

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของตัวกรองเซรามิก
เพื่อจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอนุภาคนิวเคลียสสูง (ระยะที่ 2)

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล และคณะ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน

ประจำปีงบประมาณ 2547

ประจำปีงบประมาณ 2547

ชื่อโครงการย่อย	การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกเพื่อจับเก็บฝุ่นจาก แก๊สที่มีอุณหภูมิสูง (ระยะที่ 2) Preparation and Characterization of Ceramic Filter for Hot Gas Cleaning (Phase 2)
คณะวิจัย	
หัวหน้าโครงการ ตำแหน่ง	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองหัวหน้าโครงการ ตำแหน่ง	รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ร่วมวิจัย ตำแหน่ง เทคโนโลยี	รองศาสตราจารย์ ดร. คุณหญิง อุดภาพ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยวิจัย ตำแหน่ง	นายภาสกร ทองน้อม นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เลขหมู่

เลขทะเบียน 013593

วัน, เดือน, ปี 16พ.ค.51

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวกรองเซรามิก โดยจุ่มฟองน้ำในน้ำคั้น PBA ในแม่พิมพ์โลหะ (ขนาด 20 ซม. × 20 ซม. × 2.0 ซม.) ทิ้งไว้ให้แห้งในบริเวณอากาศนิ่งเพื่อให้น้ำระเหยออกไปอย่างช้า ๆ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C, 900 °C และ 1,250 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตัวกรองเซรามิกที่เผาแล้วจะถูกส่งไปตรวจวิเคราะห์การแจกแจงขนาดของรูพรุน ความพรุน และความแข็งแรงเชิงกล พบว่าตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.35 μm มีความพรุน 62.92% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.20 ± 0.05 MPa ตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 900 °C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.96 μm มีความพรุน 73.72% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.38 ± 0.08 MPa ส่วนตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 27.06 μm มีความพรุน 23.46% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 ± 0.32 MPa ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1,250 °C มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่า อีกทั้งมีความพรุนและขนาดรูพรุนที่เหมาะสม สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น กระทำที่สภาวะการกรองแบบเป็นงวด โดยใช้ความเร็วในการกรองเท่ากับ 3, 5 และ 7 cm/s อัตราการป้อนฝุ่นเท่ากับ 7.5 g/min และความดันลดก่อนไล่เค้กฝุ่นเท่ากับ 500, 700 และ 900 Pa พบว่าประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 98-99%

คำสำคัญ: การกรอง / การทำความสะอาดแก๊ส / ตัวกรองเซรามิก / เถ้าลอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

Ceramic filters were prepared by soaking the sponge with PBA soil/water slurry in steel mold (20 cm × 20 cm × 2.0 cm). The soaked samples were dried at ambient air and then sintered at 700°C, 900°C and 1250°C for 1 hour. The sintered samples were characterized to determine pore size distribution, porosity and mechanical strength. It was found that the sample, which was sintered at 700°C, had an average pore size of 0.35 μm, a porosity of 62.92% and a compressive strength of 0.20 ± 0.05 MPa. The sample sintered at 900°C, had an average pore size of 0.96 μm, a porosity of 73.72% and a compressive strength of 0.38 ± 0.08 MPa. When the sample was sintered at 1250°C, the average pore size, porosity and compressive strength were 27.06 μm, 23.46% and 3.05 ± 0.32 MPa, respectively. These results indicated that the sample sintered at 1250°C was most suitable because it had an optimal porosity and pore size together with higher compressive strength. To investigate the filtration efficiency, the batch operation at filtration velocity of 3, 5 and 7 cm/s, dust feed rate of 7.5 g/min and final pressure drop of 500, 700 and 900 Pa. It was found that filtration efficiency had nearly same value of 98-99%.

Keywords: Ceramic Filter / Filtration / Fly Ash / Gas Cleaning

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ ได้รับเงินอุดหนุนส่วนหนึ่งจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2547 ผู้วิจัยขอขอบคณา ณ โอกาสนี้ด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมตัวกรองเซรามิก	2
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการจับเก็บฝุ่น	6
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย	8
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2. ทฤษฎีบท	9
2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของการกรอง	9
2.2 วัสดุดิบเซรามิก	11
2.2.1 วัสดุดิบพวกที่มีความเหนียว	11
2.2.2 วัสดุดิบพวกที่ไม่มีความเหนียว	12
2.3 โครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิก	13
2.4 วัสดุสำหรับผลิตเป็นเยื่อแผ่นเซรามิก	14
2.5 รูปแบบของเยื่อแผ่น	14
2.6 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิก	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.6.1	การคัดเลือกขนาดอนุภาค	15
2.6.2	การเลือกสารเติมแต่ง	19
2.6.3	การขึ้นรูป	25
2.6.4	การทำแห้งและกำจัดสารเติมแต่ง	27
2.6.5	การอบเชื่อม	28
2.7	การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อแผ่นเซรามิก	29
2.7.1	การทดสอบหาขนาดรูพรุน	29
2.7.2	การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน	32
2.7.3	การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	33
2.7.4	การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล	33
3.	การดำเนินการวิจัย	35
3.1	การผลิตแผ่นกรองเซรามิก	35
3.1.1	ผลิตแผ่นกรองที่มีความหนา 1.5 cm	35
3.1.2	การผลิตแผ่นกรองที่อัตราส่วนผสมดิน PBA : น้ำ ต่าง ๆ กัน	36
3.1.3	การทำให้แห้งและการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิต่างกัน	40
3.2	การทดสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิก	41
3.2.1	ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน	41
3.2.2	การวิเคราะห์ความหนาและ โครงสร้างจุลภาค	41
3.2.3	การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิก	41
3.3	การปรับปรุงชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก	41
3.4	การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น	43
3.5	การสอบเทียบชุดทดลองและชุดป้อนฝุ่น	45
3.5.1	มาตรวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิช	45
3.5.2	ชุดป้อนฝุ่น	46
3.6	การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิก	47
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
4.1	คุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิก	50
4.1.1	การกระจายตัวของขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล	50
4.1.2	การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	55
4.1.3	การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิก	61
4.2	คุณสมบัติของแผ่นกรองในการดักเก็บฝุ่น	62
4.2.1	ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น	62
4.2.2	การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด	65
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	69
5.1	สรุปผลการทดลอง	69
5.1.1	คุณสมบัติทางกายภาพ	69
5.1.2	คุณสมบัติแผ่นกรองในการกรองฝุ่น	70
5.2	ข้อเสนอแนะ	70
5.2.1	การ Coating แผ่นกรองเซรามิก	71
5.2.2	การขึ้นรูปตัวกรองเซรามิกเป็นแท่ง	71
เอกสารอ้างอิง		72

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM	16
2.2	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Sedimentation	18
2.3	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Laser Diffraction	18
2.4	กลไกการทำงานของสารเติมแต่ง	20
2.5	ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร	22
2.6	สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแต่ละชนิด	24
3.1	องค์ประกอบของฝุ่นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง	43
4.1	คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น	50
4.2	คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1	51
4.3	ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตได้	54
4.4	ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตได้ในระยะที่ 1	55
4.5	ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก	62
4.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองของตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นกับตัวกรองเซรามิกลักษณะอื่น	64
4.7	ประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะที่ 1 กับแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นงวด	65
4.8	ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ณ ปัจจุบัน	67
4.9	ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1	67

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ตัวอย่างภาพของ (ก) Depth Filtration และ (ข) Surface Filtration	10
2.2 โครงสร้างรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิก	13
2.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเซรามิก	14
2.4 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Laser Diffraction	19
2.5 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Electrical Sensing	19
2.6 การเชื่อมประสานอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสาน	21
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นของตัวประสาน	21
2.8 การเกิดประจุที่ผิวของอะลูมินาที่อิมดัวด้วยน้ำ	24
2.9 กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ	25
2.10 การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบเชื่อม	29
2.11 หลักการของ Capillary Action	30
2.12 ลักษณะของ Penetrometer	31
2.13 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	33
2.14 การทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก	33
2.15 แรงที่กระทำบนตัวอย่าง ขณะทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก	34
3.1 ลักษณะรูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำเมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1000°C	36
3.2 แบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิก	36
3.3 แผ่นกรองเซรามิกที่อัตราส่วนผสม 40 : 60 เเผาที่อุณหภูมิ 950°C	38
3.4 แผ่นกรองเซรามิกที่อัตราส่วนผสม 40 : 60 เเผาที่อุณหภูมิ 1250°C	39
3.5 แบบชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกของ P. Gäng ประเทศเยอรมัน	42
3.6 ชุดทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว	42
3.7 อุปกรณ์จับยึดหน้าแปลน Backup Filter	42
3.8 การแจกแจงขนาดอนุภาคฝุ่น	44
3.9 ภาพถ่ายอนุภาคฝุ่นเด้งลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	44
3.10 การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น	45
3.11 ชุดป้อนฝุ่นที่จัดสร้างขึ้นใหม่	45
3.12 การสอบเทียบมาตรฐานการไหลแบบออร์ทิซ	46

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรากที่สองของเสถียรภาพความดันแตกต่างกันใน มาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ	46
3.14 ความเข้มข้นฝุ่นที่ได้จากเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่	47
3.15 ชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก	47
3.16 การติดตั้งเครื่องมือบันทึกข้อมูลเข้ากับชุดทดสอบ	48
3.17 การติดตั้งเครื่องมือชุดป้อนฝุ่นเข้ากับชุดทดสอบ	48



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประมวลศัพท์และคำย่อ

IR	=	Infrared Ray
ZCS	=	Zeolite Colliodal Silica Sol
ZSM	=	Zeolite Silicalite Molecular
CMC	=	Sodium Carboxyl Methyl Cellulose
α - alumina	=	Alpha Alumina
wt	=	Wet – Bulb Temperature
PC	=	Conventional Power Boiler
FBC	=	Fluidized Bed Combustion Unit
BI-XDC	=	Brookhaven Instruments X-Ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer
PVA	=	Polyvinyl Alcohol
pH	=	Potential of Hydrogen
ASTM	=	American Society for Testing and Material
Torr	=	Torricelli (1 torr = 1 mmHg)
P_t	=	Total Pressure
OF	=	Oxidation Fire
RF	=	Reduction Fire
TiO ₂	=	Titanium Dioxide
SiO ₂	=	Silicon Dioxide
Sol-Gel	=	Solution Gelification
Al ₂ O ₃	=	Alumina
ZrO ₂	=	Zirconium Oxide
MgO	=	Magnesium Oxide
SiC	=	Silicon Carbide
Si ₃ N ₄	=	Silicon Nitrite

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรมเคมี รวมถึงในกระบวนการเผา (incineration) ความจำเป็นต้องทำความสะอาดแก๊สได้เพิ่มสูงขึ้น [1,2] ทั้งนี้เนื่องจากข้อบังคับของกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของอนุภาคฝุ่น แก๊สกรด สารประกอบของโลหะหนัก ไฮโดรเจนคลอไรด์และสารอินทรีย์คลอไรด์ อย่างเช่น ไดออกซินและฟูแรน การทำความสะอาดแก๊สกระบวนการที่อุณหภูมิสูง ทำให้การกำจัดส่วนประกอบที่เป็นแก๊สมลพิษด้วยเทคนิคการสครับแบบแห้ง สามารถกระทำไปพร้อมกันได้เลย ข้อดีเพิ่มเติมที่อาจเป็นไปได้อีกประการหนึ่งจะเกี่ยวข้องกับ การก่อกำเนิดขึ้นใหม่ของสารอินทรีย์คลอไรด์ อย่างเช่น ไดออกซิน ซึ่งปัจจุบันเชื่อกันว่าถูกเร่งปฏิกิริยาคด้วยธาตุของอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาเมื่อแก๊สเหล่านี้ถูกทำให้เย็นตัวลง ดังนั้นการกำจัดอนุภาคที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว จะช่วยป้องกันการปล่อยสารประกอบที่เป็นพิษเหล่านี้เข้าสู่บรรยากาศ

โดยทั่วไป การจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต รวมถึงในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงงานเผาขยะ โรงงานผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน จะทำการลดอุณหภูมิก่อนแล้วส่งไปยังเครื่องจับเก็บฝุ่นแบบใช้กันทั่วไป วิธีการดังกล่าวเป็นการสูญเสียปริมาณความร้อนจากแก๊สร้อน โดยเปล่าประโยชน์ การจับเก็บฝุ่นจากแก๊สร้อนโดยไม่ต้องทำการลดอุณหภูมิก่อน นับเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ความร้อนของกระบวนการให้สูงขึ้น อุปกรณ์จับเก็บฝุ่นหลัก ๆ ที่นิยมใช้กันไม่ว่าจะเป็น ไชโคลน เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง และเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนั้น ไม่สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ/หรือมีข้อจำกัดในแง่วัสดุ เมื่อนำไปใช้จับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงและมีฤทธิ์กัดกร่อน การพัฒนาอุปกรณ์จับเก็บฝุ่นแนวใหม่ที่สามารถจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง (โดยไม่ต้องทำแก๊สนั้นให้เย็นก่อน) กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ข้อได้เปรียบของการจับเก็บฝุ่นที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงก็คือ (1) สามารถเก็บพลังงานความร้อนจากกระแสแก๊สกลับคืน (ก่อนใช้งานหรือก่อนปล่อยทิ้ง) (2) ป้องกันอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ไขขัดกัน แก๊ส และอุปกรณ์ปลายทางอื่น ๆ จากการกัดเซาะและกัดกร่อน อันเนื่องมาจากอนุภาคฝุ่นและ/หรือแก๊สที่มีฤทธิ์กัดกร่อนที่ปะปนอยู่ในกระแสแก๊ส และ (3) มีข้อได้เปรียบในแง่ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็กลงเมื่อเดินเครื่องที่ความดันสูง

ในบรรดาวิธีการทำความสะอาดแก๊สแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่นั้น การกรองด้วยตัวกรองเซรามิกถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีก้าวหน้าล่าสุดสำหรับการกรองอนุภาคฝุ่นออกจากแก๊สร้อน ทั้งนี้เนื่องจากตัวกรองชนิดดังกล่าวมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทนต่อความร้อนและสารเคมี โดยเฉพาะไอน้ำและไอของสารแอลคาไล จากประสบการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันได้แสดงให้เห็นแล้วว่า เทคโนโลยีนี้สามารถบรรลุประสิทธิภาพการจับเก็บ (Collection Efficiency) ที่สูง อีกทั้งอุณหภูมิและความดันลดในระบบยังต่ำอีกด้วย ในระหว่างวัฏจักรการกรอง ฝุ่นจะถูกจับอยู่ที่ผิวด้านนอกจนกระทั่งถึงเวลาหรือค่าความดันลดที่กำหนดไว้ จึงทำความสะอาด (โดยทั่วไป 2-3 ครั้ง/ชั่วโมง) โดยปกติกระทำแบบออนไลน์ โดยพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงในลักษณะพัลส์ เพื่อไล่อนุภาคที่เกาะอยู่ที่ผิวของตัวกรองออกไปโดยไม่ต้องหยุดการกรอง เด็กที่หลุดออกมาจะตกลงสู่ถังรองรับทางด้านล่างของหน่วยกรอง จากนั้นวัฏจักรการกรองก็กลับมาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ปัจจุบัน การไล่อนุภาคฝุ่นที่สะสมอยู่อกจากผิวตัวกรองให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยังเป็นประเด็นสำคัญอันหนึ่งที่จะต้องหาทางแก้ไขเพื่อการเดินเครื่องในแบบต่อเนื่อง

ปัจจุบัน ตัวกรองเซรามิกที่มีขายในท้องตลาดยังมีราคาแพง จึงทำให้ยังไม่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศ การวิจัยหาวัสดุเซรามิกที่มีความเหมาะสมและมีราคาไม่แพงนัก จึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาและวิจัยกันอย่างจริงจังต่อไป งานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาตัวกรองเซรามิก เพื่อนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับกรองฝุ่นออกจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง สำหรับประยุกต์ใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน รวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมตัวกรองเซรามิก

Auriol และ Gilot [3] ได้ทำการผลิตเชื้อแผ่นอะลูมินาเซรามิกแบบที่อกลวง รูปทรงแปดเหลี่ยม โดยเสนอการผลิตเชื้อแผ่นได้ 3 แบบดังนี้

1. เป็นเชื้อแผ่นที่มีชั้นรองรับ 1 ชั้น และชั้นผิว 2 ชั้น โดยผ่านการขึ้นรูปแบบ Extrusion และอบที่อุณหภูมิ 180 °C ในบรรยากาศรีดักชัน จากนั้นเคลือบผิวอะลูมินาที่มีความหนืด 5 Poise โดยวิธี Slip Casting ได้ความหนา 20 μm โดยเคลือบไว้ที่ผิวด้านใน จากนั้นนำไปอบเชื่อม (Sintering) ที่ อุณหภูมิ 1550 °C ในบรรยากาศออกซิเดชัน และเคลือบชั้นผิวอีกชั้นลงบนชั้นผิวที่ 1 ด้วย TiO_2 ความหนืด 5 Poise โดยวิธี Slip Casting แล้วนำไปอบเชื่อม ณ อุณหภูมิ 1000 °C

2. ผลิตเยื่อแผ่น โดยใช้วัสดุและวิธีการเหมือนแบบที่ 1 แต่จะต่างกันที่ชั้นผิวที่สองนั้นจะเคลือบบนผิวด้านนอกของชั้นรองรับ

3. เป็นเยื่อแผ่นที่ชั้นรองรับ 2 ชั้นและมีชั้นผิว 1 ชั้น โดยชั้นรองรับจะขึ้นรูปด้วยวิธี Coaxial Extrusion ได้ชั้นรองรับ 2 ชั้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 °C ในบรรยากาศรีดักชัน จากนั้นเคลือบชั้นผิวด้วยอะลูมินาโดยวิธี Slip Casting โดยเคลือบที่ผิวด้านในของชั้นรองรับ จากนั้นอบเชื่อมต่อกที่อุณหภูมิ 1550 °C ในบรรยากาศออกซิเดชัน

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเยื่อแบบที่ 1 และ 2 พบว่าความสามารถในการยอมให้น้ำและอากาศซึมผ่านหรือเรียกอีกอย่างว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแบบที่ 2 สูงกว่าแบบที่ 1 ประมาณ 1.25 เท่า เนื่องจากการเคลือบชั้นผิวด้านนอกส่งผลให้ชั้นผิวมีพื้นที่ผิวมากกว่าเยื่อแบบที่ 1 สำหรับแบบที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 1 แต่สามารถทนความดันได้สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่าจึงแข็งแรงและสามารถรับแรงดันได้สูงกว่า ซึ่งสรุปได้ว่าความหนาและพื้นที่ผิว มีผลต่อความแข็งแรงและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นอย่างมาก

Raileanu และคณะ [4] ได้ทำการเตรียมเยื่อแผ่นซีโอไลต์ (Zeolite) ที่ไม่มีชั้นรองรับ 2 ชนิดคือ Silicalite 1 และ 2 กับแบบมีชั้นรองรับที่ทำจากอะลูมินา โดยทั้งหมดใช้การเตรียมโดยวิธี Hydrothermal Sol-Gel Synthesis นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าอิทธิพลของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่ง SiO₂, อุณหภูมิของระบบ Thermal Treatment และการมีชั้นรองรับเซรามิกของซีโอไลต์ ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการจะถูกทำการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติต่าง ๆ โดยการใช้ X-Ray Diffraction, IR Spectroscopy และ Scanning Electron Microscope ผลแหล่ง SiO₂ จะมีความสำคัญมากกับการส่งผลต่อผลึกภัณฑ์สุดท้ายของแผ่นซีโอไลต์ คือถ้าใช้สารละลาย Colloidal Silica Sol (ZCS) เป็นโซลจะทำให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้เป็น ZSM-11 (Silicalite -2) ขณะที่สารละลายโซเดียมซิลิเกต (ZSS) จะทำให้ได้เป็น ZSM-5 (Silicalite-1) ส่วนแผ่นที่มีอะลูมินาเป็นชั้นรองรับจะทำให้การเกิดนิวคลีเอชันและออเดอริงของกระบวนการเกิดผลึกแก้ว (Crystallization) ของ ZSM-5 ได้ดีขึ้น

Terpsta และคณะ [5] ได้ทำการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดไมโครฟิลเตรชันและนำเยื่อแผ่นที่ผลิตได้มาเป็นชั้นรองรับในการผลิตเยื่อแผ่นสำหรับอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับแก๊สเพอมีเอชัน จะผลิตชั้นรองรับจากแอลฟาอะลูมินา (α -alumina) โดยกระบวนการ Extrusion จากนั้นนำไปอบเชื่อมที่อุณหภูมิ 1600 °C และเคลือบ Slip ที่เป็นแอลฟาอะลูมินาลงบนชั้นรองรับที่ทำการอบเชื่อมแล้ว จากนั้นนำไปอบเชื่อมที่อุณหภูมิ 1200 °C จะได้ชั้นผิวหนา 30 μ m พบว่าความหนาของชั้นผิวขึ้นอยู่กับ

1. ความเร็วของอนุภาคตามแรงโน้มถ่วงที่มาจากน้ำหนักของอนุภาคเริ่มต้นในน้ำ Slip ที่ใช้ในการเคลือบบนชั้นรองรับ
2. ความหนืดของ Slip ถ้าหนืดมากสามารถควบคุมได้ โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอลฟาอะลูมินาใน Slip ให้น้อยลง

Jo และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ Composite Ceramic Membrane โดยการนำเอาเยื่อแผ่น (Membrane) ที่เตรียมมาจาก Titanium และ เถ้าลอยมาเปรียบเทียบกันซึ่งทั้งสองจะมีโครงสร้างเป็นแบบ Packed Bed ที่มีความหนาน้อยกว่า 100 μm โดยเยื่อแผ่น Titania จะมีขนาดรูพรุนเล็กและละเอียดกว่าเยื่อแผ่นเถ้าลอย ซึ่งผลจากการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า

1. ความดันตกที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดลอง และ จากการทำนายตามความสัมพันธ์ของ Kozeny – Carman มีความแตกต่างกัน และมีความแปรปรวนที่เยื่อแผ่นเถ้าลอยมากกว่า
2. อุณหภูมิมีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลผ่านทำให้ไหลผ่านได้น้อยลง และในกรณีของเยื่อแผ่น Titania จะลดลงเหลือ 80%
3. ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของทั้งสองมีมากกว่า 99 %

เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์และคณะ [7] ได้สร้างเครื่อง Extruder แบบสกรูเพื่อใช้ในการขึ้นรูปเซรามิกให้มีลักษณะเป็นท่อกลวง โดยทำการทดลองใช้กับดินเหนียวพบว่า

1. ช่วงแรกมีการสร้างเครื่อง Extruder ซึ่งจะมีทั้ง Feed Screw และ Press Screw รวมทั้งมีระบบดูดอากาศ แต่พบว่าตัว Feed Screw ยังทำงานได้ไม่ดึ๊ง จึงไม่มีการใช้ระบบดูดอากาศไปด้วย ซึ่งในภายหลังได้ทำการประยุกต์เหลือเพียง Press Screw เพียงอย่างเดียว
2. ทำการศึกษาดังการออกแบบขนาดแม่พิมพ์ โดยทดลองทำแม่พิมพ์ยาว 5 และ 13 เซนติเมตรพบว่ามีส่วนที่แห้งและติดันสำหรับแม่พิมพ์ที่มีขนาดยาวทำให้เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานจะไม่สามารถออกจากแม่พิมพ์ได้ จึงสรุปได้ว่าแม่พิมพ์ขนาดสั้น (5 เซนติเมตร) ใช้งานได้ดีกว่าแบบยาว
3. สำหรับท่อกลวงที่มีส่วนผสมที่เป็นน้ำในปริมาณ 18 – 20 % จะให้ผลค่อนข้างดีคือสามารถตัดให้ตรงได้อีกทั้งไม่แตกหรือร้าวเมื่อแห้ง ซึ่งส่วนผสมที่มีความชื้นต่ำจะทำให้ดินแห้งและแข็งอยู่ภายใน Barrel แต่ถ้ามีปริมาณความชื้นสูงดินที่เหลวมากจะเกาะติดกับ Screw ไม่เคลื่อนตัวไปข้างหน้า

ัชชาวัลย์ สุขมัน [8] ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตชั้นรองรับเยื่อแผ่นอะลูมินารูปแบบท่อให้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 5 – 10 μm พบว่าส่วนผสมและสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตคือ ผงอะลูมินา, Sodium Carboxyl Methyl Cellulose, Zinc Stearate, ผงคาร์บอนและน้ำกลั่น ในปริมาณ 62.90, 2.50, 0.65, 2.5 และ 31.45 % wt ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบเชื่อมที่อุณหภูมิ 1,700 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

พบว่าจะได้ชั้นรองรับเยื่อแผ่นแบบสมมาตรที่แข็งแรงพอใช้งานได้ โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย $5.29 \mu\text{m}$ ปริมาตรรูพรุน 46.68%

นอกจากนั้นยังพบว่าปัจจัยที่สำคัญต่อขนาดรูพรุนนั้นคือ ปริมาณของผงคาร์บอน โดยอุณหภูมินั้นมีผลกระทบน้อยมาก แต่สำหรับปริมาตรรูพรุนนั้น อุณหภูมิจะมีผลกระทบอยู่น้อยสำคัญ เนื่องจากที่อุณหภูมิอบเชื่อม 1600 สูงขึ้นไป จนถึง $1700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลงจาก 47.14% ไปเป็น 32.53% และสำหรับชั้นรองรับเมื่อไปทดสอบการกรอง พบว่าสามารถกักเซลล์ยีสต์ได้ 100% และมีค่าความต้านทานเท่ากับ $1.94 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

ปฏิมา เทพายน [9] ได้ทำการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกไมโครฟิลเตรชันที่ขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการ Extrusion แบบแรมใช้ขึ้นรูปชั้นรองรับเยื่อแผ่นและใช้กระบวนการ Slip Casting ในการขึ้นรูปชั้นผิว พบได้ว่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชั้นรองรับก็คือ ผงอะลูมินา, Sodium Carboxyl Methyl Cellulose (CMC), Zinc Sterate และน้ำในอัตราส่วน $72.5 : 2 : 0.5 : 25 \text{ \%wt}$ ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบเชื่อมที่อุณหภูมิ 1600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าได้ชั้นรองรับที่แข็งแรงสามารถนำไปใช้งานได้ โดยชั้นรองรับจะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ $1 \mu\text{m}$ ปริมาตรรูพรุน 44% ความต้านทานการไหลของเยื่อแผ่น $1.30 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ นอกจากนั้นยังศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อแผ่นพบว่า ปริมาณน้ำจะเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการ Extrusion และอุณหภูมิอบเชื่อมที่สูงประกอบด้วยเวลาในการอบเชื่อมที่ยาวนาน ต่างก็เป็นตัวแปรที่ทำให้รูพรุนมีแนวโน้มลดลง

Jo และคณะ [10] ได้ทำการผลิตตัวกรองเซรามิกจากเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับทำความสะอาดแก๊สร้อนของเตาถ่านหินโรงไฟฟ้า ซึ่งใช้เถ้าลอยที่มาจากโรงไฟฟ้า Huntly ในประเทศนิวซีแลนด์โดยวิธีการ Coating กับแผ่นตะแกรงเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเท่ากับ $38 \mu\text{m}$ สำหรับการทดสอบกำหนดคุณลักษณะของตัวกรองในเรื่องของ ขนาดและ โครงสร้างของรูพรุน ความดันตกคร่อมที่ผ่านตัวกรอง และคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งขนาดรูพรุนที่กระจายตัวเป็นคุณสมบัติที่บอถึงความมีศักยภาพในการผ่านของกระแสแก๊สโดยความดันตกคร่อมของตัวกรอง คุณสมบัติทางกลเป็นคุณสมบัติซึ่งบ่งบอกถึงความมีเสถียรภาพในการนำตัวกรองไปใช้กรองแก๊สที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำการทดสอบด้วยระบบอัลตราโซนิคส์ จากการทดสอบพบว่ารูพรุนของตัวกรองที่ผลิตขึ้นมานั้นมีขนาด $1.63 - 3.91 \mu\text{m}$ สำหรับการ Coat ชั้นเดียว และมีขนาดเฉลี่ย $1.92 \mu\text{m}$ สำหรับการ Coat สองชั้นที่มีความหนา 0.3 mm ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในกระแสแก๊สจะมีขนาด $1 - 10 \mu\text{m}$ และมี ความดันตกคร่อม $1.8 \text{ kPa l}^{-1} \text{ min}^{-1}$ สำหรับการ Coat สองชั้น และ $0.9 \text{ kPa l}^{-1} \text{ min}^{-1}$ สำหรับการ Coat ชั้นเดียว

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการจับเก็บฝุ่น

Berbner และ Löffler [11] พบว่าเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกไล่ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของเค้กฝุ่นจะเป็นการเพิ่มความดันสูงสุดภายในแท่งตัวกรอง อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง (850°C) ข้อได้เปรียบของเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกกลดทอนลงด้วยแรงเกาะติดของฝุ่น (Cohesive Force) ที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

Kanaoka และ Amornkitbamrung [12] ได้ทำการศึกษาผลของสภาพการซึมผ่านของตัวกรอง (Filter Permeability) ที่มีต่อพฤติกรรมของเค้กฝุ่นออกจากผิวของตัวกรองเซรามิก จากผลการทดลองพบว่า Pressure Trace หลังฉีดพ่นด้วยแก๊สพลัสส์ มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพการซึมผ่านของตัวกรอง ในกรณีของตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านสูง กระบวนการทำความสะอาดเกือบจะเกิดขึ้นทันทีภายหลังจากฉีดพ่นด้วยแก๊สพลัสส์ สำหรับตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านต่ำ แก๊สสะอาดจะถูกเก็บสะสมไว้ก่อนกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้น

Giemoth และ Renz [13] พบว่ากระบวนการทำความสะอาดไม่เพียงขึ้นอยู่กับสภาพการซึมผ่านของเค้กฝุ่น (Dust Cake Permeability) แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการกรอง (Filtration Velocity) และความหนาของชั้นฝุ่นอีกด้วย การเพิ่มช่วงรอบ (Cycle Duration) หรือเวลาระหว่างการทำความสะอาดด้วยการฉีดพ่นย้อนแบบพลัสส์ และการเพิ่มความเร็วในการกรองที่สูงจะทำให้เกิดชั้นฝุ่นมีความหนาเพิ่มขึ้นและลดสภาพการซึมผ่านลง ความเร็วในการกรองที่สูงจะทำให้เกิดชั้นฝุ่นคกค้างที่มีลักษณะเหนียวแน่น เนื่องจากอนุภาคจะหลุดลอดเข้าไปในตัวกลางและเกิดการอัดตัวกันแน่นของเค้ก นอกจากนี้ยังพบว่าสภาพการซึมผ่านของเค้กฝุ่นไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

Innocentini และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้ในการกรองที่อุณหภูมิสูง โดยทำการเปรียบเทียบเยื่อแผ่นเซรามิก 2 แบบด้วยกัน คือ แบบเยื่อชั้นเดียว (Monolayered) และ แบบเยื่อสองชั้น (Two-layered) โดยแบบชั้นเดียวจะขึ้นรูปและผลิตเยื่อแผ่นโดยใช้ผงอะลูมินาผสมกับดินเหนียวเพียงอย่างเดียวไม่มีชั้นรองรับ และแบบสองชั้น ชั้นรองรับจะขึ้นรูปโดยใช้ดินเหนียวผสมกับ Kaolin มีรูพรุนสูงและชั้นผิวกรองจะขึ้นรูปตามแบบชั้นเดียวแต่อัตราส่วนต่างกัน เมื่อนำมาตรวจวัดประสิทธิภาพในการกรอง ที่อุณหภูมิต่างกันจาก อุณหภูมิห้องจนถึง 700°C ของทั้ง 2 แบบพบว่าทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพในการกรองสูงสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.5\ \mu\text{m}$ แต่แบบชั้นเดียวจะมีคุณลักษณะโดยรวมที่ดีกว่า

Hajek และ Peukert [15] ได้ทำการศึกษาการกรองที่อุณหภูมิสูงโดยเปรียบเทียบการกรองของเยื่อแผ่นที่ทำจากเซรามิกและโลหะ สภาวะที่ทำการทดสอบคือความในการกรองที่ความเร็ว 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอยู่ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 600°C พบว่าทั้งสองมีประสิทธิภาพในการกรองที่สูง แต่จะแตกต่างกันที่ค่าความดันลด นอกจากนี้ยังมีส่วนที่แนะนำเกี่ยวกับการทำความสะอาดเพื่อที่จะทำให้เยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพสูงอยู่ตลอดเวลา และระบบที่ดีที่ใช้ในการทำความสะอาดเยื่อแผ่นคือ แบบ Pulse Jet

มานะ อมรกิจบำรุง [16] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกรองฝุ่นของตัวกรองเซรามิกและอิทธิพลของความดันแก๊สพัลส์ที่มีต่อการกำจัดเค้กฝุ่น โดยตัวกรองเซรามิกที่ใช้เป็นรูปแท่งกระบอกพื้นที่มีผิวการกรองเท่ากับ 0.051 ตารางเมตร ในการทดลองจะดำเนินการที่ความเร็วการกรองเท่ากับ 0.05 เมตรต่อวินาที ความดันแก๊สพัลส์เท่ากับ 100, 300 และ 500 kPa ระยะเวลาการพัลส์เท่ากับ 200 และ 300 มิลลิวินาที ผลที่ได้พบว่าความดันลดบนตัวกรองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงเริ่มต้นและจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งอัตราการเพิ่มความดันลดคงที่ ส่วนประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่นจะเพิ่มขึ้นตามความดันของแก๊สพัลส์และจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันสูงกว่า 300 kPa ส่วนระยะเวลาการพัลส์แทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่น

Choi และคณะ [17] ทำการทดลองและศึกษาผลกระทบของหัวฉีดที่ใช้พัลส์ทำความสะอาดกับตัวกรองเซรามิกรูปแท่งทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.52 เมตร ความสูงของตัวกรองที่สูงที่สุด 3.2 เมตร โดยทดลองทำการพัลส์ด้วยหัวฉีดต่างขนาดกัน และทำการป้อนฝุ่นในสองลักษณะ คือ ทำการป้อนฝุ่นร้อนและเย็น เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความดันในสภาวะการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้จากการใช้หัวฉีดที่แตกต่างกัน และมุมที่ปลายหัวฉีด ซึ่งผลการทดลอง สรุปได้ว่า

1. ที่อุณหภูมิสูงจะมีความเหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาดตัวกรองด้วยการพัลส์
2. ขนาดของหัวฉีดที่เล็กลงจะทำให้ความดันในการพัลส์สูง
3. ปลายของหัวฉีดที่ตรงจะทำให้ความดันในการพัลส์สูงกว่าปลายหัวฉีดที่ทำเป็นมุม แต่จะต้องระวังไม่ให้ความดันสูงเกินไป เพราะจะทำให้ความดันคิดลบที่ทางเข้าของตัวกรอง

Dittler และ Umhauer [18] ได้ทำการทดลองถึงอิทธิพลของเงื่อนไขในการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้าตัวกรองที่ไม่ยึดหยุ่นสำหรับใช้แยกอนุภาคออกจากแก๊ส ซึ่งได้ใช้ตัวกรองที่ฉาบผิวหน้าด้วยลักษณะของโครงสร้างเป็นใยเซรามิกและ โครงสร้างของเม็ดเกรนเซรามิกกับอนุภาคที่มีขนาดในช่วง $0.1\ \mu\text{m} - 1.0\ \mu\text{m}$ ความเร็วในการกรองเฉลี่ย $5\ \text{cm/s}$ โดยติดตั้งกล้องถ่ายภาพและตัวนับจำนวนอนุภาคบนชุดทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบกันในการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้าตัวกรองทั้งสอง พบว่าตัว

กรองที่ทำการฉาบผิวหน้าด้วยลักษณะโครงสร้างเม็ดเกรนเซรามิก สามารถทำการแยกและเกิดการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้ามากกว่าตัวกรองที่ฉาบด้วยลักษณะโครงสร้างเป็นไฮเซรามิก

Choi และ Ahn [19] ทำการศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติอนุภาคฝุ่นกับการตัวกรองเซรามิก แบบแท่งที่อุณหภูมิสูง ทดลองโดยใช้หน่วยทดสอบร้อนแบบแก๊สไอเสียที่ออกมาจาก Oil Burner ของเต้าลอบโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเฉลี่ยประมาณ $8.5 \mu\text{m}$ โดยที่เต้าลอบของโรงไฟฟ้านั้นแบ่งเป็น เต้าลอบของโรงไฟฟ้าแบบธรรมดา (PC) และ เต้าลอบโรงไฟฟ้าที่เผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBC) ซึ่งผลการทดลองพบว่า อนุภาคของกากเต้าลอบ FBC รวมตัวกัน ได้ดีกว่าอนุภาคเต้าลอบ PC และใช้ความดันในการพัลส์ตัวกรองที่ต่ำกว่า เนื่องจากรูปร่างและความพรุนที่สูงกว่าของกากเต้าลอบแบบ FBC

1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการผลิตตัวกรองเซรามิกจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
2. ทดสอบคุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตได้ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ ใช้กรองฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ผลิตแผ่นกรองเซรามิกจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
2. ตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิกที่ได้
 - 2.1 ตรวจสอบคุณสมบัติ ขนาดของรูพรุน
 - 2.2 ตรวจสอบสมบัติปริมาตรของรูพรุน
 - 2.3 ตรวจสอบความแข็งแรงเชิงกล
3. ทดสอบความสามารถในการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
2. ได้เทคโนโลยีในการผลิตแผ่นกรองเซรามิกจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับปรับปรุงพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีบท

2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของการกรอง

ฝุ่น (dust) หมายถึง มวลสารอนุภาค (Particulate Matter) ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งเท่านั้น และสามารถแขวนลอยในบรรยากาศได้ชั่วคราว ถ้าหากอนุภาคของแข็งนี้มีขนาดโตมากกว่า 100 ไมครอน อาจเรียกว่า อนุภาคหยาบ (Coarse Particle) และเล็กกว่า 100 ไมครอน เรียกว่า อนุภาคละเอียด (Fine Particle)

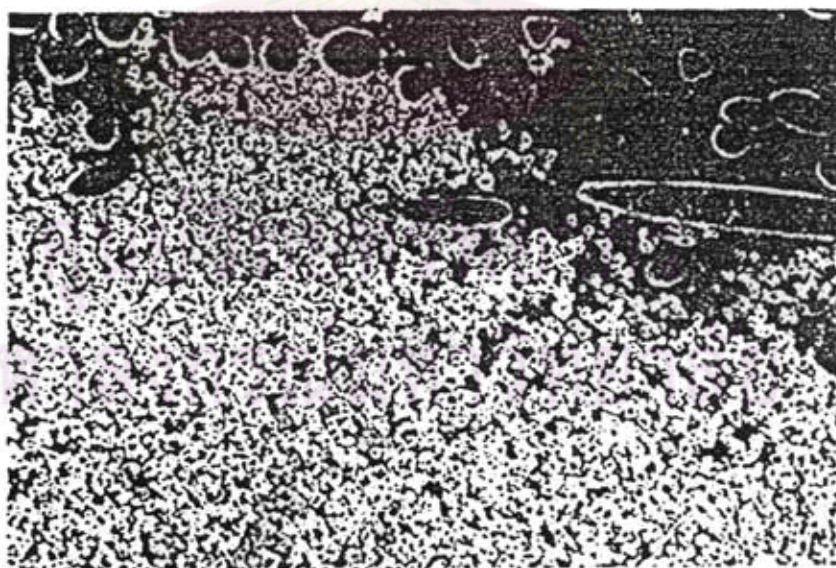
คำว่า “การกรอง” (Filtration) หมายถึงการแยกอนุภาคออกจากของไหลอันได้แก่ แก๊สและของเหลว โดยการผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนหรือเรียกอีกอย่างว่า “วัสดุพรุน” ในการกรองนี้สามารถจะแบ่งลักษณะการกรองออกได้เป็น 2 แบบหลัก ๆ ด้วยกันคือ “Depth Filtration” และ “Surface Filtration”

Depth Filtration จะเป็นการกรองอนุภาคฝุ่นออกจากแก๊สโดยใช้หลักให้อากาศไหลผ่านเข้าไปในตัวกรอง ลักษณะของโครงสร้างภายในของตัวกรองจะทำหน้าที่เป็นตัวขังอนุภาคฝุ่นเอาไว้ ส่วนใหญ่ตัวกรองที่ใช้จะอยู่ในรูปเส้นใย ส่วน Surface Filtration ตัวกรองจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวกีดกันที่คอยดักอนุภาคฝุ่นไว้ เกิดการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นที่ชั้นผิวด้านนอกของตัวกรองในรูปของเค้ก (Cake) ในทางปฏิบัติแล้วนั้นการกรองจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทั้งฝุ่น และตัวกลางที่มาทำเป็นตัวกรอง ไม่ใช่เฉพาะขนาดของรูพรุนในตัวกรองเท่านั้นแต่ยังจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกาะตัวกันของอนุภาคฝุ่นและความสามารถการเกาะกับตัวกรองด้วย โดยปกติในการทำความสะอาดแก๊สโดยใช้ตัวกรองที่เป็นวัสดุเซรามิกจะเป็นการกรองแบบ Surface Filtration แต่การเกิดการกรองแบบ Surface Filtration อย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยากเพราะว่าในกระบวนการจริงนั้นมักจะมีอนุภาคฝุ่นสามารถเล็ดลอดเข้าไปในตัวกรองได้ก่อนที่จะมีการทำความสะอาดตัวกรองเกิดขึ้น ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่ค้างอยู่ภายในตัวกรองจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองค่อย ๆ ลดลง

สำหรับระบบตัวกรองเซรามิกจะทำงานเป็นแบบวงจรวัฏจักร เริ่มต้นจากแก๊สปนฝุ่นจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์กรองภายใต้ความดัน โดยจะไหลจากด้านนอกตัวกรองเข้าสู่ภายในตัวกรองเกิดการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นด้านนอกผิวตัวกรองเกิดเป็นชั้นเค้ก หลังจากถึงเวลาหรือความดันทานการไหลตามที่กำหนดไว้ ตัวกรองจะถูกทำความสะอาดโดยการพ่นแก๊สพัลส์เข้าทางอีกด้านของผิวเซรามิกที่สะอาด (Backwash Cleaning) ชั้นเค้กจะหลุดออกมา จากนั้นวัฏจักรการกรองก็กลับมาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง [20]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างภาพของ (ก) Depth Filtration และ (ข) Surface Filtration. ในรูป (ก) อนุภาคฝุ่นจะติดอยู่กับเส้นใยภายใน โครงสร้างของตัวกรอง และในรูป (ข) คือชั้นเล็กของฝุ่นที่อยู่บนผิวของตัวกรอง [20]

2.2 วัสดุเซรามิก

เซรามิก (Ceramics) เป็นคำมาจากภาษากรีก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากดินและผ่านการเผาเพื่อเปลี่ยนเนื้อวัตถุนั้นให้มีความแข็ง วัสดุสำหรับใช้ทำเซรามิกมีหลายชนิด จัดแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1 วัสดุที่ที่มีความเหนียว (Plastic Raw – Materials)

ดิน (Clay $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) คือ สารประกอบ Hydrus Aluminum Silicate มีส่วนประกอบและโครงสร้างของผลึกแน่นอน เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดความเหนียวขึ้น และสามารถปั้นให้เป็นรูปต่างๆได้ ถ้าปล่อยให้แห้งจะยังคงรักษารูปร่างเดิมไว้ มีความแข็งแรงขึ้นแต่ค่อนข้างเปราะ ถ้าเผาแล้วจะทำให้แข็งแรงมากขึ้น และผสมกับน้ำจะไม่ทำให้ความเหนียวกลับคืนมาอีก ดินเกิดจากการผุพังของหินแกรนิต หินฟันม้า และเปกมาไตต์ (Pegmatite) เป็นต้น สิ่งที่จะช่วยทำให้เกิดการผุพังของหินได้แก่ น้ำ ลม และปฏิกิริยาทางเคมี กลุ่มแร่ดินส่วนใหญ่เป็นดิน Kaolinite ดินชนิดนี้สามารถนำมาขึ้นรูปต่างๆได้ง่าย เผาแล้วเป็นสีขาว ดิน Kaolinite ชนิดเม็ดละเอียดมีความเหนียวมากเรียกว่า “Ball Clay” เผาแล้วเป็นสีขาวครีม นอกจากจะมีแร่ Kaolinite แล้วยังมีแร่อื่นๆอีก เช่น Dickite , Nacrite Halloysite และ Anuxite ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ Aluminum Silicate ทั้งสิ้น

คุณสมบัติทางเคมีของดิน ตัวอย่างส่วนประกอบของดินจากการวิเคราะห์ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซิลิกา (SiO_2) ซิลิกานอกจากจะเป็นส่วนประกอบของดินแล้ว ยังอาจมีควอตซ์หรือทรายซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของหินมาเป็นดิน

อะลูมินา (Al_2O_3) แร่อะลูมินาเกิดปนอยู่ในดิน ได้แก่ Gibbsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) Bauxite ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) และ Diaspore ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) มักมากในดินที่มีเปอร์เซ็นต์อะลูมินาสูง

เหล็ก (Fe_2O_3) ในดินทั่วไป เหล็กอาจอยู่ในรูปของ Hematite (Fe_2O_3) จะทำให้ดินเป็นสีแดง ถ้าเป็น Limonite ($2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$) จะทำให้ดินเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาล

แคลเซียม (CaO) ถ้าเกิดในรูปของแร่คัลไซต์ ($CaCO_3$) หรือโดโลไมท์ ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) ทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดสุกตัวของเนื้อดิน

แมกนีเซียม (MgO) ในการวิเคราะห์มักพบว่ามีปริมาณไม่เกิน 1%

แอลคาไล (Alkalies) ส่วนมากปนอยู่ในรูปของ Feldspar

ไทเทเนียม (Titanium) มีปนอยู่น้อยมากที่พบเสมอ คือ Rutile (TiO_2)

อินทรีย์ (Carbonaceous Matter) มีสีเทาไปจนถึงสีดำ เกิดจากต้นไม้ตายทับถมรวมกันเป็นเวลานาน แล้วเกิดการสลายตัวและเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอน จึงเรียกว่า Carbonaceous Matter

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ เป็นวิธีการที่ช่วยให้เลือกดินที่เหมาะสมไปใช้งาน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ควรทำการตรวจ มีดังนี้

1. ขนาดของเม็ดดิน ดิน Kaolin มีขนาดของเม็ดตั้งแต่ 0.5 - 10 μm ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยคือ 0.5 μm ขนาดของเม็ดดินมีความสำคัญต่อความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้ง ดินที่มีขนาดของเม็ดเล็กจะมีความเหนียวมาก และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งแล้วสูง
2. การหดตัวเมื่อแห้ง ส่วนมากจะไม่ใช้เนื้อดินชนิดเดียว แต่จะใช้เนื้อดินผสม ฉะนั้นการหดตัวของเนื้อดินผสมจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจกว่า
3. ความแข็งแรงเมื่อแห้ง เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความทนทานของดินต่อแรงที่มากกระทบกระเทือน ดินที่มีความเหนียวมาก จะมีความแข็งแรงมากหลังจากการตากแห้ง
4. การหดตัวเมื่อเผา ดินมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อเผาแตกต่างกัน แล้วแต่สิ่งเจือปนซึ่งอยู่ในดิน บางทีอาจหดตัว 6 - 7 % และถ้าเผาจนถึงจุดสุกตัวจะหดตัวประมาณ 20 %

2.2.2 วัตถุดิบพวกที่ไม่มีความเหนียว (Non - Plastic Raw - Materials)

1. ซิลิกา (SiO_2) โดยมากเกิดจากหินแกรนิต (Granite) ในรูปของควอตซ์ ใช้ในการทำแก้ว Enamel และวัตถุทนไฟ ทั้งนี้เพราะมีความทนไฟสูง
2. หินฟันม้า (Feldspar) ทางเซรามิกใช้เป็นตัวช่วยหลอมละลาย (Flux) ในธรรมชาติส่วนที่เป็นแอลคาไลน์และแอลคาไลน์เอิร์ธของหินฟันม้ามีโซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม ปะปนอยู่ด้วย
3. แคลเซียมและแคลเซียมซิลิเกต ญี่ปุ่นนิยมทำ Wall Tile Bodies โดยผสม 10 - 15 % CaO จะทำให้เนื้อเบา มีการหดตัวน้อยลง สุกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C มีเปอร์เซ็นต์ดูดซึมน้ำ 18 - 22 % ไม่ทำให้เกิดการรานและร่อนง่าย
4. แมกนีเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกต (Talcum & Steatite) มีลักษณะนุ่ม มีสีขาวถึงสีเขียวยอ่อน ถ้ามีส่วนผสมในเนื้อดินใกล้เคียงกับ Cordierite คือ $2\text{MgO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ จะทำให้การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนน้อยลง และเป็นตัวช่วยหลอมละลายโดยลดอุณหภูมิที่ต้องการให้ต่ำลงมา โดยลด Porosity และเพิ่ม Strength แทน
5. แมกนีไซท์ (MgCO_3) ใช้สำหรับเคลือบและทำวัตถุทนไฟ
6. อะลูมินา (Al_2O_3) ถ้านำเอาอะลูมินามาเผาไล่น้ำออกและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงพอที่จะไม่ทำหดตัวอีกต่อไป ใช้ทำวัตถุทนไฟประเภทที่มีอะลูมินาสูง

ส่วนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกแต่ละชนิดมีองค์ประกอบเกี่ยวเนื่องกันหลายอย่าง เช่น ส่วนผสม ความแน่นทึบ ความแข็งแกร่ง ความทนไฟ ขนาดของรูพรุน สิ่งเหล่านี้มีผลเนื่องมาจากขนาดความละเอียดของวัตถุดิบต่างกัน เช่น ถ้าใช้วัตถุดิบที่มีความละเอียดมาก โดยผ่านร่ง 100 ช่องใน 1 นิ้ว มาผสมทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ผลที่ได้รับจะได้เครื่องปั้นที่มีเนื้อแน่น แข็ง และจะละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายเมื่อใช้ไฟแรง ๆ เผล แต่ถ้าใช้วัตถุดิบที่มีความละเอียดโดยผ่านร่งประมาณ 40 ช่องใน 1 นิ้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีเนื้อหยาบไม่แน่น และทนความร้อนได้สูง ไม่ละลายง่าย

2.3 โครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิก

เยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้เมื่อพิจารณาตามลักษณะพื้นผิวและรูพรุน สามารถแบ่งลักษณะ โครงสร้างของเยื่อแผ่นเป็น 2 แบบ คือ

2.3.1 โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างรูพรุนสมมาตรตลอดความหนาของเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ (ก)

2.3.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างหลายชั้นประกอบด้วยชั้นรองรับซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเพอมีเอทสามารถผ่านได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ชั้นรองรับยังทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับเยื่อแผ่นด้วย และชั้นผิวซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นชั้นที่มีหน้าที่ในการกรองโดยตรงดังแสดงในรูปที่ (ข)



(ก) โครงสร้างแบบสมมาตร

(ข) โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

รูปที่ 2.2 โครงสร้างรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิก [8]

2.4 วัสดุสำหรับผลิตเป็นเยื่อแผ่นเซรามิก

วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม [21] คือ

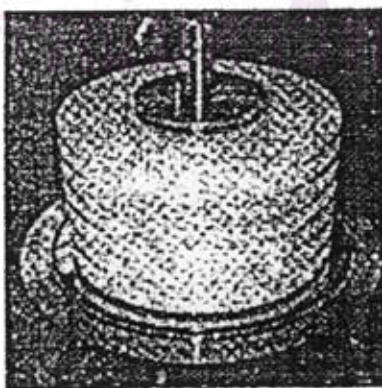
1. กลุ่มออกไซด์ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) เซอร์โคเนียม (ZrO_2) แมกนีเซียม (MgO) และไทเทเนีย (TiO_2)
2. กลุ่มที่ไม่ใช่ออกไซด์ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โบรอนไนไตรด์ (B_3N_3) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN)

การเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาผลิตเยื่อแผ่นนั้นมีความสำคัญมาก เพราะว่าจะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อแผ่น ความเหมาะสมกับการใช้งานและยังสามารถลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย จากกลุ่มเซรามิกที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีแตกต่างกันไป คือ กลุ่มออกไซด์ มีราคาถูกและผลิตได้ง่ายกว่า ส่วนกลุ่มที่ไม่ใช่ออกไซด์จะให้ความแข็งแรงและสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า

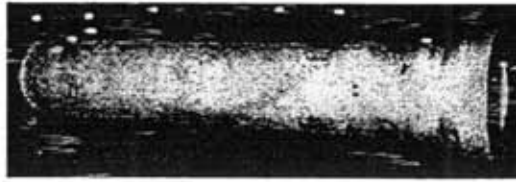
2.5 รูปแบบของเยื่อแผ่น

รูปแบบโดยทั่วไปของเยื่อแผ่นเซรามิก ที่ใช้ในงานด้านทำความสะอาดแก๊สมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

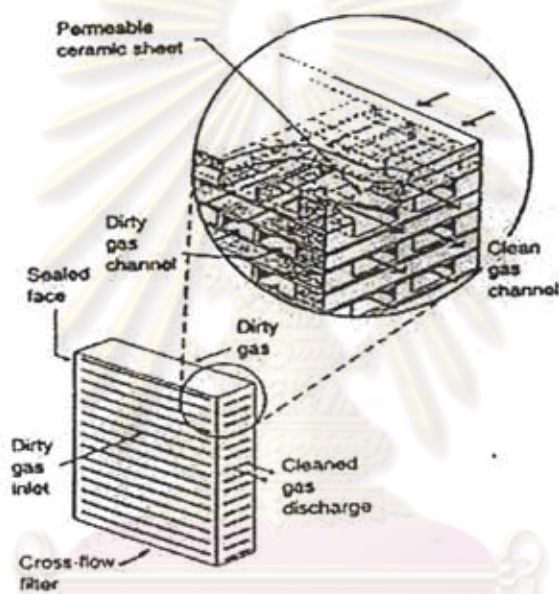
- แบบแผ่น (Disk) ในรูปที่ 2.3 (ก)
- แบบแท่ง (Candle) ในรูปที่ 2.3 (ข)
- แบบรังผึ้ง (Multichannel Monolith หรือ Westinghouse Cross-Flow Filter) ในรูป 2.3 (ค)



(ก) แบบแผ่น (Disk) [22]



(ข) แบบแท่ง (Candle) [16]



(ค) แบบรังผึ้ง (Multichannel Monolith) [20]

รูปที่ 2.3 รูปแบบของเชื้อแผ่นเซรามิก

2.6 วิธีการผลิตเชื้อแผ่นเซรามิก

การผลิตเชื้อแผ่นเซรามิกประกอบไปด้วยขั้นตอนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

2.6.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคอะลูมินามีความสำคัญต่อเชื้อแผ่นที่ต้องการผลิตเป็นอย่างมาก ถ้าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็ก เชื้อแผ่นที่ได้จะมีความหนาแน่นมาก ส่วนการใช้อุณหภูมิที่มีขนาดใหญ่ เชื้อแผ่นที่ได้จะมี

ความหนาแน่นต่ำ แต่ขนาดรูพรุนที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่า สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดอนุภาคที่มีอยู่ พิจารณาจากหลักการทำงานจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

2.6.1.1 เทคนิคการใช้ตะแกรง (Sieving) เป็นวิธีการคัดขนาดอนุภาคที่ง่าย อาศัยหลักการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ซึ่งมีรูเปิดขนาดมาตรฐานซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยกำหนดให้ ขนาดของรูเปิดมาตรฐานที่อนุภาคสามารถผ่านได้นั้นเป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคด้วย การทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ ทำได้โดยการเขย่าหรือใช้ลมเป่า เป็นต้น สำหรับเทคนิคการใช้ตะแกรงนี้จะเหมาะสมกับอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ คือ สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วงประมาณ 44 - 250 ไมโครเมตร เท่านั้น เนื่องจากว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 44 ไมโครเมตร มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเกาะกันของอนุภาค (Agglomerate) แต่ในบางบริษัทมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถเครื่องมือให้มากขึ้น โดยให้ทำงานในน้ำหรืออาจเป็นของเหลวชนิดอื่น เรียกว่า “Wet Sieve” ซึ่งจะเขย่าโดยใช้คลื่นเสียงทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนไหว ผงขนาดเล็กที่เกาะกันจะแตกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ซึ่งวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาได้ดี สามารถคัดขนาดอนุภาคได้ถึง 2 ไมโครเมตร [8]

ตารางที่ 2.1 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM [23]

มาตรฐาน ASTM	เบอร์เรียก	ช่องเปิด (mm)
	No.325	0.044
	No.270	0.053
	No.230	0.062
	No.200	0.074
	No.170	0.088
	No.140	0.105
	No.120	0.125
	No.100	0.149
	No.80	0.177
	No.70	0.210
	No.60	0.250
	No.50	0.297
	No.45	0.350

2.6.1.2 เทคนิคการตกตะกอน (Sedimentation) สำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยใช้วิธีนี้เป็นไปตามกฎของ Stokes ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารตัวกลางภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก เป็นไปตามสมการ 2.1 ดังต่อไปนี้

$$V = S/t = [(D_p - D_L)d^2g] / 18\mu \quad (2.1)$$

- เมื่อ V = ความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่ (m/s)
 S = ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ (m)
 t = ระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ (s)
 D_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)
 D_L = ความหนาแน่นของสารตัวกลาง (kg/m^3)
 d = ขนาดอนุภาค (m)
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 μ = ความหนืดของสารตัวกลาง (Poise)

จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าเวลาเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค กล่าวคือ เมื่ออนุภาคทรงกลมชนิดเดียวกันถูกปล่อยให้เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่เคลื่อนที่ อะลูมินาที่เคลื่อนที่ในน้ำ ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ที่ระยะทาง 1 เซนติเมตร พบว่าผงอะลูมินาขนาด 10 ไมโครเมตร ใช้เวลา 1 นาที แต่อะลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร ใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมง [20] ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตออกแบบให้เครื่องมือทำงานภายใต้แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลาง (Centrifugal force) แทนที่จะเป็นแรงโน้มถ่วงของโลก ทั้งนี้เพื่อให้เวลาของการวิเคราะห์ลดน้อยลง โดยเฉพาะกรณีที่มีอนุภาคขนาดเล็ก บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้หลักการ Sedimentation นี้แสดงในตารางที่ 2.2

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคนั้น บางบริษัทจะใช้วิธีชั่งน้ำหนักของผงอะลูมินาที่ตกลงมาที่เวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งเรียกว่า "Sedimentation Balance" แต่วิธีการนี้เป็นวิธีการแบบเก่า ให้ผลไม่แม่นยำ บางบริษัทที่ผลิตใช้วิธีวัดความเข้มของแสง เมื่อผงอะลูมินาที่ตกลงมาที่เวลาหนึ่ง ๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางตรวจจับซึ่งติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งถ้าอนุภาคมีปริมาณมาก ความเข้มของแสงจะลดลงมาก [24] ซึ่งจะได้ผลดีกว่าวิธีแบบเก่า เครื่องมือวัดที่ใช้วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดขนาดอนุภาคที่มีผลหลายชนิดรวมกัน เนื่องจากแต่ละชนิดมีความหนาแน่นต่างกันทำให้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผิดพลาดได้

ตารางที่ 2.2 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Sedimentation [24]

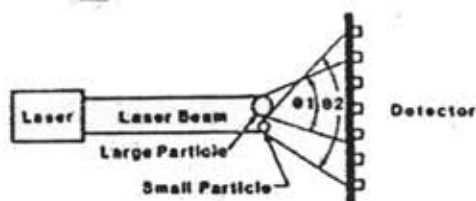
บริษัท/ ผู้ผลิต	เครื่องมือวัด	ขนาดอนุภาค (μm)	หลักการ
Brookhaven	BI-XDC	0.01 – 100	X-Ray Sedimentation Centrifuge
Fritsch/Antal Direct	Analysette 20	0.5 – 500	Photosedimentation
Micrometrics	Sedi Graph 5100	0.1 – 300	X-Ray Sedimentation
Quantachrome	Microscan	0.1 – 300	X-Ray Sedimentation
Shimadzu	SA – CP Series	0.01 – 500	Photosedimentation Centrifuge

2.6.1.3 เทคนิคการใช้ Laser Diffraction เทคนิคนี้อาศัยหลักการพื้นฐานของแสง เมื่อเดินทางไปกระทบอนุภาคจะเกิดการกระเจิงหรือการหักเหของแสง โดยมุมการกระเจิงจะแปรผกผันกับขนาดอนุภาค ซึ่งบริษัทผู้ผลิตที่ใช้หลักการนี้ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Laser Diffraction [24]

บริษัท / ผู้ผลิต	เครื่องมือวัด	ขนาดอนุภาค(μm)
Coulter	LS Series	0.1-800
Fritsch / Antal Direct	Analysette 22	0.16-1160
Leeds & Northrup	Microtrac FRA	0.1-700
Malvern	Mastersizer Series	0.1-600
Shimadzu	SALD - 1100	0.1-500

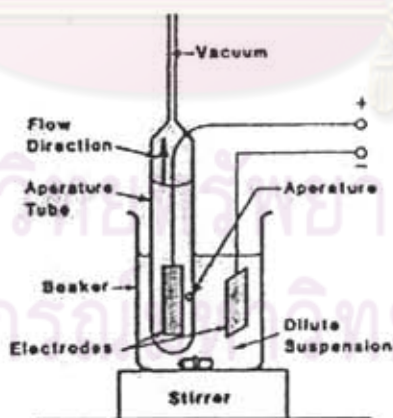
ลักษณะของเครื่อง Laser Diffraction แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยเริ่มต้นจากลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงผ่านสารแขวนลอย เมื่อกระทบกับอนุภาค ลำแสงจะเกิดการกระเจิงเป็นมุมกระเจิงมีขนาดเท่าไรขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค กล่าวคือ ถ้าขนาดอนุภาคเล็กมุมกระเจิงก็จะเป็นมุมใหญ่ และด้ตรวจวัดก็จะจับความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมา ถ้าความเข้มแสงมากแสดงว่าอนุภาคขนาดนั้น ๆ มีปริมาณมากทำให้ทราบการกระจายขนาดอนุภาค เครื่องมือวัดที่ใช้วิธีนี้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความเที่ยงตรงในการวิเคราะห์ ใช้เวลาค่อนข้างน้อยประมาณ 5 นาทีในการวิเคราะห์ และใช้ได้กับผงหลายชนิดในครั้งเดียวกัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น



Diffraction Angle θ_1 For Large Particles.
Diffraction Angle θ_2 For Small Particles.

รูปที่ 2.4 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Laser Diffraction [25]

2.6.1.4 เทคนิค Electrical Sensing ลักษณะของเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้หลักการนี้ แสดงในรูปที่ 2.5 โดยลักษณะการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะคล้ายกับวิธีการใช้ตะแกรง กล่าวคือ จะใช้หลอด (Aperture) ขนาดมาตรฐานอยู่โดยใช้แม่เหล็กเป็นเครื่องกวนสารเพื่อให้อนุภาคในสารแขวนลอยเกิดการเคลื่อนที่ จากนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดจะผ่านเข้าไปในหลอด ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะค้างอยู่ภายนอก เมื่ออนุภาคผ่านช่องเปิดนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดความต้านทานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเพิ่มขึ้นซึ่ง “Pulse” ความต้านทานที่เกิดขึ้นนี้เครื่องมือจะแปรผลเป็นปริมาณของขนาดอนุภาคนั้น โดยความสูง “Pulse” ยิ่งมากแสดงว่ามีปริมาณของขนาดอนุภาคนั้นมาก



รูปที่ 2.5 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Electrical Sensing [25]

2.6.2 การเลือกสารเติมแต่ง (Additives) [25]

สารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตเชื้อแผ่นเซรามิกมีด้วยกันหลายชนิดดังตารางที่ 2.4 ซึ่งในการเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการผลิตขึ้น แต่โดยส่วนใหญ่สารเติมแต่งที่ใช้กันในงานทั่วไปจะ

ได้แก่สารพวกเชื่อมประสาน (Binder), สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer), สารหล่อลื่น (Lubricant) และสารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)

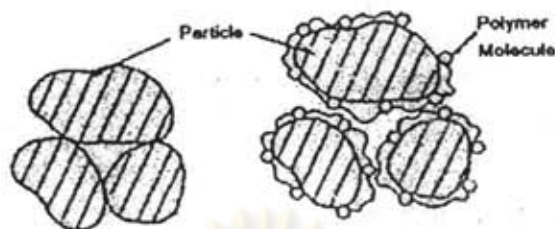
ตารางที่ 2.4 กลไกการทำงานของสารเติมแต่ง [25]

สารเติมแต่ง	คุณสมบัติ
สารเชื่อมประสาน (Binder)	เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา และช่วยให้เกิดการหล่อลื่น
สารหล่อลื่น (Lubricant)	ช่วยการถอดแบบ ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค และอนุภาคกับผนังแบบ
สารช่วยการอัดตัว (Compaction Aid)	ช่วยการจัดเรียงตัวระหว่างการอัดแบบ
สารเพิ่มความยืดหยุ่น(Plasticizer)	ช่วยการไหลตัวของสเลอรี ทำให้ฟิล์มของสารเชื่อมประสานมีความยืดหยุ่นตัวทำให้แกรนูลเสียรูปแบบพลาสติก
สารช่วยการกระจายตัว(Deflocculant)	ปรับ pH ควบคุมประจุที่ผิวอนุภาค
Wetting Agent	ลดแรงตึงผิว(surface tension)
Antistatic Agent	ควบคุมประจุ
Antifoaming Agent	ป้องกันการเกิด โฟมหรือฟอง
Foam Stabilizer	ทำให้เกิด โฟม
สารช่วยการกระจายตัว(Deflocculant)	ยับยั้งความไวต่อปฏิกิริยาของประจุที่ไม่ต้องการ
Fungicide / Bactericide	ช่วยป้องกัน / ลดโอกาสการเสื่อมสภาพ เนื่องจากเชื้อราหรือแบคทีเรีย
Sintering Aid	ช่วยการผืนึกอนุภาค
Dopants	ปรับสมบัติทางไฟฟ้า แม่เหล็กและทางแสง
Phase Stabilizers	ควบคุมเฟสหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

2.6.2.1 สารเชื่อมประสานหรือตัวประสาน จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสาร คือ

- ตัวประสานอนินทรีย์ (Inorganic Binder) เช่น เบนโทไนด์
- ตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) ได้แก่ กลุ่มพอลิเมอร์ เช่น PVA (Polyvinyl Alcohol) และ CMC (Sodium Carboxy Methyl Cellulose) เป็นต้น

ในปัจจุบันตัวประสานอินทรีย์ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากให้ความเหนียวและความแข็งแรงแก่ชิ้นงานเซรามิกได้อย่างดี อีกทั้งยังสามารถกำจัดได้ง่ายเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอบเชื่อม การเชื่อมอนุภาคเซรามิกด้วยตัวประสานแสดง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเชื่อมประสานอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสาน [25]

ตัวประสานชนิดสารอินทรีย์นี้จะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มตามค่าความหนืดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์

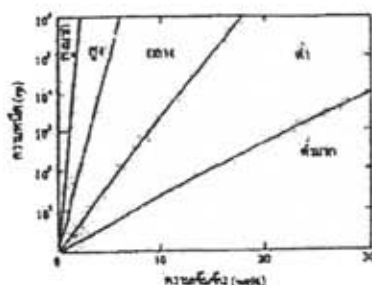
$$\log n = kc \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- n = ค่าความหนืด (Centipoise or MPa.s)
 - k = ค่าคงที่ซึ่งจะบ่งบอกระดับความหนืดของตัวประสาน
 - c = ค่าความเข้มข้น (wt%)

ซึ่งความสัมพันธ์ตามสมการ 2.2 จะแบ่งตัวประสานอินทรีย์ออกเป็น 3 ระดับ [25] ดังนี้

- ตัวประสานที่มีระดับความหนืดปานกลางและสูง เหมาะสมกับวิธีขึ้นรูปแบบอัดรีด
- ตัวประสานที่มีระดับความหนืดต่ำหรือต่ำมาก เหมาะสมกับวิธีขึ้นรูปแบบหล่อหน้า Slip
- ตัวประสานที่มีระดับความหนืดต่ำมาก เหมาะสมกับวิธีการขึ้นรูปแบบอัดแห้ง (Dry Pressing)

จากสมการ อาจเขียนเป็นกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และค่าความเข้มข้น ดังรูปที่ 2.7 [26] จะเห็นว่าตัวประสานชนิดสารอินทรีย์แต่ละชนิดนั้นให้ค่าความหนืดต่าง ๆ กันที่ค่าความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้นตัวประสานในแต่ละระดับความหนืดนั้นจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ เพื่อเตรียมเนื้อเซรามิกสำหรับการขึ้นรูปแต่ละวิธีต่างกัน



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นของตัวประสาน [26]

ตัวประสานอินทรีย์มีอยู่หลายชนิดให้เลือกใช้ ทั้งละลายในน้ำและในตัวทำละลายอื่น ๆ รวมทั้งระดับความหนืดของแต่ละชนิด อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร [28]

ตัวประสาน	ระดับความหนืด	ชนิดไฟฟ้าเคมี
Aqueous Systems		
Colloidal types		
- Cellulose	Low	-
Carbohydrate-derived organics		
- Methyl cellulose, other cellulose ethers	Medium – High	Non – ionic
- Starches and dextrans	Low – Medium	Non – ionic
- Sodium alginate	Medium – High	Anionic
- Ammonium alginate	High	Anionic
- Natural gums	High -Very high	ทุกชนิด
Noncarbohydrate-derived organics		
- Polyvinyl alcohol	Low – Medium	Non – ionic
- Acrylic resins	High	Non – ionic
- Polyethylene glycol	Low – High	Non – ionic
- Waxes	ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ	Non – ionic
- Polyethyleneimine	Low – Medium	Cationic
Nonaqueous (organic solvent) Systems		
- Polyvinyl formal	-	-
- Polymethylmethacrylate	-	-

2.6.2.2 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer)

โดยทั่วไปการใช้ตัวประสานมักจะต้องใช้ร่วมกับสารเพิ่มความยืดหยุ่น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของโซ่ของโมเลกุลตัวประสาน ความยืดหยุ่นแก่ชิ้นงาน และจะมีผลโดยตรงต่อความหนืดของเนื้อยึดหยุ่นมีน้ำหนัก โมเลกุลค่อนข้างต่ำจึงเปรียบเสมือนตัวทำละลาย

ทั้งนี้เนื่องจากจะเป็นการช่วย ซึ่งผลที่ได้คือเป็นการช่วยเพิ่ม เซรามิกเนื่องจากสารเพิ่มความ ยืดหยุ่น ดังนั้นจึงควรใช้ในปริมาณที่

พอเหมาะโดยสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่นิยมใช้กันคือสารกลุ่ม Glycols และกลุ่ม Phthalate เช่น Polyethylene Glycol, Dimethyl Phthalate เป็นต้น

2.6.2.3 สารหล่อลื่น (Lubricant)

สารหล่อลื่นมีหน้าที่หลัก 2 ประการคือ ลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ เช่น ระหว่างผนังแม่พิมพ์กับหัวอัด และลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเซรามิกช่วยให้การไหลตัวของเนื้อเซรามิกดีขึ้น ตัวหล่อลื่นนี้จะใช้ผสมกับผงเซรามิกขณะเตรียมเนื้อเซรามิก หรือใช้ระหว่างการขึ้นรูปแบบอัดรีด และแบบ Uniaxial Pressing ซึ่งตัวหล่อลื่นที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ Paraffin Wax, Zinc Stearate, Aluminum Stearate, Sodium Stearate, Steric Acid, Oleic Acid, Graphite และ Boron Nitride เป็นต้น

2.6.2.4 สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)

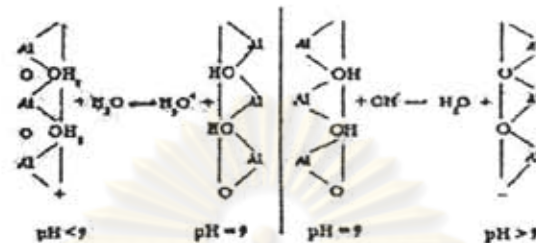
สารช่วยการกระจายตัว หมายถึง สารที่เติมเข้าไปในส่วนผสมแล้วทำให้ผิวของอนุภาคเกิดประจุที่เหมือนกันจำนวนมาก เป็นการเพิ่มประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวของอนุภาคซึ่งแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตนี้ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าประจุเหมือนกันจะผลักกัน ถ้าประจุต่างกันจะดูดกัน ซึ่งสารช่วยการกระจายตัวนี้จะใช้กับวิธีการขึ้นรูปแบบ Slip Casting

สารช่วยการกระจายตัวนั้นใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งจะมีผลต่อผิวอนุภาคโดยทำให้ผิวของอนุภาคมีประจุ [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 กล่าวคือ สารช่วยการกระจายตัวที่มีสภาพเป็นกรด เช่น กรด HNO_3 หรือ HCl เมื่อเติมลงไปในน้ำอะลูมินา คือเป็นการเติมไฮดรอกไซด์ H_3O^+ ลงไป จะเป็นสาเหตุให้น้ำอะลูมินา มี pH ลดลงและยังทำให้ผิวของผงอะลูมินาซึ่งแต่เดิมไม่มีประจุนั้นกลายเป็นผิวซึ่งมีประจุบวกได้

การเติมสารช่วยการกระจายตัวซึ่งมีความเป็นด่าง เช่น เมื่อเติมด่างประเภท Alkali Hydroxide ลงในน้ำอะลูมินา คือ การเติมไฮดรอกไซด์ OH^- ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน จากผิว และสร้างประจุลบขึ้นที่ผิวของผงอะลูมินา อีกทั้งยังเป็นผลให้ pH ของน้ำอะลูมินาสูงขึ้นอีกด้วย

จากที่กล่าวมา อาจสรุปได้ว่าสารช่วยการกระจายตัวสำหรับอะลูมินาใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นเกณฑ์ได้ คือ ในช่วง $\text{pH} = 3.5 - 4.5$ ประจุที่ผิวส่วนใหญ่เป็นประจุบวก ทำให้เกิดการกระจายตัวเนื่องจากมีการผลักกัน และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ประจุบวกที่ผิวจะเริ่มลดลงจนกระทั่ง pH อยู่ในช่วง 8-9

เป็นจุดที่ผิวของอะลูมินาไม่มีประจุ ทำให้อนุภาคมีการเกาะตัวกันอย่างมากแต่เมื่อ pH อยู่ในช่วง 11-12 ผิวของอนุภาคส่วนใหญ่กลายเป็นประจุลบ และน้ำอะลูมินาจะกลับสู่สภาวะการกระจายตัวอีกครั้ง



รูปที่ 2.8 การเกิดประจุที่ผิวของอะลูมินาที่อิมด้วยน้ำ [25]

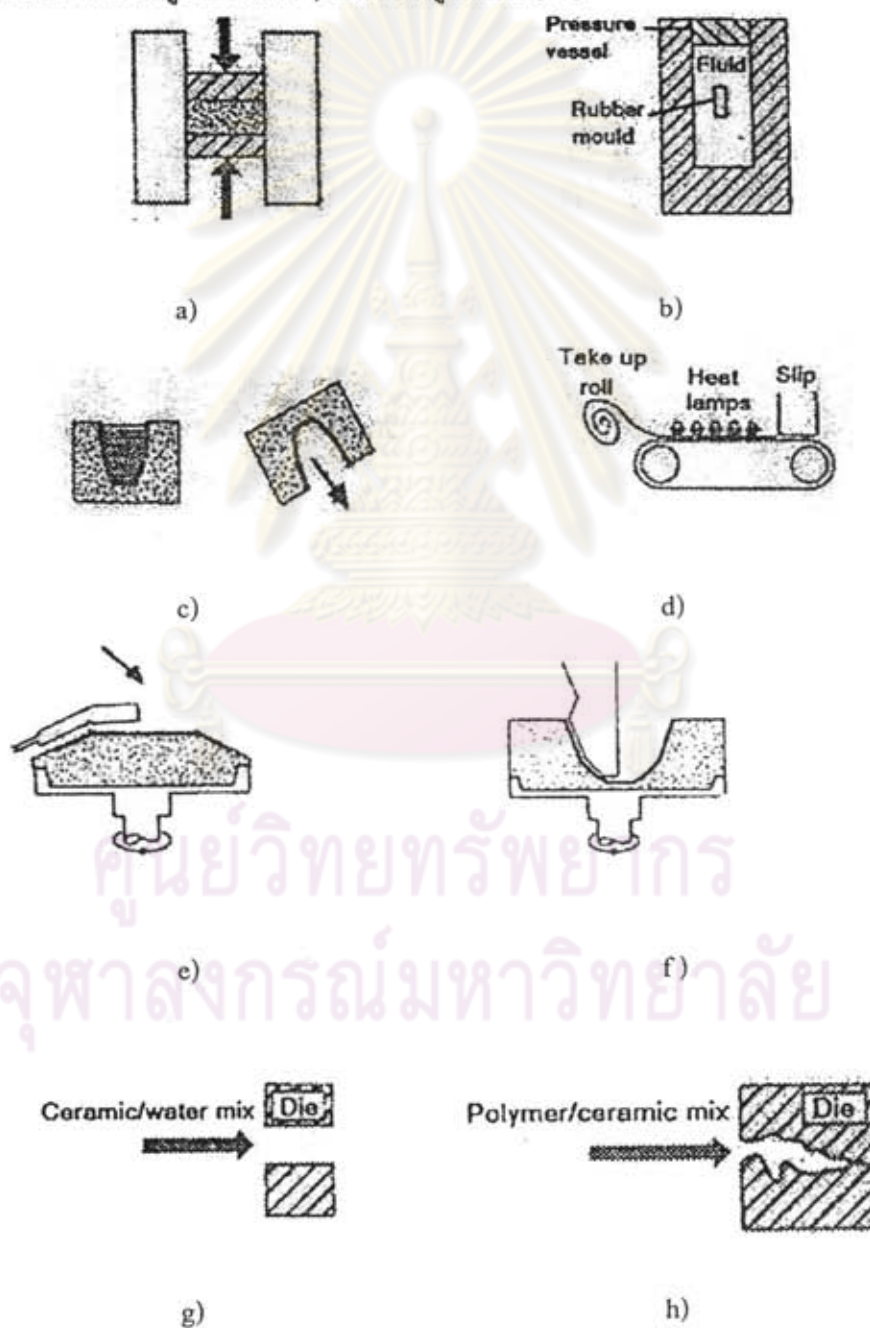
สารที่กล่าวมาข้างต้น เป็นสารเติมหลักที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการเตรียมเนื้อเซรามิกเพื่อทำการขึ้นรูป แต่ยังมีสารเติมอีกหลายชนิดที่จะให้คุณสมบัติต่างๆ แก่เนื้อเซรามิกดังแสดงในตารางที่ 2.6 แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารเติมควรใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุดซึ่งนอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตแล้วยังเป็นการลดความเสี่ยงในการเสียรูปร่างของชิ้นงานเมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดสารเติมเหล่านี้อีกด้วย อีกประการหนึ่งคือ ปริมาณสารเติมมากยังเป็นการทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้ไม่แข็งแรง

ตารางที่ 2.6 สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแต่ละชนิด [9]

สารเติมแต่ง	วิธีการขึ้นรูป
สารเชื่อมประสาน (Binder)	Extrusion, Slip Casting, Pressing
สารหล่อลื่น (Lubricant)	Extrusion, Pressing
สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)	Extrusion, Slip Casting
Wetting Agent	Slip Casting
Water Retainer	Pressing
Antielectrostatic Agent	Pressing
Antifoaming Agent	Slip Casting
Chelating Agent	Extrusion, Slip Casting

2.6.3 การขึ้นรูป

ในการเลือกกระบวนการขึ้นรูป สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก่อนก็คือ ต้องทราบว่าผลผลิตเป็นชิ้นแบบใด และต้องการให้โครงสร้างของชิ้นเป็นแบบใด จากนั้นจึงมาเลือกกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 [28]



รูปที่ 2.9 กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ [28]

(a) Uniaxial Pressing เป็นกระบวนการขึ้นรูป โดยการนำเม็ดอนุภาคที่เตรียมไว้เทลงในแม่พิมพ์แล้วอัดด้วยความดันทั้งบนและล่าง หรือเฉพาะด้านบนหรือด้านล่างก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องมือ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการขึ้นรูปที่ง่าย อัตราการผลิตสูง แต่ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือรูปร่างซับซ้อน

(b) Isostatic Pressing เป็นกระบวนการขึ้นรูป โดยการนำเม็ดอนุภาคใส่ในแม่พิมพ์ซึ่งอยู่ท่ามกลางของเหลว จากนั้นอัดความดันผ่านของเหลวเพื่อให้เกิดความดันในทุกทิศทาง ซึ่งวิธีนี้ความหนาแน่นจะเท่ากันทั่วชิ้นงานซึ่งสามารถควบคุมความหนาแน่นให้สูงหรือต่ำได้ ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อน แต่อัตราการผลิตต่ำกว่าวิธี Unaxial Pressing และเครื่องมือมีราคาแพง

(c) Slip Casting เป็นกระบวนการที่เตรียมลักษณะเนื้องานเป็นสลิป ซึ่งแบ่งการขึ้นรูปเป็น 2 วิธี

- Solid Casting คือ การเทแบบโดยให้น้ำสลิปให้แข็งตัวอยู่ในแบบ โดยสารแขวนลอยจะมีความหนืดประมาณ 5-80 Poise เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความหนา รูปร่างซับซ้อน

- Drain Casting คือ การเทแบบ โดยมีการเทน้ำสลิปที่เหลื้อออกไป เมื่อได้ความหนาของชิ้นงานตามต้องการ โดยสารแขวนลอยจะมีความหนืดประมาณ 1-5 Poise เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความหนา รูปร่างซับซ้อน

การขึ้นรูปชิ้นงานตามกระบวนการ Slip Casting เป็นวิธีที่ง่าย และชิ้นส่วนอุปกรณ์น้อย

(d) Tape Casting เป็นกระบวนการที่เตรียมเนื้องานเหมือนกับกระบวนการ Slip Casting แต่ชิ้นงานที่ได้ มีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบ

(e) Jolleying เป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะก้นลึก เช่น ถ้วยชาม โดยการขึ้นรูปจากภายนอก ชิ้นงานจะวางอยู่บนแม่พิมพ์พลาสติกที่หมุนได้

(f) Jiggering เป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะแบน โดยมีแท่นโลหะไปสัมผัสกับเนื้องานซึ่งวางอยู่บนแม่พิมพ์พลาสติกที่หมุนได้

(g) Extrusion เป็นกระบวนการที่วัตถุดิบถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปภายใต้สภาวะของแรงอัดผ่านแม่พิมพ์ออกมาในรูปทรงที่ต้องการ วัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบนี้จะมีผงอนุภาค และสารเติมต่างๆ โดยมีความชื้น 18-25% เนื้อเซรามิกจะมีความเหนียวและยึดหยุ่น เกาะตัวกันเป็นก้อน ถ้าความชื้นมากเกินไปกว่านี้ชิ้นงานจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้

(h) Injection Moulding เป็นกระบวนการที่เนื้องานถูกแรงอันผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ที่เป็นระบบปิดมีข้อเสียคือ มีส่วนของสารยึดเกาะสูงซึ่งต้องกำจัดออกไป

2.6.4 การทำแห้งและกำจัดสารเติมแต่ง

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วอยู่ในลักษณะกึ่งเปื่อยกึ่งแห้ง เมื่อมีแรงมากระทำชิ้นงานจะเสียรูปทันที ดังนั้นควรทำให้ชิ้นงานแห้งสนิทก่อนซึ่งการทำให้แห้งนี้เพียงวางชิ้นงานไว้ในอุณหภูมิปกติ น้ำที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคจะระเหยออกไปสู่บรรยากาศ ทำให้อนุภาคนั้นชิดกันมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานแห้งและแข็งแรง แต่การทำให้แห้งนี้ควรป้องกันไม่ให้น้ำระเหยเร็วเกินไป เช่น ไม่ควรวางชิ้นงานบริเวณที่มีแสงแดดหรือมีลมพัดตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานโค้งงอหรือแตกร้าว การกำจัดสารเติมแต่งเป็นขั้นตอนที่ต้องระมัดระวังมาก เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อนรวมทั้งต้องใช้เวลาเป็นอย่างมากด้วย โดยบางครั้งชิ้นงานที่หนา มีขนาดใหญ่ รูปร่างซับซ้อน อาจต้องใช้เวลาเพื่อการกำจัดสารเติมเติมนานเป็นวัน หรือเป็นสัปดาห์ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้น และข้อบกพร่องนี้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น การบวม การแตกร้าว

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การกำจัดสารเติมแต่งจะเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อนซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิ 600-800°C โดยประมาณ เนื่องจากสารเติมที่ใช้เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และจะระเหิดกลายเป็นไอออกจากชิ้นงาน แต่มีข้อควรระวัง คือ การเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิดังกล่าว หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิไม่ควรเร็วเกินไปเนื่องจาก

1. ถ้าชิ้นงานมีความหนา จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ผิวด้านนอกกับผิวด้านใน ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ อีกประการหนึ่งคือ ผิวด้านนอกมีอุณหภูมิที่สูงกว่าสารเติมแต่งจึงระเหยออกไปได้เร็วกว่า ทำให้มีการหดตัวที่ผิวด้านนอกมากกว่าด้านใน ดังนั้นชิ้นงานจะโค้งงอได้
2. การที่สารเติมแต่งเกิดการหลอมละลายและกลายเป็นไอ แต่ไม่สามารถระเหยออกจากชิ้นงานได้ เนื่องจาก บริเวณผิวเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาค ไปแล้วทำให้ไอเหล่านั้นถูกปิดกั้นเป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการบวมหรือพอง

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้ผลกระทบดังที่กล่าวมา ดังนั้นจึงไม่ควรให้มีการเพิ่มอุณหภูมิเร็วเกินไป แต่ขณะเดียวกันก็ไม่ควรช้าเกินไป เนื่องจากเป็นการเสียเวลาและเพิ่มต้นทุนการผลิต (เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าเสื่อมราคาของเตาเผา) อีกด้วย แต่เวลาที่เหมาะสมนั้นไม่สามารถกำหนดได้เนื่องจากมีปัจจัย

ที่เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นขั้นตอนการกำจัดสารเคมีจะต้องศึกษาและทดลองให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ผลิตออกมา [29]

2.6.5 การอบเชื่อม (Sintering)

กระบวนการอบเชื่อม คือ การนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาอบในเตาเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ ซึ่งอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการอบเชื่อมจะเป็นครั้งหนึ่ง หรือเป็นสองในสามของอุณหภูมิหลอมเหลวของผงเซรามิกชนิดนั้นๆ เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งผลจากการอบเชื่อมนี้จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีความหนาแน่นมากขึ้น

กระบวนการอบเชื่อมนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยมีแรงขับ (Driving Force) คือ การลดพลังงานอิสระโดยรวมของชิ้นงาน (ΔG_T) ให้ลดต่ำลง โดยที่

$$\Delta G_T = \Delta G_v + \Delta G_b + \Delta G_s \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔG_T = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระโดยรวม

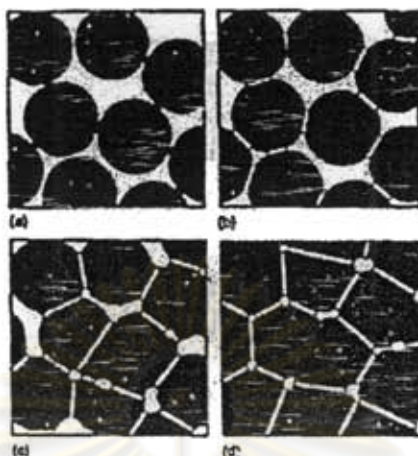
ΔG_v = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับปริมาตร

ΔG_b = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับขอบเขต

ΔG_s = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิว

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระโดยรวมนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่ผิว (ΔG_s) เป็นหลัก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแรงขับเคลื่อนสำหรับกระบวนการอบเชื่อม คือ พลังงานอิสระที่ผิวจะถูกทำให้ลดลง โดยการพยายามลดพื้นที่ผิวของอนุภาคให้น้อยลง เป็นผลให้อนุภาคเกิดการเชื่อมติดกัน

กระบวนการอบเชื่อม สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้โดยอาศัยพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผงเซรามิกเหล่านั้น ซึ่งเริ่มจากการที่มีอนุภาคแต่ละอนุภาคเชื่อมติดกันจนกลายเป็น โครงสร้างแบบหลายผลึก (Polycrystalline Structure) การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.10 [28]



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอบเชื่อม [28]

- (a) ระยะต้น (Initial Stage) เป็นช่วงที่อนุภาคจะเชื่อมติดกัน โดยเริ่มจากการที่อนุภาคที่ชิดกันมีจุดสัมผัสกัน เกิดการถ่ายเทมวลซึ่งส่งผลให้เกิดขอบรอยต่อขึ้นมาระหว่างอนุภาค เรียกว่า “Neck”
- (b) ระยะกลาง (Intermediate Stage) เป็นช่วงที่ Neck มีการขยายใหญ่ขึ้น และส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกรนจะมีขนาดใหญ่อขึ้นปริมาณรูพรุนจะลดลง
- (c) ระยะสุดท้าย (Final Stage) จำนวนรูพรุนจะลดน้อยลง โดยที่รูพรุนจะกระจายเป็นรูพรุนเดี่ยว

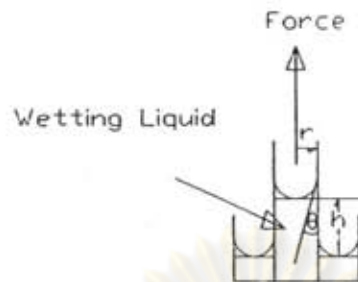
2.7 การทดสอบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเซรามิก

2.7.1 การทดสอบหาขนาดรูพรุน

ในการหาขนาดรูพรุนของชิ้นงาน สามารถใช้เทคนิคทดสอบหาขนาดรูพรุนของชิ้นงานได้ดังนี้

2.7.1.1 วิธี Bubble Point

เทคนิคนี้เป็นการวัดขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในชิ้นงาน โดยใช้หลักการของ Capillary โดยให้รูพรุนเปรียบเสมือนกับหลอด Capillary เมื่อจุ่มลงในของเหลว ของเหลวจะไหลเข้าไปตามแรงดึงผิว และเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ จะกระทั่งเกิดแรงสมดุลระหว่างแรงดึงผิวกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.11 หลักการของ Capillary Action [30]

เทคนิคนี้เริ่มต้นด้วยการที่เชื้อแผ่นนั้นจะต้องแช่อยู่ในของเหลว และต้องแน่ใจว่าของเหลวนั้นเข้าไปอยู่ในรูพรุนด้วย โดยของเหลวนี้จะต้องสามารถเปียกกับเชื้อแผ่นได้ดี ถ้าเชื้อแผ่นนั้นเป็นชนิด Hydrophilic เช่น เชื้อแผ่นอะลูมินา จะใช้น้ำ แต่ถ้าเชื้อแผ่นนั้นเป็นชนิด Hydrophobic มักนิยมใช้ Ethanol หรือ Iso-Propanol

$$2\pi r\gamma\cos\theta = \pi r^2(h\rho g) \quad (2.4)$$

เมื่อ	γ	=	แรงตึงผิวของของเหลว
	θ	=	มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับผนังหลอด Capillary
	r	=	รัศมีของหลอด Capillary
	h	=	ความสูงของของเหลวภายในหลอด Capillary
	ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว
	g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก

การวัดขนาดรูพรุนมีวิธีการ คือ เชื้อแผ่นที่เปียกด้วยของเหลวแล้วปิดปลายด้านหนึ่งไว้ จากนั้นจะใช้แรงดันผ่านเข้าไปทางปลายอีกด้านหนึ่งโดยเพิ่มความดันไปเรื่อย ๆ เพื่อวัดค่าความดันที่สามารถดันของเหลวออกจากรูพรุนได้ โดยสังเกตความดันที่ทำให้มีฟองอากาศออกมา

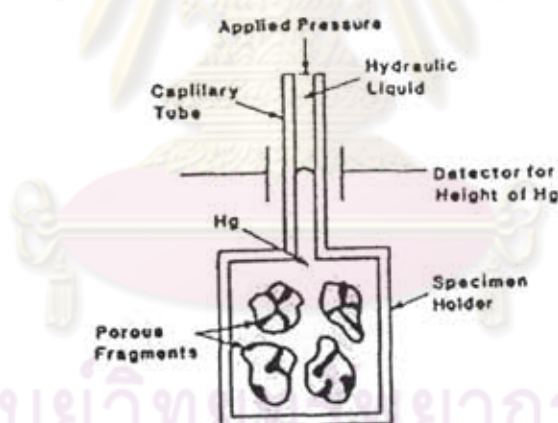
ขนาดของรูพรุนสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นผลมาจากสมการที่ 2.4 ซึ่งสำหรับเทคนิคนี้ของเหลวที่ใช้ต้องเปียกกับเชื้อแผ่นดังนั้นวิธีการวัดขนาดรูพรุนแบบนี้สามารถทดสอบได้ด้วยตัวเอง โดยรายละเอียดเป็นไปตาม ASTM F316-76 ซึ่งจะวัดได้เฉพาะรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในชิ้นงานเท่านั้น รวมทั้งไม่สามารถทราบปริมาณรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนได้

$$r = 2\gamma\cos\theta / P \quad (P = h\rho g) \quad (2.5)$$

2.7.1.2 วิธีการใช้ปรอท

เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี Bubble Point โดยการใส่ปรอทแทนของเหลวอื่น ซึ่งในการวัดขนาดและการกระจายขนาดของรูพรุนอยู่บนพื้นฐานของการเพิ่มความดันให้กับปรอท ซึ่งจะมีความดันระดับหนึ่งที่สามารถดันปรอทเข้าไปอยู่ในรูพรุนของชิ้นงานได้ (โดยชิ้นงานนั้นผ่านการดูดอากาศออกแล้ว อยู่ในระดับ 10^{-2} torr)

เครื่องมือวัดขนาดรูพรุนแบบนี้ จะมีส่วนประกอบสำคัญคืออุปกรณ์สำหรับใส่ชิ้นงานซึ่งเรียกว่า “Penetrometer” ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งหลังจากใส่ชิ้นงานเข้าไปแล้วจึงเริ่มทำการวัดขนาดรูพรุน โดยการเพิ่มความดันเพื่อให้ปรอทเข้าไปอยู่ในรูพรุน ซึ่งที่บริเวณก้านของ Penetrometer จะมีการเคลื่อนสารบางอย่างไว้เพื่อบ่งบอกถึงปริมาณปรอทที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใส่ปรอทกับปริมาณปรอทที่เข้าไปในรูพรุน คือการกระจายขนาดของรูพรุน



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Penetrometer [25]

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับขนาดรูพรุนนั้นอธิบายได้โดยใช้สมการที่ 2.6 เช่นเดียวกับเทคนิค Bubble Point ;

$$r = 2\gamma \cos\theta / P \quad (2.6)$$

เมื่อ γ = แรงดึงผิวของปรอทซึ่งมีค่าเท่ากับ 485.0 Dyne/cm

θ = มุมสัมผัสระหว่างปรอทกับชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 130 องศา

ดังนั้น

$$r = 180 / P$$

เมื่อ r = รัศมีของขนาดรูพรุน (μm)

P = ความดันที่ดันปรอทเข้าไปในรูพรุน (psi)

จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงวิธีการวัดขนาดรูพรุนทั้ง 2 วิธีนั้น จะเห็นว่าต่างเป็นวิธีการที่ใช้หลักการในการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเหมือนกันคือใช้ความดันแก๊สเป็นเกณฑ์ โดยความดันที่ใช้เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดรูพรุน ดังนั้นถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กก็ต้องใช้ความดันค่อนข้างสูงจึงจัดเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับเนื้อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คืออยู่ในระดับไมโครฟิลเตรชันเท่านั้น

2.7.2 การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน

การทดสอบเพื่อหาปริมาตรรูพรุนนั้น ที่จะกล่าวถึงมี 2 วิธีคือ

2.7.2.1 การแทนที่ด้วยน้ำ

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทำได้โดยอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยาก กล่าวคือเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของชิ้นงานระหว่าง น้ำหนักของชิ้นงานที่แห้ง น้ำหนัก (ในน้ำ) ของชิ้นงานที่อุ่มตัวด้วยน้ำและน้ำหนัก (ในอากาศ) ของชิ้นงานที่อุ่มตัวด้วยน้ำ

วิธีการแทนที่ด้วยน้ำนี้สามารถบอกถึงปริมาตรรูพรุนเปิด และค่าความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ของชิ้นงานได้โดยรายละเอียดเป็นไปตาม ASTM C-373

2.7.2.2 การคำนวณจากปริมาณปรอท

การหาปริมาตรรูพรุนแบบนี้เป็นการคำนวณจากปริมาณปรอททั้งหมดที่เข้าไปอยู่ในรูพรุน [8] โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.7

$$\%TP = (V_s P_t / (1 + V_s P_t)) \times 100 \quad (2.7)$$

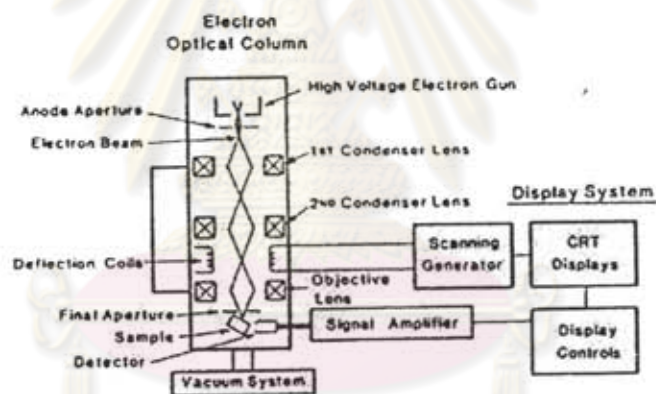
เมื่อ TP = ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดในเนื้อแผ่น (%)

V_s = Specific Volume of Pore (cm^3/g) ซึ่งในที่นี้คือปริมาตรปรอทที่เข้าไปอยู่ในรูพรุน

P_t = ความหนาแน่นตามทฤษฎีของผงอะลูมินาซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.98 g/cm^3

2.7.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

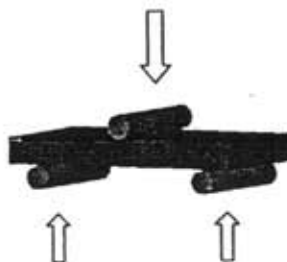
การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเยื่อแผ่น เป็นการศึกษาลักษณะรูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy; SEM) เครื่อง SEM มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.13 [25] คืออิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้หลุดออก และวิ่งด้วยความเร็วสูงผ่าน Electro Magnetic Lens ชุดต่าง ๆ ภายใน Column ซึ่งทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กและโฟกัสลำอิเล็กตรอนวิ่งกราดบนผิวของตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงชนกับผิวตัวอย่าง จะให้สัญญาณออกมาหลายชนิด เช่น Secondary Electron, Backscattered Electron และ X-Rays ซึ่งสัญญาณแสงที่ได้จะถูกจับด้วย Detector จากนั้นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ จะทำหน้าที่เปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าเกิดเป็นภาพที่จอร์ับภาพ (Cathode Ray Tube)



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [25]

2.7.4 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล

โดยการทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก แบบ 3 - Point Flexure [31] ดังรูปข้างล่าง



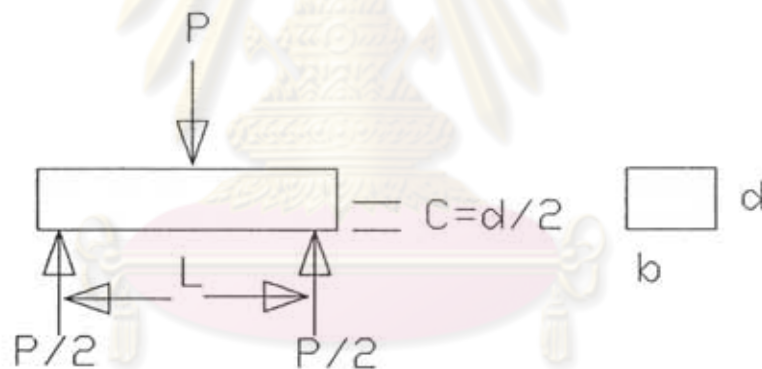
รูปที่ 2.14 การทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก

ค่า Flexural Strength ของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าคำนวณได้จากสูตร

โดยที่	S	=	MC/I
	M	=	โมเมนต์ (Moment)
	C	=	ระยะจากแกนกลางถึง Tensile Surface
	I	=	Moment of Inertia

กรณีชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่า I มีค่าเท่ากับ $bd^3/12$ และ C มีค่าเท่ากับ $d/2$ โดยที่ d และ b คือ ความหนาและความกว้างของชิ้นงาน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการทดสอบ แบบ 3 - Point Flexure ของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้สูตรคำนวณ Strength ดังนี้



รูปที่ 2.15 แรงที่กระทำบนตัวอย่างขณะทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก [31]

$$M = P(L/2) \quad , \quad I = bd^3/12$$

$$S = Q_{3-PT} = MOR = MC/I = 3PL/2bd^2$$

$$Q = 3PL/2bd^2$$

โดยที่	Q	คือ	Flexural Strength, MPa
	P	คือ	Fracture Load, N
	L	คือ	Fixture Outer Span, mm
	b	คือ	Specimen Width, mm
	d	คือ	Specimen Height, parallel to the direction of test force, mm

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการผลิตแผ่นกรองเซรามิกให้ได้ขนาดรูพรุน 0.1 – 10 μm จากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ รวมทั้งทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ เพื่อให้ได้เทคโนโลยีในการผลิตตัวกรองสำหรับใช้กรองฝุ่นจากแก๊สที่มีอนุภาคสูง ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ 4 ส่วนด้วยกันคือ

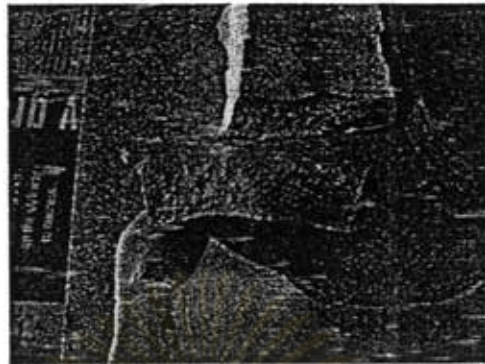
1. การผลิตแผ่นกรองเซรามิก
2. การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้
3. ทดสอบประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้
4. เปรียบเทียบแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้กับแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ผลิตมาก่อน

3.1 การผลิตแผ่นกรองเซรามิก

เนื่องจากการผลิตแผ่นกรองในระยะที่ 1 ซึ่งขึ้นรูปโดยการใช้เส้นเอ็นขนาดเล็กตัดดิน PBA ตามแนวหน้าตัดให้มีขนาดความหนาประมาณ 10 mm นั้น ได้ขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าช่วงที่ต้องการ คือ 0.1 – 10 μm และมีปริมาณรูพรุนน้อยคือไม่ถึง 40 % ซึ่งไม่เหมาะสมกับความเป็นตัวกรอง ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกใหม่ โดยเบื้องต้นนั้นใช้วิธีการลองผลิตแผ่นกรองขึ้นมาด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้ คือ

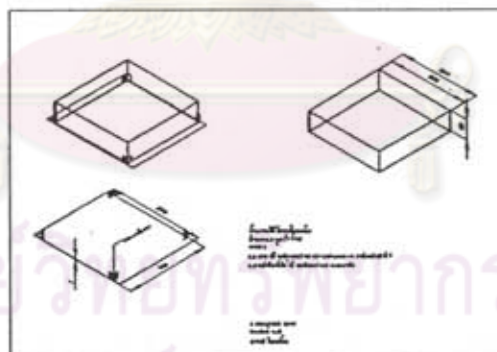
3.1.1 ผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm

โดยตัดฟองน้ำมีขนาดความกว้าง \times ความยาว \times ความหนา เท่ากับ 12 \times 12 \times 1.5 cm เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วนำไปจุ่มลงในส่วนผสมของดิน PBA และน้ำ ในอัตราส่วน 50 : 50 แล้วนำไปวางไว้บนตะแกรงภายในห้องที่อากาศนิ่ง เพื่อให้แผ่นกรองเกิดการแห้ง พบว่าแผ่นกรองเกิดการหดตัวทุกๆ ด้านประมาณ 30 % และเกิดการโก่งงอเสียรูปร่าง และบางแผ่นเกิดการแตกร้าว ซึ่งเมื่อนำไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 $^{\circ}\text{C}$ แผ่นกรองจะมีรูพรุนเกิดขึ้นด้านในของแผ่นตามโครงสร้างของฟองน้ำซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ส่วนด้านบนและด้านล่างไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นหรือไม่ แต่จะมองเห็นน้ำดิน PBA เคลือบปิดรูพรุนซึ่งเป็นโครงสร้างของฟองน้ำอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ลักษณะรูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำเมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1000 °C

เนื่องจากโครงสร้างของแผ่นกรองโค้งงอเสียรูป จึงได้ออกแบบแม่พิมพ์เพื่อเป็นตัวบังคับให้ฟองน้ำคงรูปเดิมเอาไว้ แม่พิมพ์สร้างด้วยวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้ ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากการแห้งของแผ่นกรองเซรามิกโดยธรรมชาติใช้เวลาประมาณ 15 วันจึงสามารถทำการเผาชิ้นงานได้ และได้ทำการผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีส่วนผสมของดิน PBA และน้ำเท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก จำนวน 6 แผ่นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250°C พบว่าชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงมาก ไม่สามารถขัดตกแต่งได้



รูปที่ 3.2 แบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิก

3.1.2 การผลิตแผ่นกรองที่อัตราส่วนผสมดิน PBA : น้ำ ต่าง ๆ กัน

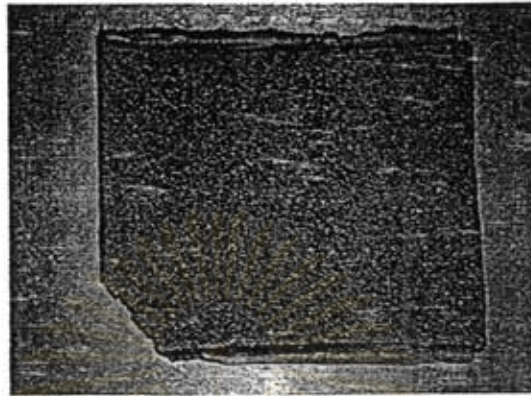
การผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm จากหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ดิน PBA สุกตัว ทำให้ชิ้นงานแข็งไม่สามารถที่จะขัดตกแต่งชิ้นงานได้ตามต้องการ จึงได้ผลิตแผ่นกรองขึ้นมาใหม่ทั้งหมดจำนวน 6 แผ่นโดยเปลี่ยนแปลงส่วนผสมดังนี้

1. ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 60 : 40
2. ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 50 : 50
3. ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60

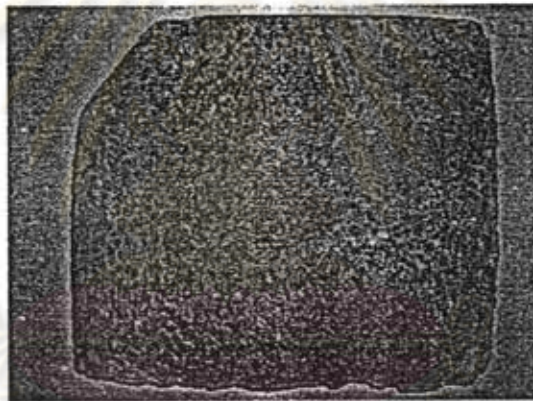
การผลิตแผ่นกรองที่มีความหนา 1.5 cm จากหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบข้อจำกัดของการผลิตแผ่นกรองพบว่าแผ่นกรองที่มีส่วนผสมของดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60 มีความเหมาะสมสำหรับความเป็นตัวกรองมากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ คือ ที่อัตราส่วนผสม ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 60 : 40 และ 50 : 50 เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนซึ่งเกิดจากฟองน้ำและน้ำหนักที่เบากว่า ซึ่งแผ่นกรองที่ส่วนผสมดังกล่าวนี้มีความแข็งแรงพอที่จะใช้เป็นตัวกรองจากการพิจารณาอย่างคร่าวๆ โดยบีบแผ่นกรองเซรามิกด้วยนิ้วมือ และนอกจากนี้ยังพบว่าส่วนผสมที่ตกตะกอนเองนั้นมีความพรุนเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงได้นำแผ่นกรองนี้ไปทำการทดสอบเพื่อหาขนาดรูพรุนเปิดที่เกิดขึ้นจากผลของการตกตะกอน และทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการ SEM เนื่องจากขนาดของชั้นรองรับนั้นสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงไม่ได้ทำการทดสอบ



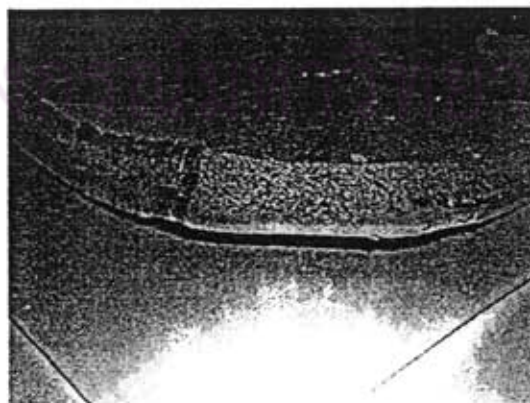
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ด้านบน

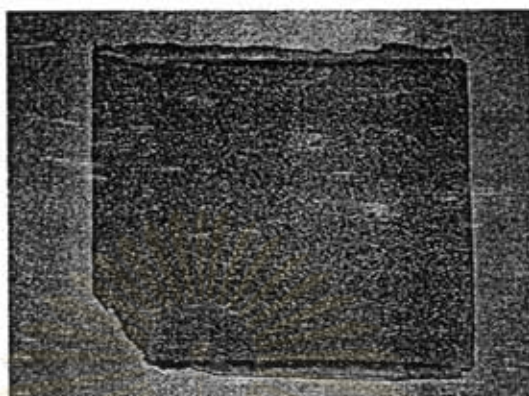


(ข) ด้านล่าง

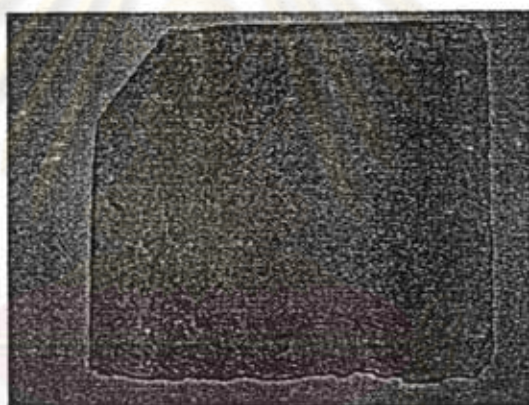


(ค) ด้านข้าง

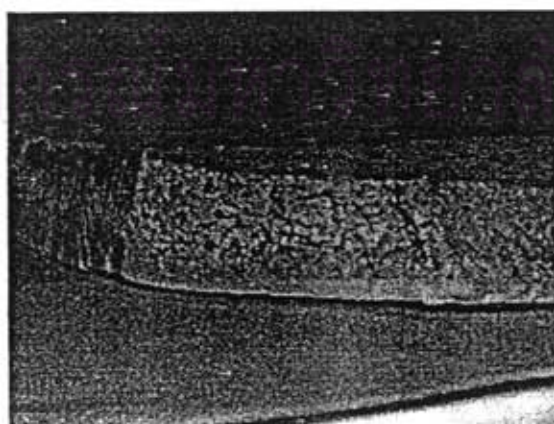
รูปที่ 3.3 แผ่นกรองเซรามิกที่อัตราส่วนผสม 40 : 60 เตาที่อุณหภูมิ 950 ° C.



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านล่าง



(ค) ด้านข้าง

รูปที่ 3.4 แผ่นกรองเซรามิกที่อัตราส่วนผสม 40 : 60 เเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

3.1.3 การทำให้แห้งและการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิต่างกัน

แผ่นกรองเซรามิกที่ผ่านการขึ้นรูปจะถูกเก็บไว้ในบริเวณที่มีอากาศนิ่ง ณ อุณหภูมิปกติ เพื่อให้น้ำระเหยออกไปจากแผ่นกรองเซรามิก จนกระทั่งแห้งสนิทจึงจะนำมาเผาให้เกิดความคงตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตแผ่นกรองเซรามิกขึ้นมาโดยเงื่อนไขที่แตกต่างกันกล่าวคือ เมื่อได้ทำการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกแล้วก็จะทำการเผาในเตาไฟฟ้า ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C และ 900 °C และ 1250 °C และเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดจะทำการรักษาอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการผลิตที่สำคัญ ดังนี้

1. เตรียมน้ำดิน (ดิน PBA : น้ำ / 40 : 60)
2. ผสมให้เข้ากัน โดยสังเกตได้จากเนื้อของเหลวของส่วนผสมมีสีกลมกลืนกัน และไม่มีอากาศกอนของดิน PBA ที่กั้นถึงผสม
3. นำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้ว มาใส่ลงแบบพิมพ์ซึ่งมีแผ่นฟองน้ำเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดรูพรุนวางอยู่ใน ภายใน จนท่วมแผ่นฟองน้ำ
4. สำหรับแผ่นฟองน้ำที่วางอยู่ในแบบพิมพ์ จะต้องให้อุ่มน้ำส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นทั่วทั้งแผ่น โดยอาจจุ่มแผ่นฟองน้ำในน้ำส่วนผสม แล้วทำการขยำแผ่นฟองน้ำในน้ำส่วนผสม เพื่อไล่อากาศและให้น้ำส่วนผสมเข้าไปทั่วทั้งแผ่นก่อนวางลงในแบบพิมพ์
5. นำแบบพิมพ์ที่ได้เทน้ำส่วนผสมท่วมแผ่นฟองน้ำแล้ววางบนพื้นที่ได้ระดับ ทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 80 ชั่วโมง
6. นำแบบพิมพ์ซึ่งผ่านข้อ 5 มาเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 68 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำแบบพิมพ์ออกจากตู้อบแล้วนำแผ่นกรองไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 °C
8. เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง (ใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง) นำชิ้นงานมาขัดด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานซึ่งในขณะที่ขัดจะต้องใช้น้ำเป็นตัวชะล้างผิวส่วนที่ขัดออกไปและเป็น ไปด้วยความสม่ำเสมอ จนผิวของแผ่นกรองเซรามิกทุกด้าน โผล่ให้เห็นรูพรุนที่เกิดจากโครงสร้างของแผ่นฟองน้ำ ซึ่งโดนเผาออกไป และเรียบเสมอกันในแต่ละด้าน ทุก ๆ ด้าน
9. นำแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ผ่านการขัดผิวแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 68 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเมื่อแห้งแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C และ 900 °C และ 1250

3.2 การทดสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิก

3.2.1 ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน

ใช้หลักการของวิธีการวัดจากปริมาณปรอทโดยใช้เครื่อง Mercury Porosimetry เพื่อหาขนาดรูพรุนเฉลี่ย การกระจายตัวของรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิก [28]

3.2.2 การวิเคราะห์ความหนาและโครงสร้างจุลภาค

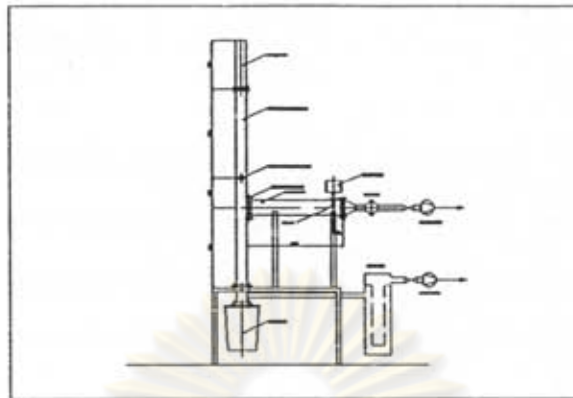
ในการวิเคราะห์ความหนาจะใช้เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3.2.3 การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิก

ในการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิกจะเป็นการทดสอบแบบ Flexural Stength ของแผ่นกรองเซรามิก แบบ 3 - Point Flexure โดยนำมามาตรฐาน มอก.558 เล่ม 8 - 2528 มาประยุกต์ใช้ ซึ่งชิ้นทดสอบมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดประมาณ $10 \times 10 \times 100$ มิลลิเมตร และทำการทดสอบ โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.3 การปรับปรุงชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก

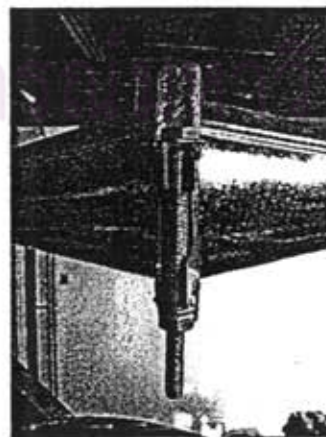
เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าชุดทดสอบประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นมีข้อบกพร่องที่ต้องทำการแก้ไข เช่น ไม่สามารถปรับอัตราการไหลได้เมื่อปฏิบัติงานโดยลำพัง โดย Chamber ที่ใช้เป็นตัวกระจายฝุ่นมีการรั่วไหลของฝุ่นออกมาข้างนอก และ Housing ที่จับยึดแผ่นกรองเซรามิกมีความไม่เหมาะสม เป็นต้นว่า ประกอบแผ่นกรองเข้าออกสำหรับทดสอบไม่สะดวก และอาจมีการรั่วเกิดขึ้น นอกจากนี้แล้ว Housing ของกระดวยกรองสำหรับใส่กระดวยกรองเข้าออกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ มีความยากลำบากในการทำงาน ฝุ่นมีการตกค้างอยู่หน้าตัวกรองเมื่อทำความสะอาด ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงชุดทดสอบโดยให้มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดทดสอบของ P. Gäng ประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3.5 – 3.7



รูปที่ 3.5 แบบชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกของ P. Gäng ประเทศเยอรมัน



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จับยึดหน้าแปลน Backup Filter

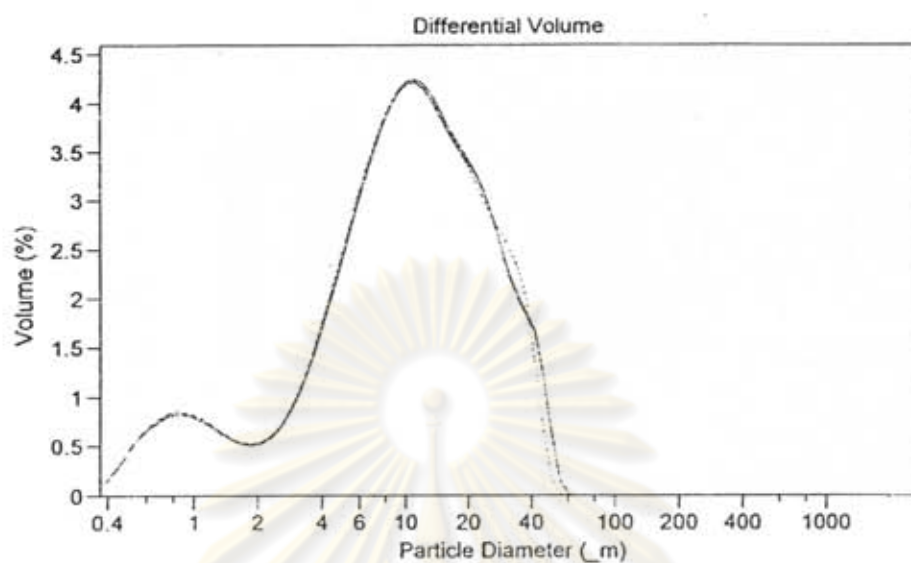
3.4 การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น

ฝุ่นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นฝุ่นเถ้าลอยถิกไนต์ (Fly Ash) ได้รับความอนุเคราะห์จาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1 สำหรับการแจกแจงขนาดของ ฝุ่น (Particle Size Distribution) ทำการตรวจวัดโดยเครื่องวัดขนาดอนุภาคยี่ห้อ Particle Coulter LS230 โดยมีการแจกแจงขนาดฝุ่นดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $8.81 \mu\text{m}$ ดัง รูปที่ 3.9

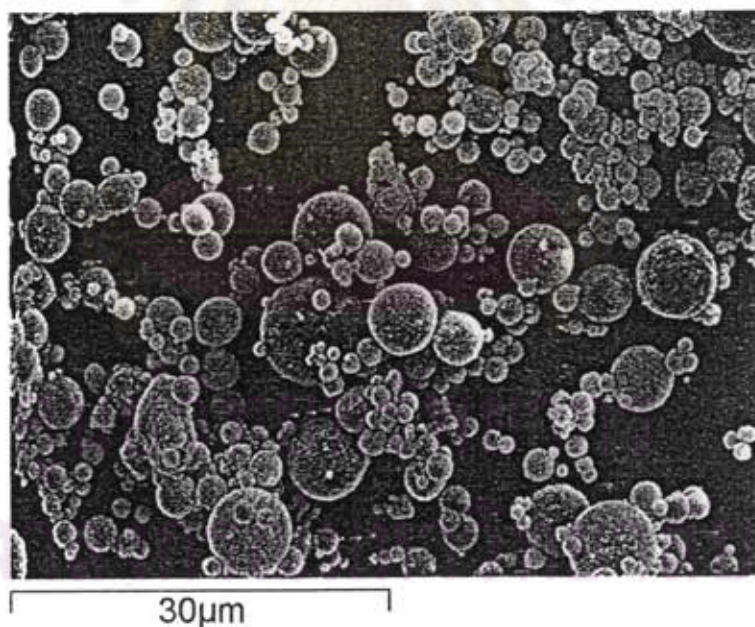
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของฝุ่นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง

องค์ประกอบของฝุ่น	เปอร์เซ็นต์ (%wt)
SiO ₂	48.6
Al ₂ O ₃	25.9
Fe ₂ O ₃	10.3
CaO	4.21
MgO	1.7
Na ₂ O	0.76
K ₂ O	2.26
TiO ₂	0.45
SO ₃	5.03
P ₂ O ₅	0.075
อื่นๆ	0.715
รวม	100

ที่มา: โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

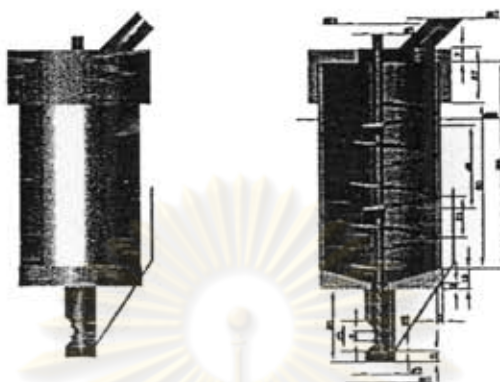


รูปที่ 3.8 การแจกแจงขนาดอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายอนุภาคฝุ่นเต้าลอบของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

เนื่องจากชุดป้อนฝุ่นมีข้อบกพร่องที่ต้องทำการแก้ไข เช่น แรงบิดของมอเตอร์น้อยเกินไป ทำให้ชุดป้อนฝุ่นหยุดหมุนในบางช่วงของการทำงาน ฝุ่นที่ป้อนออกมาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากช่องทางออกของชุดป้อนฝุ่นมีช่องว่างมากเกินไป จึงได้ทำการปรับปรุงใหม่เพื่อให้สามารถทำงานได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 3.10 – 3.11



รูปที่ 3.10 การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น



รูปที่ 3.11 ชุดป้อนฝุ่นที่จัดสร้างขึ้นใหม่

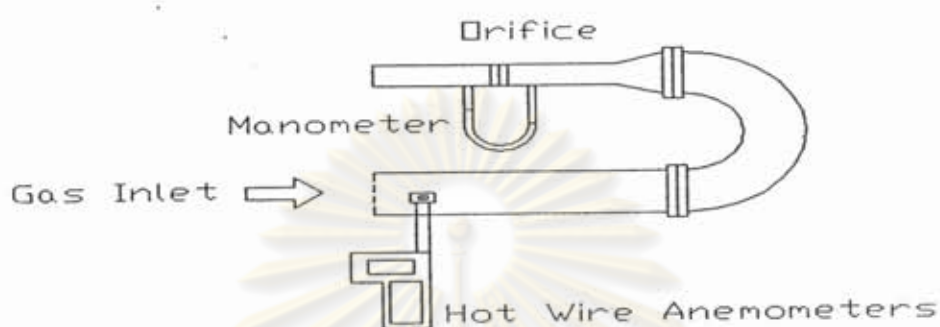
3.5 การสอบเทียบชุดทดลองและชุดป้อนฝุ่น

สำหรับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้นมานั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการสอบเทียบ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำเชื่อถือ ซึ่งในการสอบเทียบชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก และชุดป้อนฝุ่นมีรายละเอียด ดังนี้

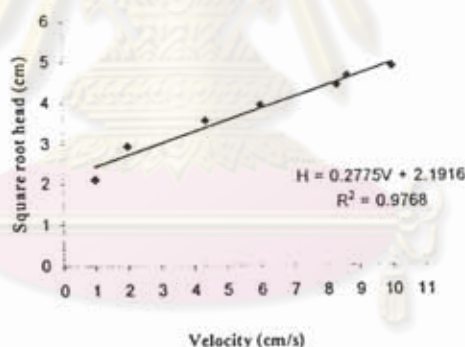
3.5.1 มาตรฐานอัตราการไหลแบบออริฟิซ

การสอบเทียบมาตรฐานอัตราการไหลแบบออริฟิซ จะหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านกับความดันลดคร่อมแผ่นออริฟิซ โดยในการสอบเทียบจะใช้มาตรฐานความเร็วมแบบขดลวดร้อน (Hot Wire Anemometer) Model HTA 4200 ทำการวัดความเร็วอากาศภายในท่อ

เทียบกับความดันที่แสดงผลออกมาวิธีการเป็นดังรูปที่ 3.12 ผลได้ตามมาตรฐานความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ เป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 การสอบเทียบมาตรอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ



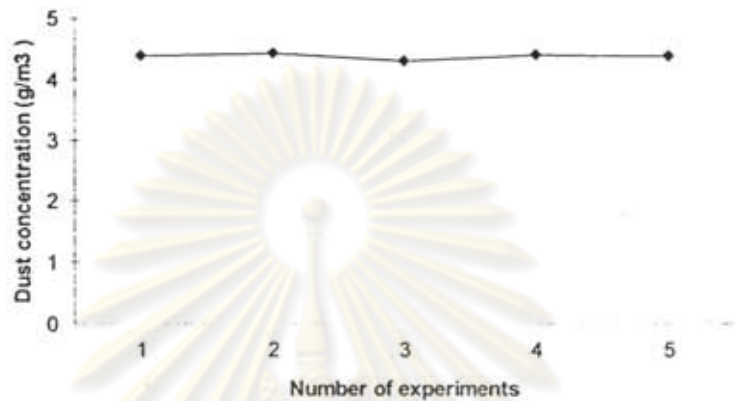
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรากที่สองของเฮดความดันแตกต่างภายในมาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ

จากรูปที่ 3.17 กราฟที่ได้ใช้สำหรับการหาค่าความเร็วภายในระบบ โดยความเร็วจะแปรผันตามรากที่สองของเฮด (Head) น้ำในมาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิซ เป็นไปตามความสัมพันธ์ $H = 0.2775V + 2.1916$

3.5.2 ชุดป้อนฝุ่น

ในการสอบเทียบชุดป้อนฝุ่นได้ทำการปรับสถานะตามเงื่อนไขที่จะทำการทดลองจริงที่อัตราการกรอง 3 cm/s ก่อนป้อนฝุ่นเข้าสู่ระบบ โดยใช้กระดาษกรองในการกรองแทนตัวกรองเซรามิก ระยะเวลาใน

การกรอง 300 วินาที ได้เป็นค่าความเข้มข้นฝุ่นทางเข้า ในการสอบเทียบจะทำการทดลอง 5 ครั้งนำค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ได้มาเฉลี่ยได้ค่าความเข้มข้นฝุ่นทางเข้าเป็นดังรูปที่ 3.14

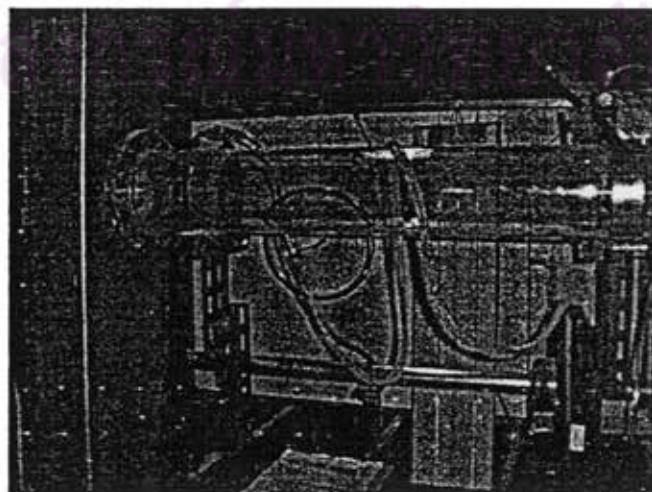


รูปที่ 3.14 ความเข้มข้นฝุ่นที่ได้จากเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่

จากรูปที่ 3.14 ความเข้มข้นฝุ่นที่คำนวณ ได้จากการเก็บตัวอย่างทั้ง 5 ครั้งนำมาเฉลี่ยค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่ได้เท่ากับ 4.3805 g/m^3

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิก

โดยนำแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ไปติดตั้งกับชุดทดสอบ ดังรูปที่ 3.15-3.17



รูปที่ 3.15 ชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก



รูปที่ 3.16 การติดตั้งเครื่องมือบันทึกข้อมูลเข้ากับชุดทดสอบ



รูปที่ 3.17 การติดตั้งเครื่องมือชุดป้อนฝุ่นเข้ากับชุดทดสอบ

การทำงานเริ่มจากป้อนฝุ่นจากชุดป้อนฝุ่นเข้าสู่ชุดทดสอบ โดยติดตั้งไว้ทางด้านบนของ Chamber ฝุ่นจะตกลงมาทางปล่องของชุดทดสอบและกระจายลงมาทางด้านล่าง ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ฝุ่นเข้าสู่ชุดทดสอบในลักษณะของการกรอง เมื่อความดันจากการก่อดั้วของฝุ่นถึงค่าที่ตั้งไว้ ชุดทำความสะอาดแบบพัลส์ จะส่งลมความดันสูงจากถังเก็บออกมาทางก้านท่อพัลส์สวนทางกับทิศทางการกรองฝุ่น ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเปิดของแผ่นกรองจะถูกจับเก็บด้วยกระดาษกรอง หลังจากการทดลองเสร็จสิ้นจะนำกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนัก แล้วห้กออกด้วยน้ำหนักกระดาษกรองก่อนใช้ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ และใช้เปรียบเทียบกับแผ่นกรองที่เคยผลิตมาก่อน ซึ่งประสิทธิภาพการกรองคำนวณตามสมการที่ 3.1

$$\% \text{ ประสิทธิภาพการกรอง} = \left(\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

โดย

$$C_{out} = \frac{\Delta W}{Qt} \quad (3.2)$$

$$Q = AV \quad (3.3)$$

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (3.4)$$

เมื่อ	C_{in}	=	ความเข้มข้นฝุ่นเข้าสู่ระบบ (g/m^3)
	C_{out}	=	ความเข้มข้นฝุ่นออกจากระบบ (g/m^3)
	ΔW	=	ผลต่างของน้ำหนักกระดาศกรองก่อนและหลังการกรอง (g)
	Q	=	อัตราการกรอง (m^3/s)
	t	=	เวลาที่ใช้ในการกรอง (s)
	A	=	พื้นที่การกรอง (m^2)
	V	=	ความเร็วในการกรอง (m/s)
	W_1	=	น้ำหนักกระดาศกรองก่อนการกรอง (g)
	W_2	=	น้ำหนักกระดาศกรองหลังการกรอง (g)

ส่วนประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวกรองสามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\eta = \frac{\Delta p_d - \Delta p_a}{\Delta p_d - \Delta p_o} \quad (3.5)$$

เมื่อ	η	=	ประสิทธิภาพการทำความสะอาด
	Δp_d	=	ความดันลดก่อนทำความสะอาด (มีปริมาณฝุ่นเกาะ)
	Δp_a	=	ความดันลดหลังทำความสะอาด
	Δp_o	=	ความดันลดสภาวะเริ่มต้น

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิก

4.1.1 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล

การแจกแจงขนาดรูพรุนและปริมาณความพรุนของแผ่นกรองเซรามิกทำการตรวจวัดโดยวิธี Mercury Porosimetry โดยใช้หลักการอัดปรอทเข้าไปแทนที่รูพรุนภายในของตัวกรองแล้วคำนวณโดยใช้สมการของ Washburn จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C ค่าปริมาณความพรุนภายในแผ่นกรองและขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะสูงขึ้น โดยมีค่าปริมาณความพรุน 62.9 % และ 73.7 % ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.01 μm และ 0.162 μm ตามลำดับ แต่เมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1250°C ซึ่งเป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงสุดของแผ่นกรอง กลับทำให้ค่าปริมาณความพรุนภายในแผ่นกรองต่ำคือ 23.5 % แต่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยสูงคือ 27.06 μm ผลการทดลองที่ได้นี้มีความแตกต่างจากแผ่นกรองที่ผลิตในระยะที่ 1 [32] คือที่อุณหภูมิเผาแผ่นกรอง 700°C มีปริมาณความพรุน 27.32 % ซึ่งสูงกว่าการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 900°C ที่มีปริมาณความพรุน 20.47 % อีกทั้งการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 700°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.067 μm ซึ่งใหญ่กว่าของแผ่นกรองเผาที่อุณหภูมิ 900°C ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 0.042 μm ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นรูปที่ไม่เหมือนกัน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น

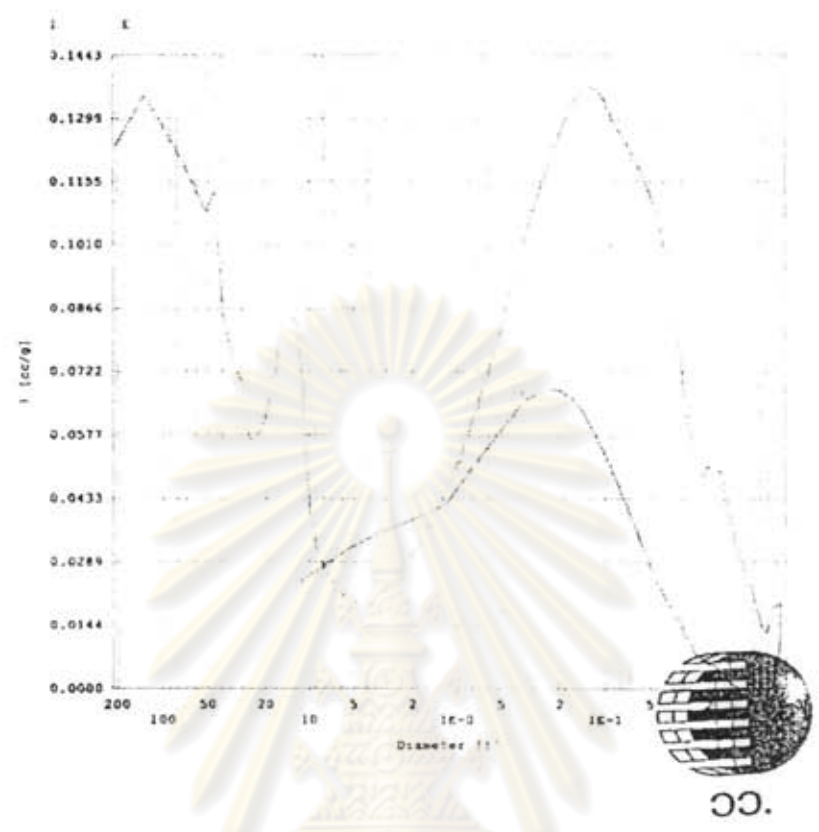
คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิก	อุณหภูมิการเผา(°C)		
	700	900	1250
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (μm)	0.354	0.959	27.06
ความพรุน (%)	62.915	73.724	23.461

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1

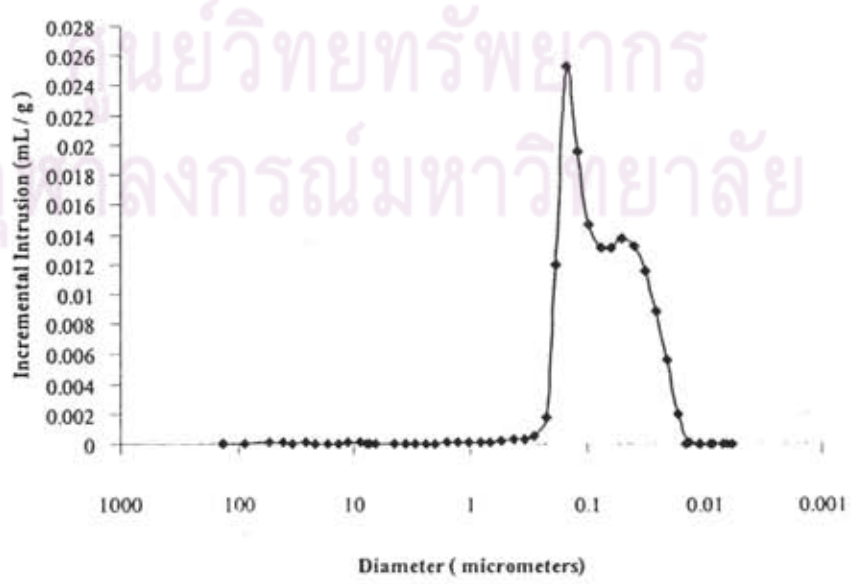
คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิก	อุณหภูมิการเผา(°C)	
	700	900
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (μm)	0.067	0.042
ความพรุน (%)	27.32	20.47

หมายเหตุ ครัวจวด โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

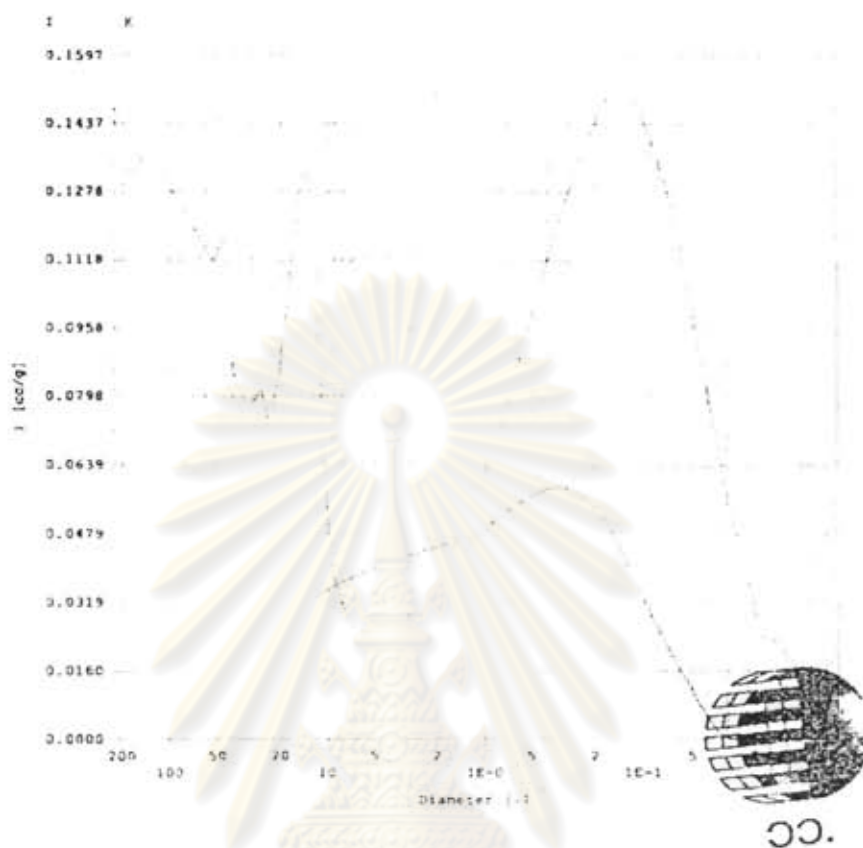
นอกจากนี้จากรูปที่ 4.1 การแจกแจงขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C จะกระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.006 ถึง 133.164 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.354 μm มากที่สุด ขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C กระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.007 ถึง 213.233 μm ปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.959 μm ดังรูปที่ 4.3 ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1250°C ขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกกระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.007 ถึง 155.560 μm ปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.06 μm มากที่สุด ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแตกต่างจากการผลิตแผ่นกรองเซรามิกในระยะที่ 1 โดยที่อุณหภูมิการเผา 700°C การกระจายตัวของรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0171 ถึง 1.5737 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1513 μm มากที่สุด ดังรูปที่ 4.2 ในขณะที่การแจกแจงขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C การกระจายตัวของรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.006 ถึง 0.6618 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1512 μm มากที่สุด ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องตาม Lee และ Rainforth [28] กล่าวไว้ถึง ผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวมหรือการเพิ่มอุณหภูมิการเผา ส่งผลทำให้อุณหภูมิของเม็ดดินเผาเข้าหากันมากขึ้นเพราะพลังงานอิสระที่พื้นผิวลดลง เป็นผลทำให้อุณหภูมิที่เกิดการเชื่อมติดกันแข็งแรงมากขึ้นและขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง จำนวนรูพรุนจะลดน้อยลง โดยที่รูพรุนจะกระจายเป็นรูพรุนเดี่ยว



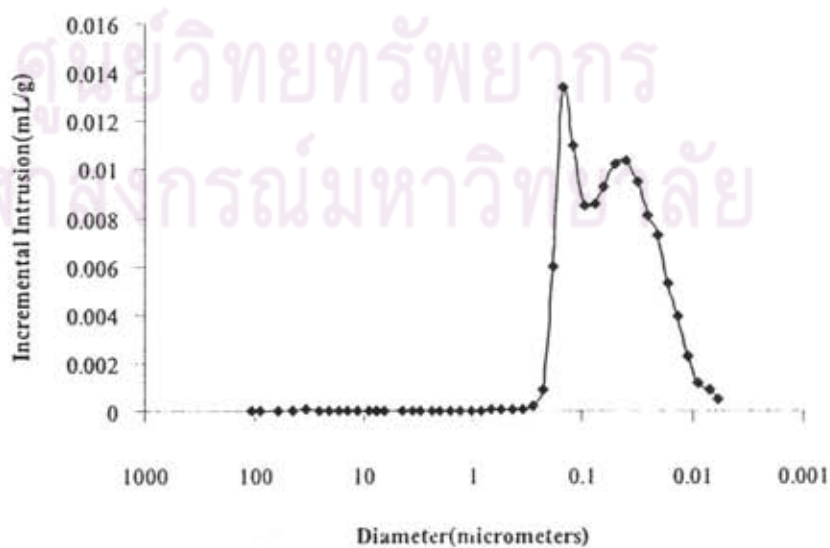
รูปที่ 4.1 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 700°C



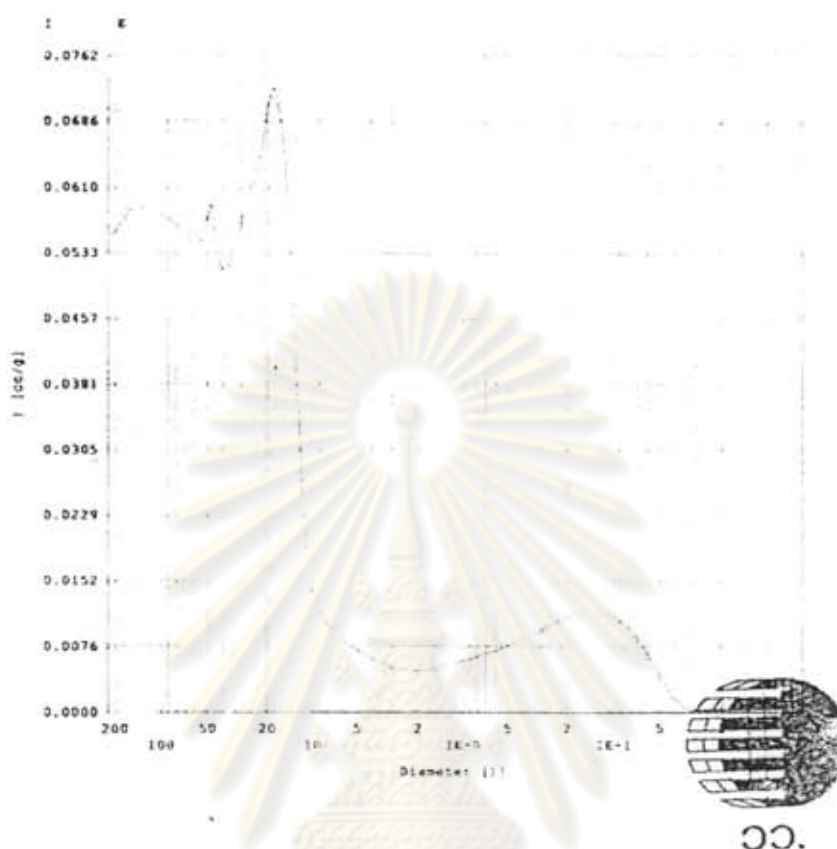
รูปที่ 4.2 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 700°C ระยะที่ 1



รูปที่ 4.3 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 900°C



รูปที่ 4.4 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 900°C ระยะที่ 1



รูปที่ 4.5 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 1250°C

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะมีผลต่อการลดขนาดรูพรุนแล้ว [28] ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 4.3 ผลจากอุณหภูมิการเผาทำให้ตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1250°C มีค่าความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C และ 700°C ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับระยะที่ 1 ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตได้

แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย Flexural strength (MPa)
700 °C	0.20 ± 0.05
900 °C	0.38 ± 0.08
1250 °C	3.05 ± 0.32

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะที่ 1

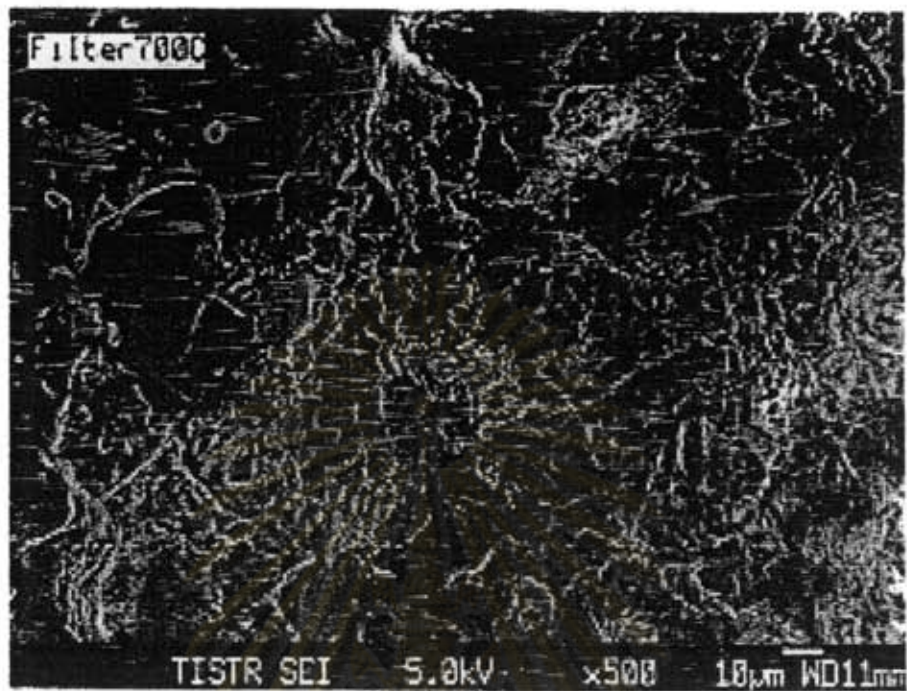
แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย Flexural strength (MPa)
700 ° C	4.169
900 ° C	5.412

หมายเหตุ ตรวจสอบโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

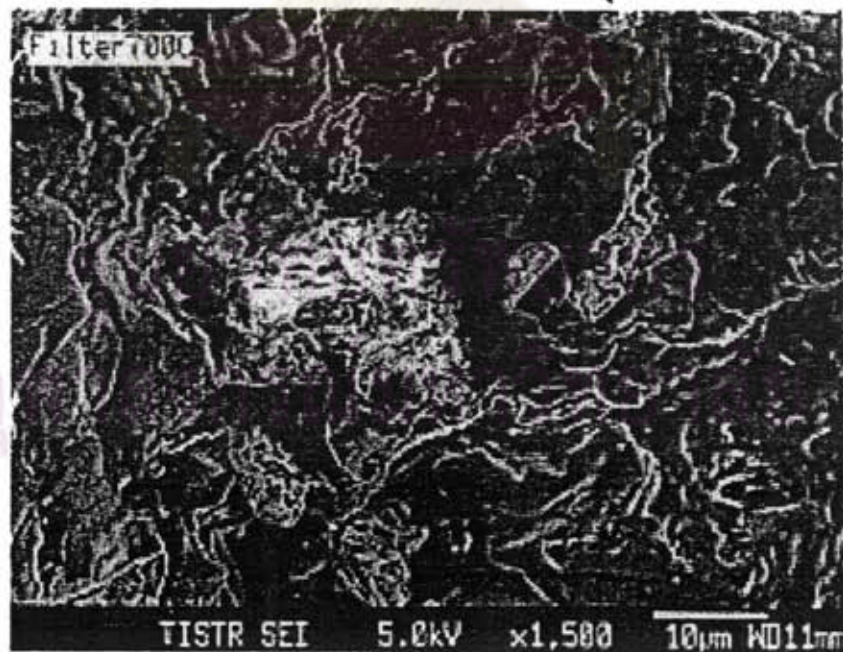
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

สำหรับโครงสร้างทางจุลภาคของตัวกรอง จะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ผลิตภัณฑ์ของ JEOL รุ่น JSM-5410 ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการถ่ายภาพโครงสร้างภายในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C 900°C และ 1250°C ได้ผลดังรูปที่ 4.6 – 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

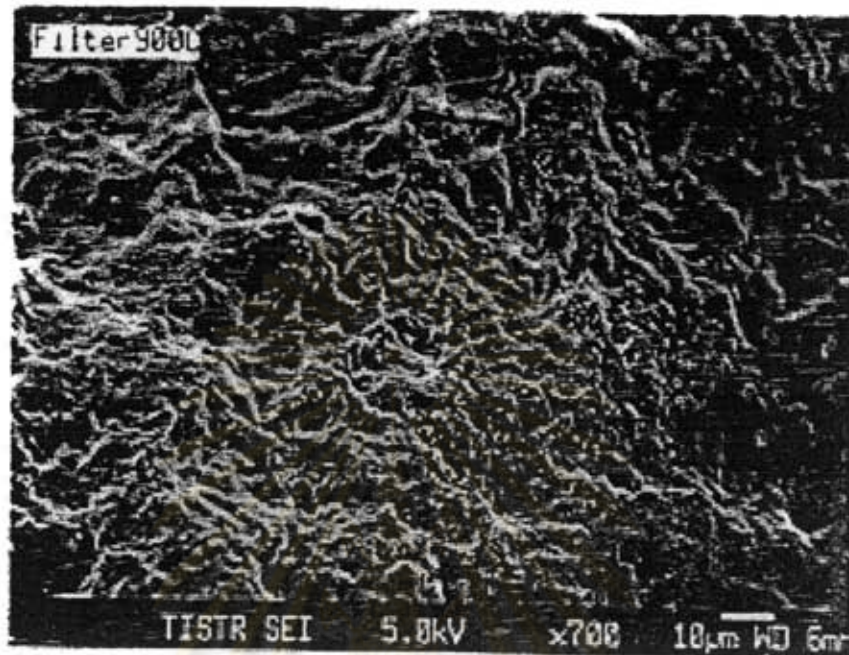


(ก) 700°C ทำถึงขยาย 500 เท่า

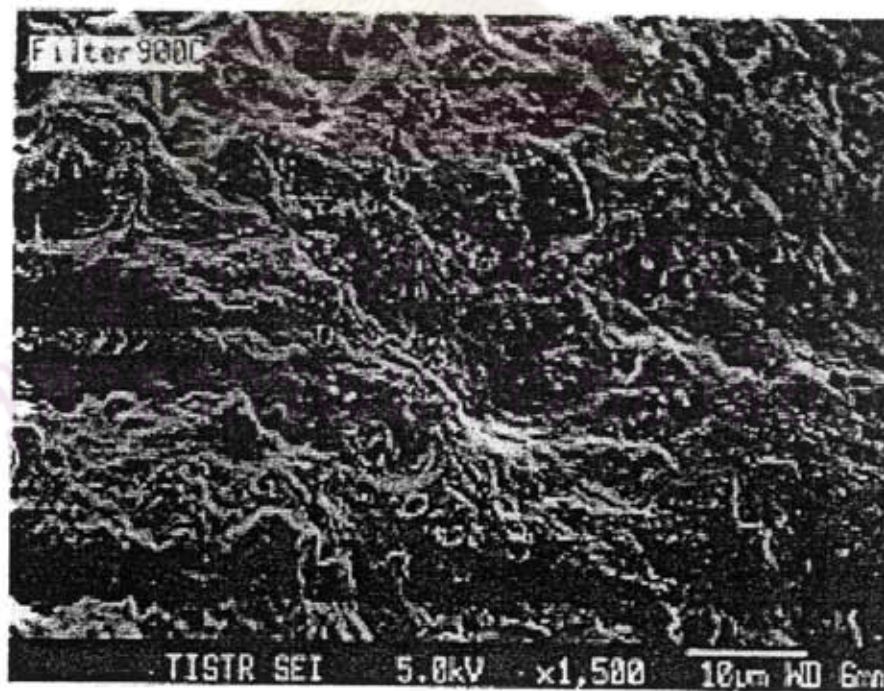


(ข) 700°C ทำถึงขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 700°C:

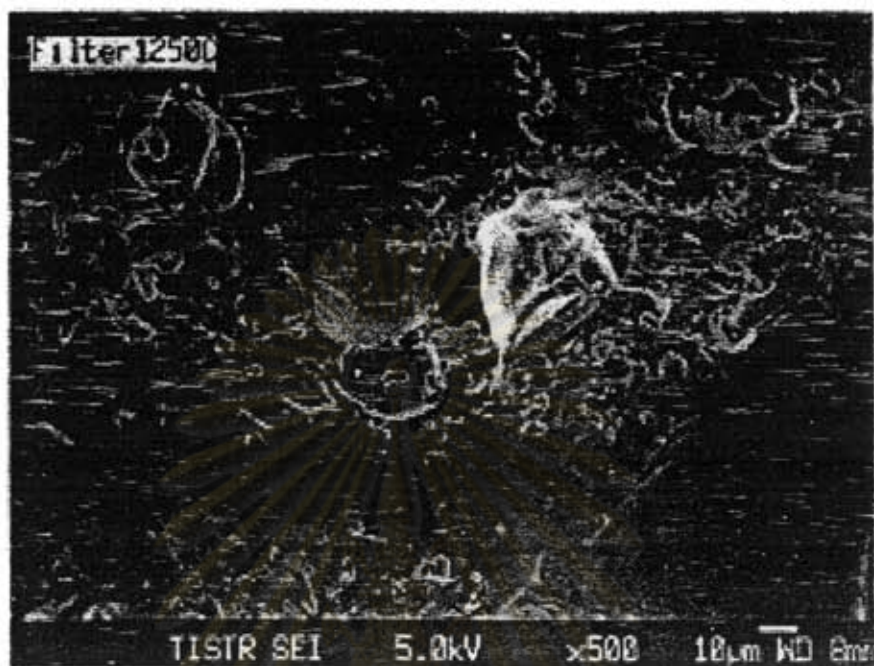


(ก) 900°C กำลังขยาย 500 เท่า

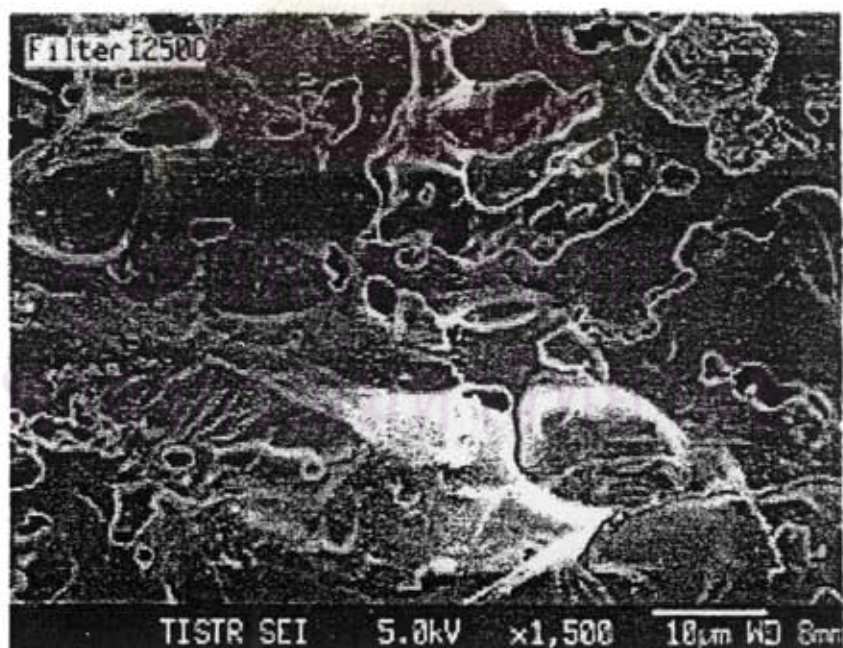


(ข) 900°C กำลังขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 900°C:

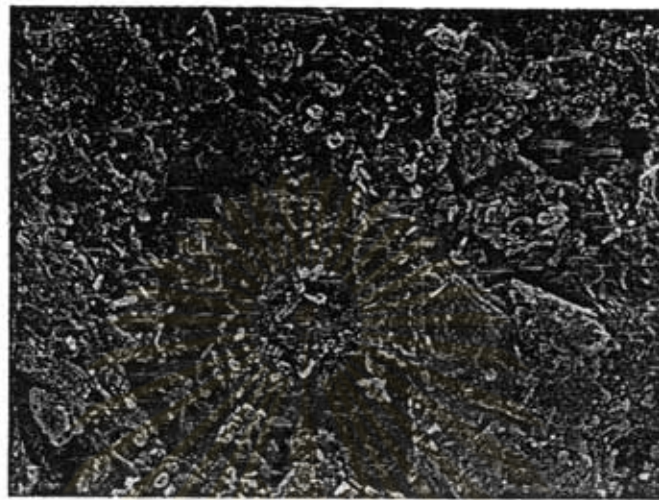


(ก) 1250°C กำลังขยาย 500 เท่า



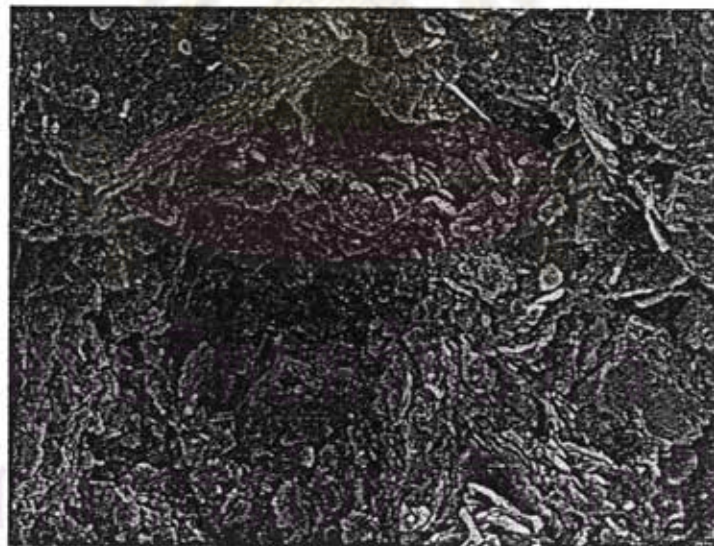
(ข) 1250°C กำลังขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 1250°C:



10μm

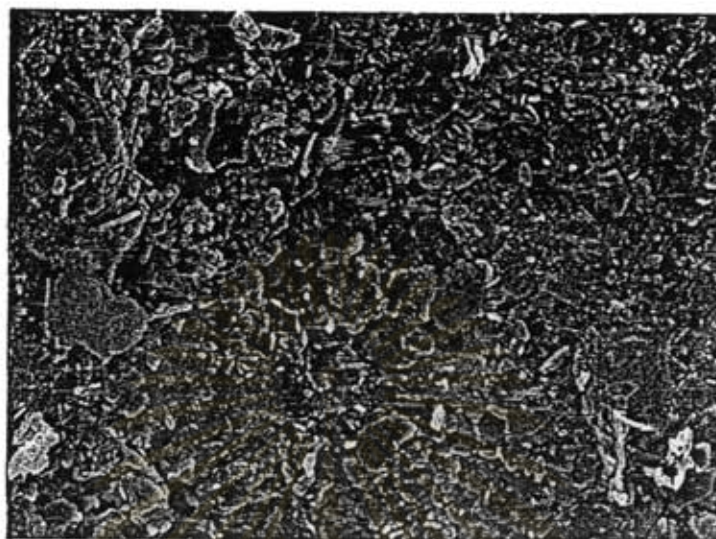
(ก) ภาพถ่ายด้านบน



10μm

(ข) ภาพตัดขวาง

รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกระยะที่ 1 ที่อุณหภูมิการเผา 700°C



10μm

(ก) ภาพถ่ายด้านบน



10μm

(ข) ภาพตัดขวาง

รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวกรองเซรามิกระยะที่ 1 ที่อุณหภูมิการเผา 900°C

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 700°C พบว่าพื้นผิวของแผ่นกรอง มีรูพรุนขนาดเล็กและจำนวนรูพรุนน้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C โดยมีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 10 μm

จากรูปที่ 4.8 พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 1250°C มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคข้างต้น พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C มีลักษณะรูพรุนน้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C แต่ทั้งแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C นั้นมีลักษณะรูพรุนมากกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1250°C

จากรูปที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1 ที่อุณหภูมิการเผา 700°C พบว่าพื้นผิวของแผ่นกรอง มีช่องว่างขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วไป ภายในแผ่นกรองมีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวอยู่ตามที่แสดงในรูปภาพตัดขวางของแผ่นกรองเซรามิก โดยขนาดช่องว่างและรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 10 μm

จากรูปที่ 4.10 พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1 ที่อุณหภูมิการเผา 900°C มีลักษณะของชิ้นงานที่อัดแน่นกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C ดังเห็นได้จากขนาดช่องว่างและรูพรุนภายในแผ่นกรองมีขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่น้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C โดยขนาดช่องว่างและรูพรุนมีขนาดเล็กกว่า 5 μm

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคข้างต้น พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C มีลักษณะรูพรุนน้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C เป็นไปตามอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อความพรุนและขนาดรูพรุนของวัสดุ [28] สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การแจกแจงของขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกลข้างต้น

4.1.3 การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิก

เมื่อนำคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1250°C มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นตัวกรอง เนื่องจากมีแข็งแรงเชิงกลสูงเพียงพอที่จะใช้เป็นตัวกรองได้ ส่วนแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C ในทางปฏิบัติพบว่าค่าความแข็งแรงเชิงกลไม่สูงพอที่จะสามารถใช้เป็นตัวกรอง เนื่องจากเกิดการแตกร้าวในขั้นตอนการประกอบเข้ากับชุดทดลอง

4.2 คุณสมบัติของแผ่นกรองในการดักเก็บฝุ่น

4.2.1 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น

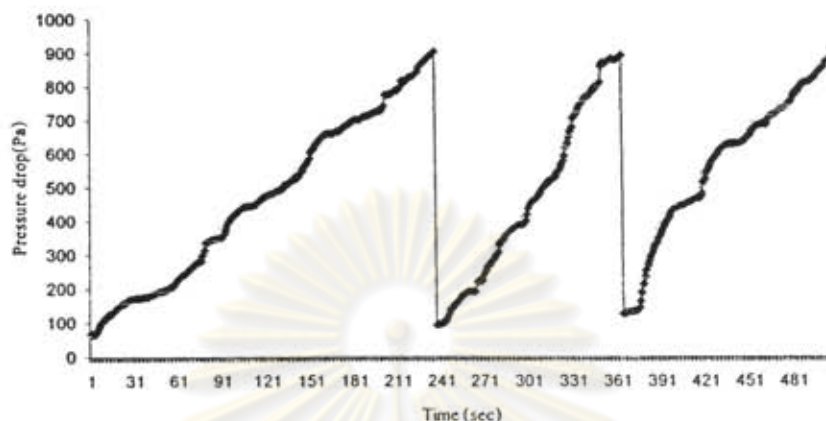
ผลของความเร็วในการกรองและผลของความดันลดของชั้นฝุ่น

สำหรับประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นวงที่ความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa ใช้ระยะเวลาในการพัลส์เท่ากับ 200 ms กระทำการทดลอง 1 วัฏจักรการกรอง เงื่อนไขตัวแปรของความเร็ว 3 ค่า และ เงื่อนไขการกำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนไล่เด็กฝุ่น 3 ค่า คือที่ความเร็วการกรอง 3 cm/s , 5 cm/s และ 7 cm/s กำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนไล่เด็กฝุ่นไว้ที่ 500 Pa , 700 Pa และ 900 Pa ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก

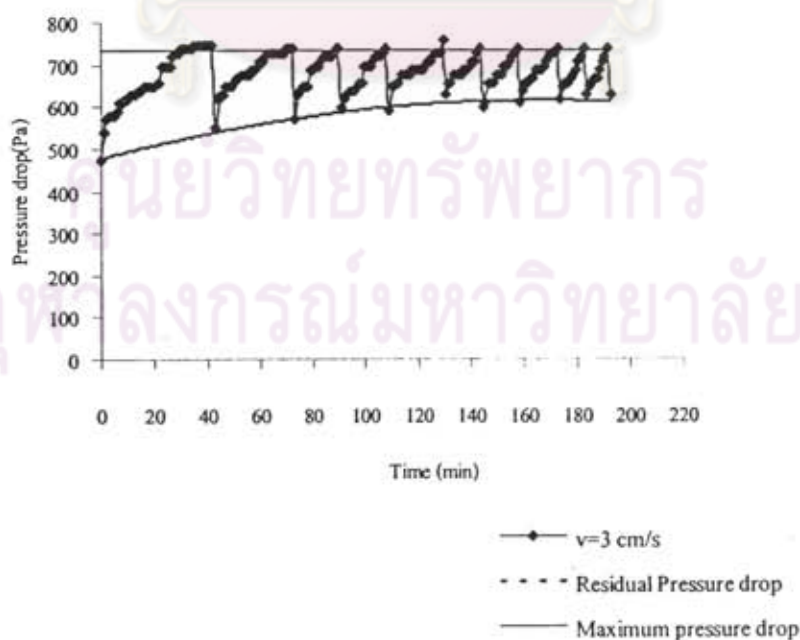
ความเร็วในการกรอง (cm/s)	ความดันลดที่กำหนดไว้ก่อนไล่เด็กฝุ่น (Pa)		
	500	700	900
3	99.197	99.110	98.303
5	99.794	99.716	98.771
7	99.781	99.599	97.493

การหาประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นเป็นสิ่งสำคัญที่สุดของการผลิตแผ่นกรอง สำหรับระบบกรองฝุ่นที่ใช้อยู่จริงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สภาวะการกรองเป็นแบบต่อเนื่องทำความสะอาดแผ่นกรองโดยการพ่นอากาศความดันสูง (Pulse Jet) ในลักษณะขั้นตอนทิศทางการกรอง เพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงในอุตสาหกรรม การหาประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นกระทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขแบบต่อเนื่องที่อัตราการกรอง 3 cm/s ความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa ใช้ระยะเวลาในการพัลส์เท่ากับ 200 ms เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 3 วัฏจักร พบว่ามีฝุ่นหลุดผ่านแผ่นกรองเซรามิกออกทางด้านหน้าแผ่นกรอง จึงได้หยุดทำการทดลอง



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa

ส่วนผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิกในระยะที่ 1 ให้ผลการทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิกซึ่งผลิตโดยประเทศญี่ปุ่นดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa

จากรูปที่ 4.14 พบว่าวัฏจักรการกรองแต่ละวัฏจักรใช้เวลาในการกรองไม่เท่ากัน เนื่องจากการทำความสะอาดตะกอนตัวกรองที่ไม่สมบูรณ์ของวัฏจักรการกรองอันดับแรก ทำให้เกิดความดันลดตกค้างในตัวกรอง (Residual Pressure Drop) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dittler และ Kasper [34] กล่าวถึงปรากฏการณ์ของเค้กฝุ่นที่ติดค้างอยู่บนผิวตัวกรอง อันเนื่องมาจากการทำความสะอาดตะกอนตัวกรองที่ไม่สมบูรณ์เรียกว่า Patchy Cleaning ส่งผลให้เกิดความดันลดตกค้างในตัวกรองเซรามิกและอัตราการเพิ่มของความดันลดไม่เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น

เค้กฝุ่นที่ติดค้างอยู่บนตัวกรองเซรามิกส่งผลกระทบต่อความดันลดเริ่มต้นของวัฏจักรมีค่าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ของการเพิ่มความดันน้อยกว่าเดิม ทำให้วัฏจักรการกรองสั้นลงแปรผันตามแนวโน้มของความดันตกค้างเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.14 โดยความดันลดตกค้างในตัวกรองที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อายุการใช้งานของตัวกรองเซรามิกสั้นลง

การคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่น ภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่อง ได้ค่าประสิทธิภาพการกรองเท่ากับ 99.99 % เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวกรองเซรามิกลักษณะอื่นตามที่ Seville [20] กล่าวถึงประสิทธิภาพไว้ได้แก่ ตัวกรองเซรามิกแบบ "Cross Flow" (Westinghouse) และ ตัวกรองเซรามิกแบบแท่ง (AGC) แผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นมีประสิทธิภาพการกรองอยู่ในระดับที่ "ดีมาก" (Excellent) ดังตารางที่ 4.6 แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองกับแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นได้ เนื่องจากมีฝุ่นหลุดออกมาทางด้านหน้าแผ่นกรองในขณะที่ทำการทดลองวัฏจักรการกรองที่ 3

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองของตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นกับตัวกรองเซรามิกลักษณะอื่น

ตัวกรองเซรามิก	ประสิทธิภาพการกรอง (%)
ตัวกรองเซรามิกจากประเทศญี่ปุ่น(แบบแผ่น)	99.99
ตัวกรองเซรามิกแบบ Cross Flow	ดีมาก (>99.5)
ตัวกรองเซรามิกแบบแท่ง (AGC)	ดีมาก (>99.5)

สำหรับประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่น และแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1 กระทำภายใต้สภาวะการกรองที่แบบเป็นงวด อัตราการกรอง 3 cm/s ความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa กับ 500 kPa ใช้ระยะเวลาในการพัลส์เท่ากับ 200 ms จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของสภาวะการกรองใน 1 วัฏจักร ดังตารางที่ 4.7

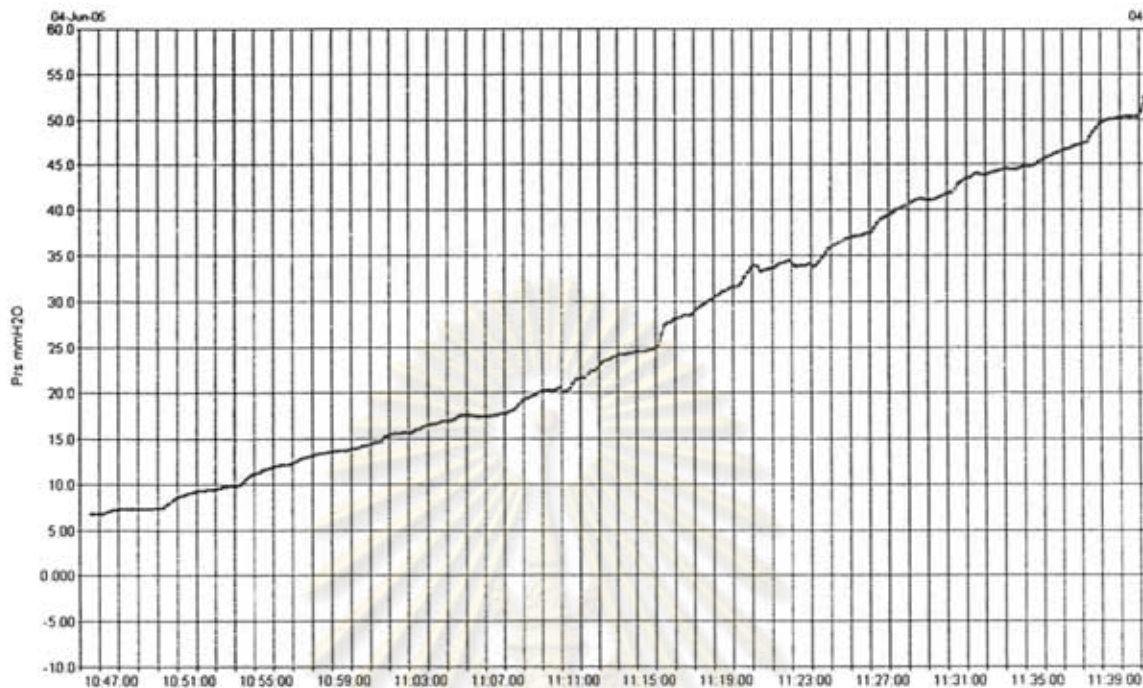
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะที่ 1 กับแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นงวด

ตัวกรองเซรามิก	ประสิทธิภาพในการกรอง (%)	
	ที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa	ที่ความดันทำความสะอาด 500 kPa
ตัวกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะที่ 1	99.99	-
ตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่น	99.98	99.98

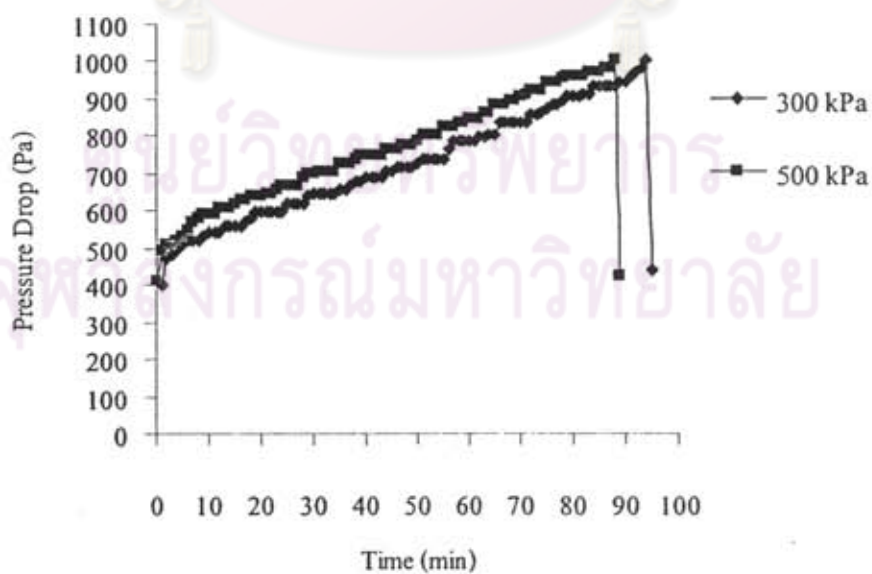
4.2.2 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

ระบบการกรองฝุ่นที่จำเป็นต้องมีระบบการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ โดยความดันทำความสะอาดต้องเหมาะสมต่อระบบการกรองฝุ่น ทั้งนี้ความดันที่ใช้ต้องไม่สูงมากจนส่งผลต่อแผ่นกรองเซรามิกทำให้เกิดความเสียหายกับแผ่นกรองและสิ้นเปลืองพลังงานจนเกินไป แต่ไม่น้อยจนไม่สามารถไล่แก๊สฝุ่นออกได้ เกิดการตกค้างในตัวกรองมากส่งผลต่ออายุการใช้งานให้สั้นลง

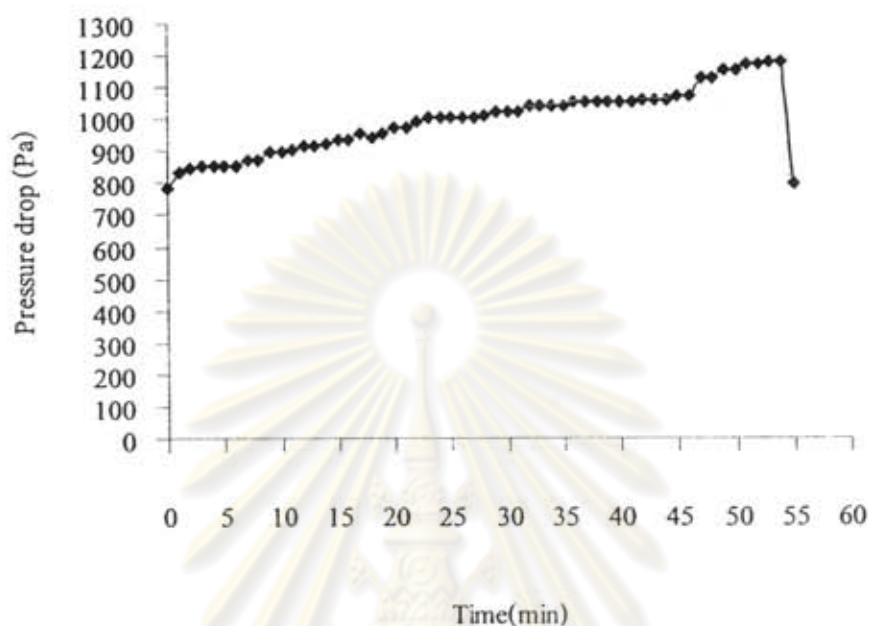
พิจารณารูปที่ 4.15 – 4.17 จะเห็นได้ว่าความดันลดช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณฝุ่นที่เข้าสู่ระบบมากขึ้นต่อมาอัตราการเพิ่มของความดันลดมีค่าลดลงจนเกือบคงที่ แสดงให้เห็นถึงเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันลดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น หมายความว่าเกิดการเกิดของชั้นฝุ่นบนผิวแผ่นกรองมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องตามงานวิจัยของ มานะ อมรกิจบำรุง [16] เมื่อนำข้อมูลการทดลองไปหาค่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นวงด ที่ความดันทำความสะอาดที่ 300 kPa



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันตกคร่อมแผ่นกรองเซรามิกจากประเทศญี่ปุ่นภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นวงดที่ความดันทำความสะอาดที่ 300 และ 500 kPa



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1 ภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นวงด ที่ความดันทำความสะอาดที่ 300 kPa

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ณ ปัจจุบัน

ความเร็วในการกรอง (cm/s)	ความดันลดที่กำหนดไว้ก่อน ไล่จากฝุ่น (Pa)		
	500	700	900
3	97.482	98.469	97.359
5	91.270	96.790	93.798
7	97.150	97.893	86.608

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะที่ 1

ความดันทำความสะอาด (kPa)	ประสิทธิภาพการทำความสะอาด (%)	
	ตัวกรองที่ผลิตขึ้นเอง	ตัวกรองจากประเทศญี่ปุ่น
300	98	98
500	-	100

หากพิจารณาจากประสิทธิภาพการทำความสะอาด พบว่าความดันทำความสะอาดที่ 300 kPa สามารถทำความสะอาดตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่นและตัวกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะที่ 1 มีประสิทธิภาพที่สูงมาก และเมื่อเทียบกับความดันทำความสะอาดที่ 500 kPa พบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความดันที่ใช้ในการทำความสะอาดตัวกรองเซรามิกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้คือ 300 kPa



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

หลังจากการผลิตและได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของแผ่นกรองเซรามิก ได้แก่ การแจกแจงของขนาดรูพรุน, ปริมาตรความพรุนและความแข็งแรงเชิงกล คุณสมบัติในการกรองฝุ่น และประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ กับแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ผลิตขึ้นในระยะที่ 1 มีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

5.1.1.1 การแจกแจงของขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล

การแจกแจงขนาดรูพรุนและปริมาตรความพรุนของแผ่นกรองเซรามิกทำการตรวจวัดโดยวิธี Mercury Porosimetry และค่าความแข็งแรงตรวจวัดตามวิธี ASTM C-773 พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 700°C มีค่าความพรุน 62.915 % ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.354 μm และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.20 \pm 0.05 MPa สำหรับแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C มีค่าความพรุน 73.724 % ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.959 μm มีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.38 \pm 0.08 MPa ส่วนแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1250°C มีค่าความพรุน 23.461 % ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 27.06 μm และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 \pm 0.32 MPa

5.1.1.2 การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสมในการกรอง

จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิกพบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1250°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 27.06 μm ค่าความพรุน 23.461 % และค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 \pm 0.32 MPa เป็นตัวกรองเซรามิกที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูงพอ สามารถประกอบเข้ากับชุดทดลอง และทนต่อแรงดันในการทำความสะอาดได้ ส่วนการเผาแผ่นกรองเซรามิกที่ 700°C และ 900 °C แม้จะมีคุณสมบัติของความพรุนที่มากกว่า แต่ก็ไม่สามารถใช้เป็นตัวกรองได้เนื่องจากความแข็งแรงเชิงกลที่น้อย ไม่สามารถประกอบเข้ากับชุดทดลองได้

5.1.2 คุณสมบัติแผ่นกรองในการกรองฝุ่น

5.1.2.1 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น

ผลของความเร็วในการกรองและผลของความดันลดยของชั้นฝุ่น

จากการทดลองแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระบะนี้ มีปัญหาเรื่องขนาดรูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำ ซึ่งทำให้ขนาดรูพรุน โตเกินไปทำให้ฝุ่นผ่านแผ่นกรองไปได้ในปริมาณมากเมื่อเข้าสู่วัฏจักรการกรองแบบต่อเนื่องครั้งที่ 3 ทำให้ไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพในการกรองภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องได้ ส่วนการทดลองภายใต้การกรองแบบสภาวะเป็นงวดพบว่าที่ความเร็วในการกรอง 3 cm/s , 5 cm/s และ 7 cm/s มีประสิทธิภาพการกรองเกือบเท่ากันคือประมาณ 99% ส่วนผลของความดันลดยของชั้นฝุ่นในการทดลองนี้มีค่าไม่ต่างกัน เนื่องจากเหตุผลของแผ่นกรองเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน โตเกินไป เมื่อความดันลดยมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฝุ่นหลุดรอดผ่านออกมาทางด้านหน้าแผ่นกรอง

5.1.2.2 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

สำหรับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa มีค่าเท่ากับ 99 % ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระบะที่ 1 ที่ความดันทำความสะอาดเดียวกัน และจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดแผ่นกรองที่ผลิตในระบะนี้มีค่าสูงมาก โดยมีเงื่อนไขของการทดลองคือการกำหนดความดันลดยพร้อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนการทำความสะอาดไว้ 3 ค่า คือ 500 Pa , 700 Pa และ 900 Pa ผลจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดมีค่าเท่ากัน จึงอาจจะกล่าวได้ว่าความดันที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้คือ 300 kPa

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยผลิตแผ่นกรองเซรามิกโดยใช้ฟองน้ำเป็น โครงสร้างสำหรับให้ดินรียคูดอากาศ ชื่อทางการค้าว่า PBA จากบริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด ผสมกับน้ำที่สกัดส่วนการผสมดิน PBA ต่อ น้ำเท่ากับ 40 ต่อ 60 โดยน้ำหนักยัดเกาะเพื่อทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น แล้วนำไปเผาให้ดินสุกด้วยอุณหภูมิ 1250°C สามารถใช้กรองฝุ่นได้ในระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นจึงยังไม่มีความเหมาะสมที่นำไปใช้งานแต่

สามารถใช้เป็นชั้นรองรับสำหรับการผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีการ Coating ได้เป็นอย่างดี และ
แนวทางการพัฒนาเพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่

5.2.1 การ Coating แผ่นกรองเซรามิก

แผ่นกรองเซรามิกแบบแผ่นที่ผลิตขึ้นตามงานวิจัยในขณะนี้ มีรูพรุน โตเกินไปทั้งนี้เนื่องมาจากสาเหตุ
ของการใช้ฟองน้ำเป็น โครงสร้างทำให้ใช้งานได้ในช่วงเวลาอันสั้น จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้
งานจริง ซึ่งจะส่งผลต่อการทำความสะอาด และ การเปลี่ยนตัวกรองบ่อย ๆ ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการ
บำรุงรักษาระบบสูงขึ้นและที่สำคัญที่สุดคือ แผ่นกรองเซรามิกมีลักษณะชั้นเดียว ไม่มีชั้นผิวไว้คอย
ป้องกันการเล็ดลอดของอนุภาคฝุ่นเข้าไปในชั้น โครงสร้าง ทำให้แผ่นกรองเกิดการอุดตันได้ง่าย
แนวทางการแก้ไขปัญหาคือ การผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีลักษณะเป็นแบบ 2 หรือ 3 ชั้นก็มีชั้น
โครงสร้างหรือชั้นรองรับที่มีรูขนาดใหญ่ซึ่งได้จากการวิจัยในครั้งนี้ และมีการ Coating ชั้นผิวแผ่น
กรองให้มีรูขนาดเล็กเพื่อป้องกันการเล็ดลอดของอนุภาคฝุ่นเข้าไปในชั้น โครงสร้าง ซึ่งจะทำให้
กระบวนการกรองเกิดที่ผิวที่เพียงอย่างเดียว

5.2.2 การขึ้นรูปตัวกรองเซรามิกเป็นแท่ง

เนื่องจากรูปร่างของตัวกรองเซรามิกส่วนใหญ่ที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ทำการขึ้นรูปแบบแท่งซึ่ง
ง่ายต่อการติดตั้งและประหยัดค่าใช้จ่ายในแง่ของพื้นที่ผิวการกรอง ดังนั้นงานวิจัยในขั้นต่อไปเมื่อได้
ผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีความเหมาะสมแล้ว ซึ่งได้จากการนำแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากงานวิจัยนี้
ไปทำการ Coating และทำการทดสอบแผ่นกรอง หลังจากนั้นควรทำการออกแบบขึ้นรูปแผ่นกรอง
เซรามิกเป็นรูปแท่งที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

1. มานะ อมรกิจบำรุง, 2542, “การเก็บฝุ่นจากแก๊สอุณหภูมิสูงด้วยตัวกรองเซรามิก”, วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 26, ฉบับที่ 147, ตุลาคม - พฤศจิกายน, หน้า 131 – 134.
2. มานะ อมรกิจบำรุง, 2544, “เทคโนโลยีการทำความสะอาดแก๊สอุณหภูมิสูง : ปัจจุบันและอนาคต”, วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 28, ฉบับที่ 158, สิงหาคม – กันยายน, หน้า 130 – 137.
3. Auriol, A. and Gillot. J., 1988, : **Preparation of Alumina Ultrafiltration Membrane**, US. Patent No.4,724,078.
4. Raileanu, M., et al., 2002, “Preparation and Characterization of Alumina Supported Silicalite membranes by Sol – Gel Hydrothermal Method”, **Journal of Membrane Science**, Vol. 210, pp. 197 – 207.
5. Terpstra, R.A., Bonekamp, B.C. and Veringa, H.J., 1988,” Preparation, Characterization and Some Properties of Tubular Alpha Alumina Ceramic Membranes for Microfiltration and as Support for Ultrafiltration and Gas Separation Membranes”, **Desalination**, Vol. 70, pp.395 – 404.
6. Jo, Y.M., Hutchison, R.B. and Raper, J.A.,1997,” Characterization of Ceramic Composite Membrane Filters for Hot Gas Cleaning”, **Powder Technology**, Vol. 91, pp. 55 – 62.
7. เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์, โฉมิต พุคะทรัพย์ และ ชงค์ บำรุงวงศ์, 2536, เครื่องขึ้นรูปเซรามิก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 64 – 72.
8. ชัชวาล สุขมัน, 2543, การผลิตและพัฒนาชั้นรองรับเยื่อแผ่นอะลูมินาชนิดไมโครฟิลเตรชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1 – 77.

9. ปฏิมา เทพขายน, 2540, การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดไมโครฟิลเตรชันโดยใช้อะลูมินา, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-ธนบุรี, หน้า 1 – 92.
10. Jo, Y.M., Huchison, R. and Raper, J.A., 1996, "Preparation of Ceramic Membrane Filters, from Waste Fly Ash, Suitable for Hot Gas Cleaning", **Waste Management & Research**, Vol. 14, pp. 281 – 295.
11. Berbner, S. and Löffler, F., 1994, "Influence of High Temperatures on Particle Adhesion", **Powder Technology**, Vol. 18, No. 3, pp. 273 – 280.
12. Kanaoka, C. and Amornkitbamrung, M., 2001, "Effect of Filter Permeability on the Release of Capture Dust from a Rigid Ceramic Filter Surface", **Powder Technology**, Vol. 118, pp. 113 – 120.
13. Giernoth, B. and Renz, U., 1996, "Investigation in Hot Gas Filtration with Ceramic Filter Elements", **Proceedings of the Third International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures**, Vol. 1, pp. 233 – 245.
14. Innocentini, M.D.M., Mariano, W.A., Baumgartner, J.B. and Coury, J.R., 1999, "Performance of Two Different Ceramic Filters for High Temperature Filtration", **High Temperature Gas Cleaning**, Vol. 1, pp. 81 – 93.
15. Hajek, S. and Peuket, W., 1999, "Comparison of Ceramic and Metal Filter Element for High Temperature Filtration", **High Temperature Gas Cleaning**, Vol. 1, pp. 219 – 232.
16. มานะ อมรกิจบำรุง, 2545, "พฤติกรรมการกรองและการไล่เด็กฝุ่นออกจากตัวกรองเซรามิก", **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 279 – 291.
17. Choi, J.H., Seo, Y.G. and Chung, J.W., 2001, "Experimental Study on the Nozzle Effect of the Pulse Cleaning for the Ceramic Filter Candle", **Powder Technology**, Vol. 114, pp. 129 – 135.

18. Dittler, A. and Umhauer, H.F., 2001, "The Influence of Conditioning and Regeneration on the Separation Behaviour of Rigid Surface Filters for the Separation of Particles from Gases", *Powder Technology*, Vol. 120, pp. 223 – 231.
19. Choi, J.H. and Ahn, J.J., 2000, "Effects of Particle Properties on the Performance of a Ceramic Filter Candle at High Temperature", *Aerosol Science*, Vol. 31, pp. S668 - s669.
20. Seville, J.P.K. (Ed.), 1997, **Gas Cleaning in Demanding Applications**, Blackie Academic & Professional, London, pp. 96 – 97.
21. Richard, L.L., 1992, "Primer on Engineering Ceramic", *Advance Material & Process*, Vol. 6, No. 10, pp. 1 – 31.
22. Ishizaki, K., 1993, "Porous Material", **The International Forum of Material Engineering at Sanjo Tusbame (IFMEST)**, September 28 - 29, Japan, pp. 3 – 87
23. Warren, L.M., 1993, **Unit Operations of Chemical Engineering**, New York, McGraw - Hill, 1130p.
24. Terrance, A., 1997, **Particle Size Measurement**, Vol. 1, 5th ed., London, J.J. Press, pp.300 - 410.
25. Reed, J.S., 1989, **Introduction to the Principles of Ceramic Processing**, John Wiley & Sons, New York, pp. 74 – 111.
26. กุลจิรา สุจิโรจน์, ผกามาศ แซ่หว่าง และ ดวงเดือน อางองค์, 2545, การผลิตเซรามิกโดยการอัดแบบ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, หน้า 22.
27. George, Y., Onada, J. and Hench, L., 1978, **Ceramic Processing before Firing**, New York, Marcel Dekker, pp. 1 – 19.

28. Lee, E. and Rainforth, W., 1992, **Ceramic Microstructure**, New Jersey, Chapman & Hall, pp. 1-65.
29. Mchale, E., 1992, **Ceramic Powder and Processing**, New York, John Wiley & Sons, pp. 120 – 121.
30. Venkataraman, K., et al., 1988, "Characterization Studies of Ceramic Membrane, A Novel Technique using a Coulter Porometer", **Journal of Membrane Science**, Vol. 39, pp. 261 – 262.
31. "เอกสารทดสอบความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุ", สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
32. ภาสกร ทองน้อม, 2546, การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกเพื่อจับเก็บฝุ่นขนาดเล็ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1 – 112.
33. "เอกสารบรรยายบอร์ด FGD", การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
34. Dittler, A. and Kasper, G., 1999, "Simulation of Operational Behavior of Patchily Regenerated, Rigid Gas Cleaning Filter Media", **Chemical Engineering and Processing**, Vol. 38, pp. 321-327.