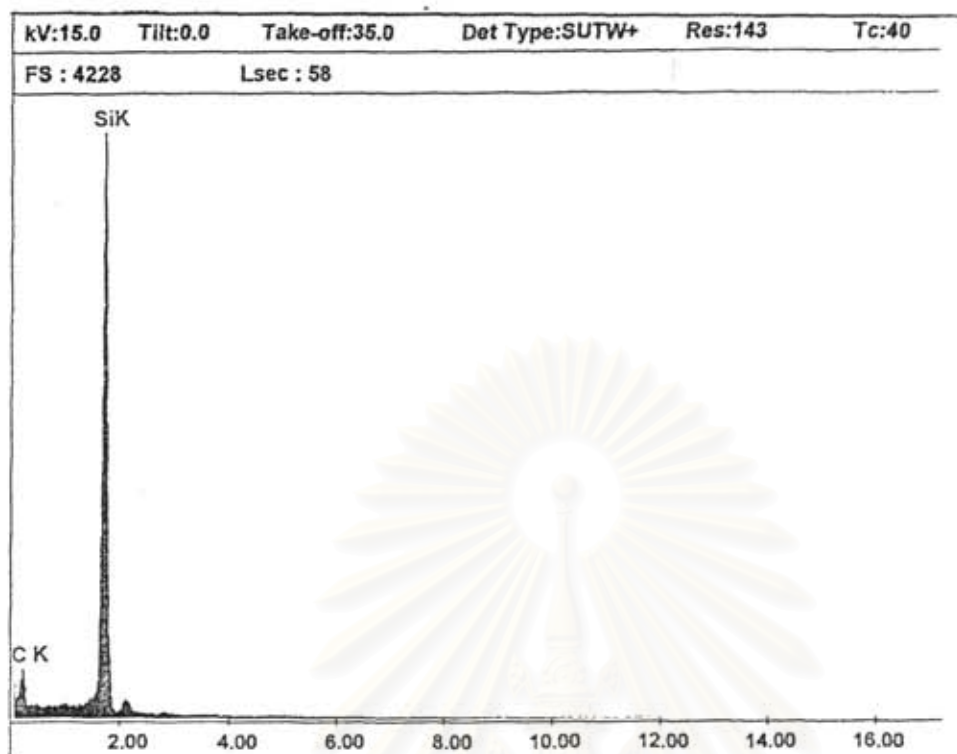


รูปที่ 4.39 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง

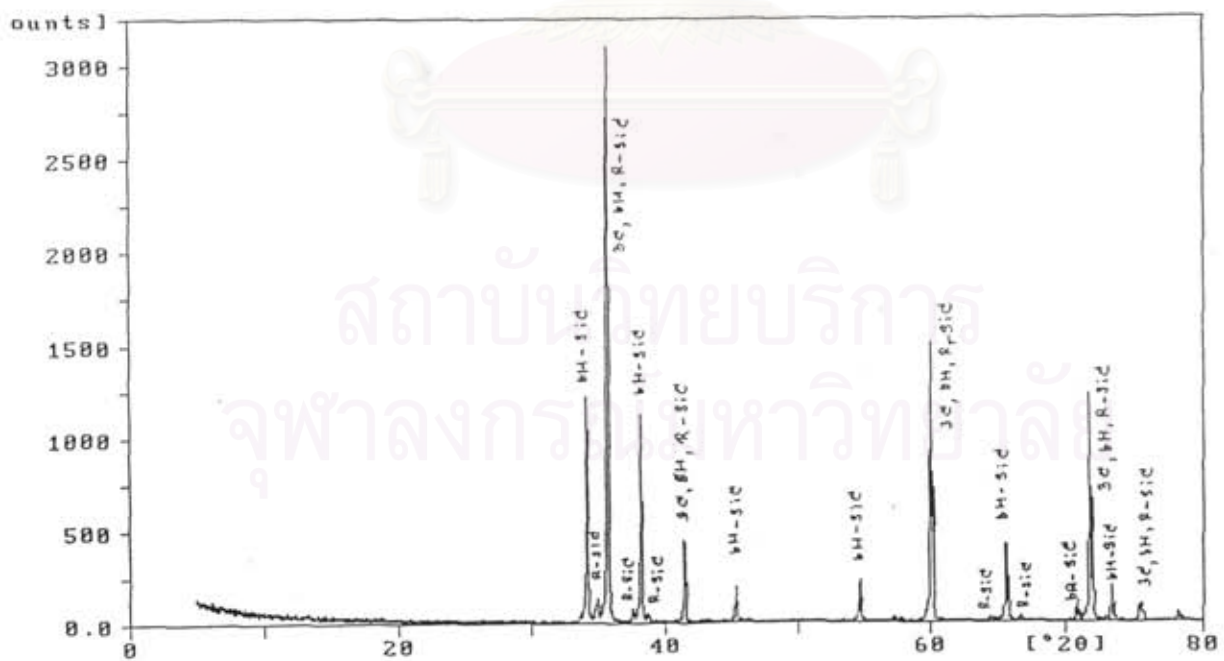
[Sample identification:



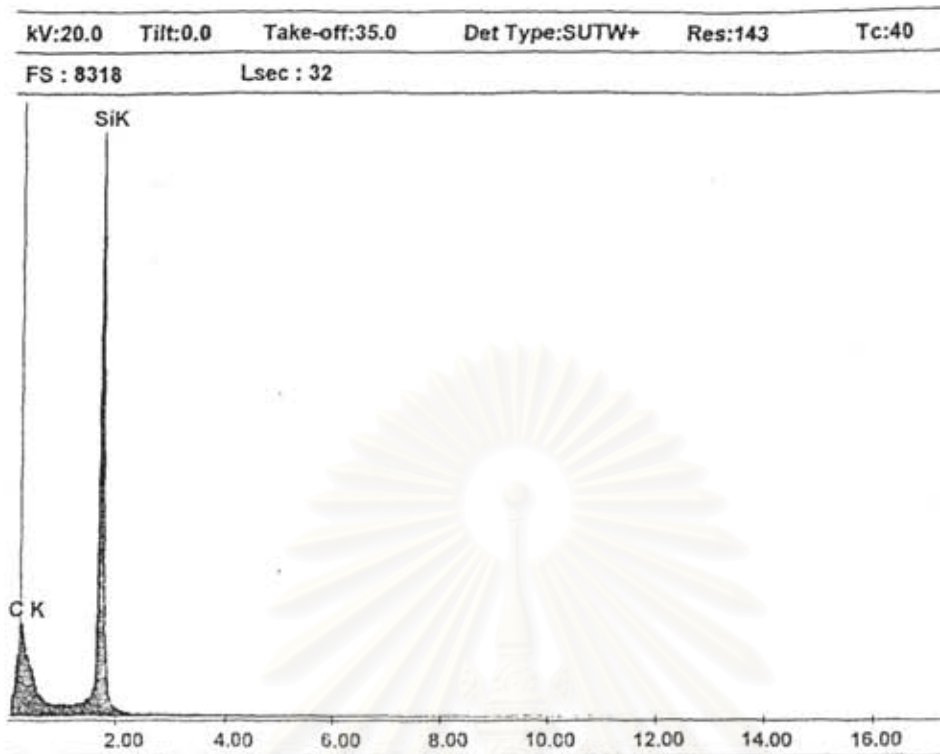
รูปที่ 4.40 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร A ซึ่งมี Al_2O_3 0.25% และ B 0.25% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง



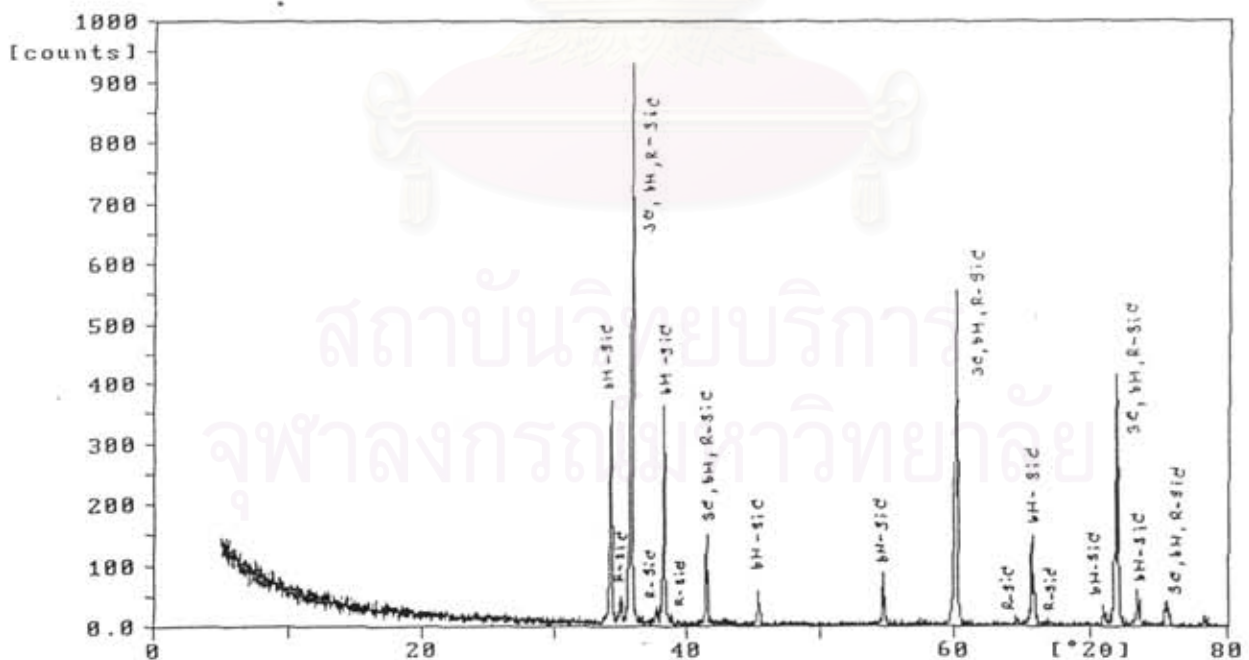
รูปที่ 4.41 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.42 Pattern ของ XRD แสดงวิภาคของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 0.75% และ B 0.75% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.43 Spectrum ของ EDX แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสูตร C ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.44 Pattern ของ XRD แสดงวัฏภาคของสูตร B ซึ่งมี Al_2O_3 1.5% และ B 1.5% เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 3 ชั่วโมง

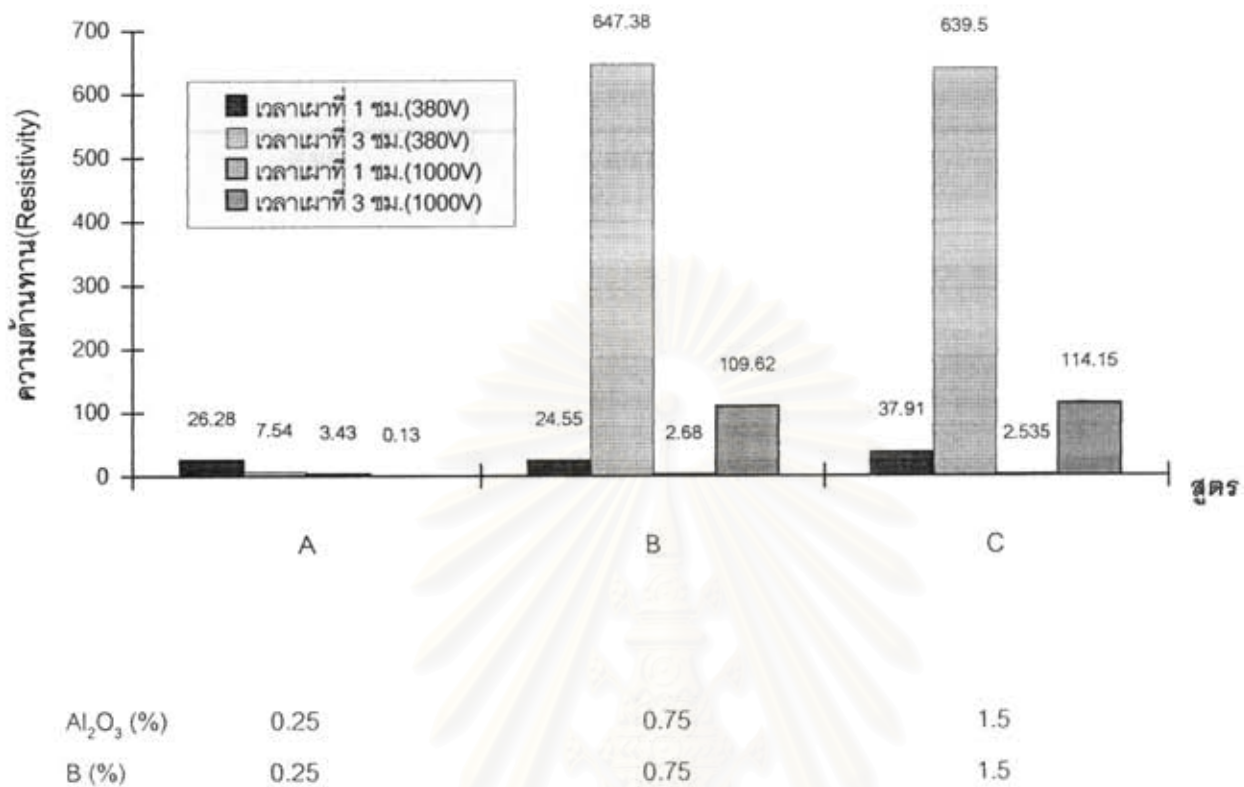
จ. สมบัติทางไฟฟ้า

ผลการวัดค่าความต้านทานเฉพาะแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.45 พบว่า ค่าความต้านทานจะผันแปรตามเวลาการเผาแต่ไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ โดยเมื่อเผานาน 1 ชั่วโมง ค่าความต้านทานที่ 380 V จะอยู่ระหว่าง 24-37 Ω .cm และลดค่าเป็น 2-3 Ω .cm ที่แรงเคลื่อน 1000 V และเมื่อเผานาน 3 ชั่วโมง ค่าความต้านทานจะเพิ่มเป็น 639-647 Ω .cm ที่แรงเคลื่อน 380 และ 109-144 Ω .cm ที่ 1000 V ยกเว้นที่ความเข้มข้นของสูตร A ที่มีความต้านทาน 7.54 Ω .cm ซึ่งเป็นผลมาจากสารปนเปื้อน และ 0.13 Ω .cm เมื่อแรงเคลื่อนเป็น 380 V และ 1000 V หลังการเผานาน 3 ชั่วโมง

สำหรับค่าความต้านทานพบว่าจะสอดคล้องกับค่าของวัสดุ ซึ่งโดยชิ้นงานที่มี Graphite จะมีค่าความต้านทานต่ำ เนื่องจาก Graphite เป็นสารนำไฟฟ้า ซึ่งวัสดุของ Graphite สามารถตรวจพบในลวดไฟฟ้าในเชิงการค้าเหมือนกัน

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง

สูตร	เวลาเผาที่ 2200°C	ค่าความต้านทาน (Ω .cm)	
		380 V	1000 V
A	1	26.28	3.43
	3	7.54	0.13
B	1	24.55	2.68
	3	647.38	109.62
C	1	37.910	2.535
	3	639.5	144.15



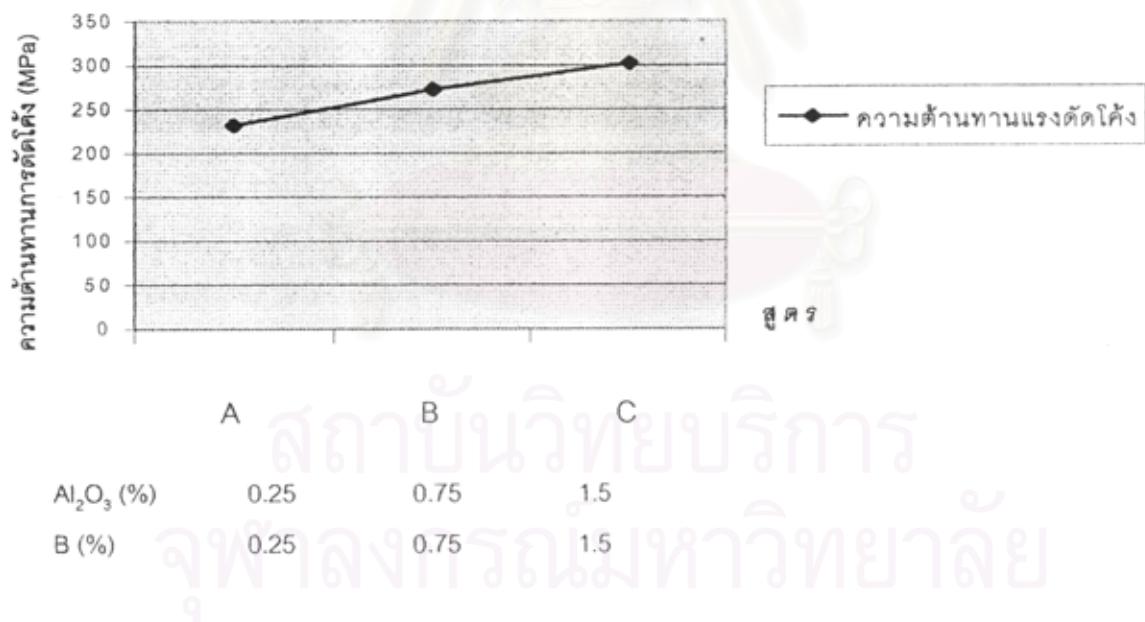
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) กับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ

จ. ความต้านทานแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดโค้งกับสูตรความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน ในชิ้นงานที่เผาานาน 1 ชั่วโมง พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ปริมาณสารปรับปรุงสมบัติเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่เกรนเริ่มมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปร่างยาวและแผ่นมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Al₂O₃ และโบรอน ทำให้เพิ่มค่าความคงทนต่อการดัดโค้ง

ตารางที่ 4.12 สมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งกับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ

สูตร	ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Mpa)
A	232.56
B	273.29
C	303.24



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ความต้านทานแรงดัดโค้งกับสูตรความเข้มข้นของสารปรับปรุงสมบัติ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

1. การผลิตซิลิกอนคาร์ไบด์ในเชิงการค้า มีด้วยกัน 3 วิธี คือ
 - การ form SiC ในที่เดิมจากคาร์บอนและซิลิกอนคาร์ไบด์
 - การใช้ Reaction-bonding ของ SiC
 - การซินเทอร์โดยไม่ใช้ความดัน
2. ผลการศึกษาลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวงและท่อเกลียวที่ใช้ในเชิงการค้าพบว่า ลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียวจะมีธาตุ Si และ C และประกอบวัฏภาคของ α -SiC และ β -SiC เป็นหลัก โดยมี Graphite และ Silicon เป็นวัฏภาครองลงมา ส่วนความหนาแน่นมีค่า 2.87 กรัม/ซม.³ และขนาดเกรนเฉลี่ย 1.25 ไมครอน มีความพรุน 2.87 % สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่า 0.08 Ω .cm และ 0.14 Ω .cm ที่แรงเคลื่อน 380 โวลต์ และ 1000 โวลต์ ตามลำดับ สำหรับลวดไฟฟ้า ชนิดท่อกลวงจะประกอบด้วยธาตุและวัฏภาคที่คล้ายกับลวดไฟฟ้าชนิดท่อเกลียว ยกเว้นจะไม่พบวัฏภาคของ Graphite และ Silicon สำหรับเกรนจะมีขนาดเฉลี่ย 1.42 ไมครอน และมีความพรุน 20 % ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับลวดไฟฟ้าชนิดท่อกลวง
3. จากการศึกษาส่วนผสมระหว่างซิลิกอนคาร์ไบด์กับสารปรับปรุงสมบัติคืออลูมินาออกไซด์และโบรอน ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน 3 ระดับ คือ 0.25, 0.075 และ 1.5 % เผาที่อุณหภูมิ 2200°C นาน 1 และ 3 ชั่วโมง พบว่ามีผลในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ
 - ค่าความหนาแน่น การเพิ่มความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน จะทำให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์หลังการเผา 1 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 57-65 % และมีแนวโน้มลดลงต่ำเล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาเผาเป็น 3 ชั่วโมง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 51-56% ในการศึกษาพบว่าสูญเสียน้ำหนักชิ้นงานหลังเผามีการสูญเสียน้ำหนัก 19-55% จึงมีผลต่อค่าความหนาแน่น
 - โครงสร้างจุลภาค การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอลูมินาออกไซด์และโบรอน ทำให้เกรนมีขนาดเฉลี่ยโตขึ้น และมีการเปลี่ยนรูปร่างมากขึ้น โดยเฉพาะเกรนที่เป็นแผ่นและแท่งยาว โดยการเพิ่มอุณหภูมิเผาไม่มีผลต่อขนาดเฉลี่ยของเกรนและรูปร่างของเกรน ส่วนค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจะมีค่าระหว่าง 36-47% โดยพบว่าความพรุนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการเผา α -SiC และ β -SiC เหมือนกัน สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะมีผลต่อวัฏภาค คือ จะพบเฉพาะวัฏภาคของ Graphite เมื่อเผานาน 1 ชั่วโมง

- ค่าความต้านทานไฟฟ้า การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของซิลิกอนออกไซด์และโบรอน จะให้ค่าความต้านทานมีค่าระหว่าง 24-37 $\Omega\cdot\text{cm}$ ที่แรงเคลื่อน 1000 V การเพิ่มเวลาการเผาทำให้ค่าความต้านทานมากขึ้นมีค่าระหว่าง 647-639 $\Omega\cdot\text{cm}$ ที่แรงเคลื่อน 380 V และ 109 - 144 V ที่แรงเคลื่อน
 - ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของซิลิกอนออกไซด์และโบรอน มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น
4. จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า สารผสมของสูตร B ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ 92%, อลูมินาออกไซด์ 0.75%, โบรอน 0.75%, PEG5% และ PVA 1.5% มีแนวโน้มเหมาะสมที่จะนำไปปรับปรุงเพื่อวิจัยและพัฒนาในขั้นต่อไป เนื่องจากมีค่าความต้านทานที่แรงเคลื่อน 380 V ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ สำหรับค่าความต้านทานเป็นสมบัติที่สำคัญของลวดไฟฟ้าอย่างหนึ่ง
5. ในการปรับปรุงคุณสมบัติของลวดไฟฟ้า เพื่อให้ได้เทียบเท่าหรือดีกว่าที่ใช้ในเชิงการค้ายังต้องการวิจัยเพิ่มเติม นอกเหนือจากที่ได้ดำเนินการแล้ว โดยเฉพาะเงื่อนไขในการเผาชิ้นงาน

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้มีข้อเสนอแนะครุภัณฑ์ที่ใช้โดยเฉพาะเกี่ยวกับวิจัยในขั้นต่อไป และการประยุกต์ผลวิจัย ดังนี้

1. การทำวิจัยเรื่องนี้ควรคำนึงครุภัณฑ์ที่ใช้โดยเฉพาะเตาอุณหภูมิสูงที่เผาเกิน 2200°C ซึ่งราคาแพงและหายาก ทำให้การวิจัยล่าช้าไปมากกว่าที่จะหาซื้อเตาได้
2. ในการเผาชิ้นงานควรมีการใช้สารเคลือบป้องกันปฏิกิริยา โดยการฝังกลบไว้ในผงที่ทำหน้าที่เป็น Protective Layer แต่อย่างไรก็ตามต้องเลือกใช้ชนิดและส่วนผสมของ Protective Layer ให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดผลในเชิงบวก
3. การเก็บรักษาชิ้นงานที่มีความพรุนหลังการเผา Calcite ควรเก็บไว้ในโถแก้วดูดความชื้น เพื่อป้องกันการดูดความชื้นและอากาศ
4. การศึกษาเกี่ยวกับวัฏภาคในเชิงปริมาณ จะทำให้สามารถทราบกลไกการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์จะชัดเจนขึ้น เพื่อสามารถควบคุมสมบัติชิ้นงานให้ได้ตามต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- American Ceramic Society."Ceramic Source 86", Vol.1,1986.
- Carbide Ceramics", J. Am. Ceram.Soc.70 (10) C-266-C-267(1987).
- Carborundum Compony, " Fact about Silicon Carbide", Public Relation, The Carborundum Company, New York, 1993.
- J.A. Costello and R.E.Tressler," Oxidation Kinetics of Silicon Carbide Crystals", J. Am. Ceram.Soc.69 (9)647-81 (1986).
- JIS R. 7501 ,"Silicon Carbide Heating Element".
- K. Pelissier, T. Chartier and J.M. Laurent", Silicon Carbide Heating Element",Ceram. Inter. 24 (371-377) (1998).
- K.Yamada and M. Mouri ," Method for Manufacturing High - Strength Sintered Silicon carbide Articles",US.Patent 4, 562, 040, 1997.
- M. Watanabe, A.Okano, S. Nosaki, Y. Musuo.,and I.Fukuura,"Process for Production Silicon Carbide Heating Elements",US.Patent 4, 668, 452.
- S. Ogihara, K.Maeda, Y. Takeda and K. Nakamura",Effect Silicon Carbide Heating Element of Impurity and Carrier Concentration on Resistivity and Thermal Conductivity of SiC Ceramics Containing BeO", J. Am. Ceram.Soc.68 (1) C-16-C-18 (1985).
- Y. Taeka ,K. Nakamura, K.Maeda", Effect of Additive on Electrical Resistivity of Silicon
- Y. Takeda," Development of High Thermal - Conductive SiC Ceramics", J. Am.Soc.Bull., 67(12)1961-1963 (1988).

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ความหนาแน่น (Density) และความพรุน (Porosity) สำหรับวัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials)

วัสดุ (จำนวนตาม IEC)	ความหนาแน่น (kg/m^3)		ความพรุน (%) Total
	ตามทฤษฎี (Theoretical)	ทางปฏิบัติ (Practical range)	
Silicon Carbide (Clay Bonded)	2.80-3.10	2.5-3.0	2-28
Silicon Carbide (Nitride Bonded)	3.21	2.2-2.7	15-30
Silicon Carbide (Sintered)	3.208	3.0-3.2	1-6
Silicon Carbide (Coarse, Sintered)	3.208	2.2-2.7	21-40
Silicon Carbide (Hot Pressed)	3.210	3.0-3.2	0-5
Silicon Carbide (Reaction Bonded)	3.0-3.15	3.0-3.15	<1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

