รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้จับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง

เมษายน 2552

สัญญาเลขที่ MRG4680075

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเตรียมแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้จับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง

รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ ศ. ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ผู้คอยเป็นพี่เลี้ยงอย่างสม่ำเสมอ ขอขอบคุณ ดร. สมนึก ศิริสุนทร ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณบริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ดิน PBA ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อนุเคราะห์เถ้าลอย ขอขอบคุณ Hosokawa Powder Technology Research Institute ประเทศญี่ปุ่น ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างแผ่นกรองเซรามิก ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ที่ได้แนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ รวมทั้งเจ้าหน้าที่โรงประลองคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น รวมทั้งผู้ช่วยเหลือและให้กำลังใจที่มิได้เอ่ยนาม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG4680075

ชื่อโครงการ: การเตรียมแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้จับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง

ชื่อนักวิจัยและสถาบัน: รศ. ดร. มานะ อมรกิจบำรุง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail Address: mana.amo@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม 2546 – 30 เมษายน 2552

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวกรองเซรามิก โดยจุ่มฟองน้ำในน้ำดิน PBA ในแม่พิมพ์โลหะ (ขนาด 20 ซม. × 20 ซม. × 2.0 ซม.) ทิ้งไว้ให้แห้งในบริเวณอากาศนิ่งเพื่อให้น้ำระเหยออกไปอย่างช้า ๆ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C, 900°C และ 1,250°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตัวกรองเซรามิกที่เผาแล้วถูกส่งไปวิเคราะห์การแจกแจงขนาดของรูพรุน ความพรุน และความแข็งแรงเชิงกล พบว่าตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 700°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.35 μm ค่าความพรุน 62.92% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.20 $\pm$ 0.05 MPa ตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.96 μm มีความพรุน 73.72% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.38 $\pm$ 0.08 MPa ส่วนตัวกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1,250°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 27.06 μm มีความพรุน 23.46% และมีความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 $\pm$ 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%

คำหลัก: การกรอง / การทำความสะอาดแก๊ส / ตัวกรองเซรามิก / เถ้าลอย

ABSTRACT

Project Code: MRG4680075

Project Title: Preparation of Ceramic Membrane Filter Suitable for Hot Gas Cleaning Application

Investigator: Assoc. Prof. Dr. Mana Amornkitbamrung

E-mail Address: mana.amo@kmutt.ac.th

Project Period: 1 July 2003 – 30 April 2009

Ceramic filters were prepared by soaking the sponge in PBA soil/water slurry in a steel mold (20 cm × 20 cm × 2.0 cm). The soaked samples were slowly dried using ambient air and then sintered at 700°C, 900°C and 1,250°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 compressive strength of 0.38 ± 0.08 MPa. When the sample was sintered at 1,250°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 1,250°C was most suitable because it had an optimal porosity and size, together with higher compressive strength. To investigate the filtration efficiency, the batch operation was performed 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 efficiencies at such operating conditions were insignificantly different, with the value being in between 98% and 99%

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

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ค
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
สารบัญ		ฉ
รายการตาราง		ฌ
รายการรูปประกอบ		ญ
ประมวลศัพท์และคำย่อ		ฏ
บทที่		
1. บทนำ		**1**
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		**3**
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมตัวกรองเซรามิก	3
2.1.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการจับเก็บฝุ่น	5
2.2	เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น	9
2.3	การกรองอนุภาค	10
2.4	โครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิก	13
2.4.1	โครงสร้างแบบสมมาตร	13
2.4.2	โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	13
2.5	วัสดุสำหรับผลิตเยื่อแผ่นเซรามิก	13
2.6	รูปแบบของตัวกรองเซรามิก	14
2.7	วิธีการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิก	15

หน้า

2.7.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาค 15
2.7.2 การเลือกสารเติมแต่ง (Additives) 19
2.7.3 การขึ้นรูป (Forming) 24
2.7.4 การทำแห้งและกำจัดสารเติมแต่ง (Drying and Burn out Binders) 27
2.7.5 การเผาอบผนึก (Sintering) 28
2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นกรองสำหรับงานวิจัย 29
2.9 การทดสอบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเซรามิก 30
2.9.1 การทดสอบหาขนาดรูพรุน 30
2.9.2 การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน 33
2.9.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) 34
2.9.4 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength) 35

3. การดำเนินงานวิจัย 37
3.1 การผลิตแผ่นกรองเซรามิก 37
3.1.1 การทดลองผลิตแผ่นกรองอย่างง่ายที่ความหนา 1.5 cm 37
3.1.2 การทดลองผลิตแผ่นกรองอย่างง่ายที่ความหนา 3.8 cm 38
3.1.3 การผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm 39
3.1.4 การผลิตแผ่นกรองที่อัตราส่วนผสมดิน PBA : น้ำ ต่าง ๆ กัน 40
3.1.5 การทำให้แห้งและการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิต่างกัน 41
3.2 การทดสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิก 42
3.2.1 ขนาดและปริมาตรรูพรุน 42
3.2.2 การวิเคราะห์ความหนาและโครงสร้างจุลภาค 42
3.2.3 การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิก 42
3.3 การปรับปรุงชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก 42
3.4 การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น 45
3.5 การสอบเทียบชุดทดลองและชุดป้อนฝุ่น 47
3.5.1 มาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ (Orifice) 48
3.5.2 ชุดป้อนฝุ่น 49
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิก 50
3.6.1 การหาค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ 50
3.6.2 ความสามารถในการกรองฝุ่น 52

หน้า

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล **54**

4.1 คุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิก 54

4.1.1 การแจกแจงขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล 54

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค 59

4.1.3 การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิก 63

4.2 คุณสมบัติของแผ่นกรองในการดักเก็บฝุ่น 64

4.2.1 การหาค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ 64

4.2.2 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นอันเนื่องมาจากผลของความเร็วในการกรองและผลของความดันลดของชั้นฝุ่น 65

4.2.3 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด 67

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **71**

5.1 สรุปผลการทดลอง 71

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ 71

5.1.2 คุณสมบัติแผ่นกรองในการการกรองฝุ่น 72

5.1.3 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด 72

5.2 ข้อเสนอแนะ 73

5.2.1 การเคลือบผิวแผ่นกรองเซรามิก 73

5.2.2 การขึ้นรูปตัวกรองเซรามิกเป็นแท่ง 73

5.2.3 การผลิตตัวกรองเซรามิกในระดับอุตสาหกรรม 74

เอกสารอ้างอิง **75**

ภาคผนวก

ก การคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองและการทำความสะอาด 80

ข การทดสอบรูพรุนเปิดด้วยเรซิน 82

ค ผลการทดสอบจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 85

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1	การแบ่งประเภทเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นและลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่น	9
2.2	ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM	16
2.3	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการตกตะกอน	17
2.4	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Laser Diffraction	18
2.5	กลไกการทำงานของสารเติมแต่ง	20
2.6	ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร	21
2.7	สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแต่ละชนิด	24
3.1	องค์ประกอบของฝุ่นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	46
4.1	คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น	54
4.2	ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิต	59
4.3	ค่าสภาพให้ซึมผ่านอากาศได้ของตัวกรองเซรามิก	64
4.4	ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก	65
4.5	ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ณ ปัจจุบัน	70

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	ตัวอย่างกลไกการดักอนุภาคของตัวกรอง: (ก) Sieving (ข) Direct Interception	11
2.2	ตัวอย่างภาพของ (ก) Depth Filtration. และ (ข) Surface Filtration	12
2.3	โครงสร้างรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิก	13
2.4	รูปแบบของตัวกรองเซรามิก	14
2.5	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Laser Diffraction	18
2.6	เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Electrical Sensing	19
2.7	การเชื่อมประสานอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสาน	21
2.8	การเกิดประจุที่ผิวของอะลูมินาที่อิ่มตัวด้วยน้ำ	23
2.9	กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่าง ๆ	25
2.10	การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาอบผนึก	29
2.11	หลักการของ Capillary Action	31
2.12	ลักษณะของ Penetrometer	32
2.13	หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	34
2.14	การทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก	35
2.15	แรงที่กระทำบนชิ้นงานขณะทำการทดสอบ Flexural Strength	36
3.1	รูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำเมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1,000ºC	38
3.2	การออกแบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิกครั้งที่ 1	39
3.3	แบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิกที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วและนำไปจัดสร้าง	40
3.4	แบบชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกของ P. Gäng	43
3.5	ชุดทดสอบที่ผ่านการปรับปรุง	44
3.6	จุดที่ทำการต่อกับชุดทดสอบเดิม	44
3.7	อุปกรณ์จับยึดหน้าแปลน Backup Filter	45
3.8	ภาพถ่ายอนุภาคฝุ่นเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	46
3.9	ชุดป้อนฝุ่นที่จัดสร้างขึ้นใหม่	47
3.10	การสอบเทียบมาตรอัตราการไหลแบบออริฟิซ	48
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรากที่สองของเฮดความดันแตกต่างภายในมาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ	48
3.12	ความเข้มข้นฝุ่นที่ได้จากเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่ที่อัตราการป้อนฝุ่น 7.5 g/min	49
3.13	การติดตั้งเครื่องมือชุดป้อนฝุ่นเข้ากับชุดทดสอบ	52
4.1	การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 700°C	56

รูป **หน้า**

4.2	การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 900°C	57
4.3	การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 1,250°C	58
4.4	โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ที่อุณหภูมิการเผา 700°C	60
4.5	โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ที่อุณหภูมิการเผา 900°C	61
4.6	โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C	62
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการกรองกับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต	64
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกภายใต้สภาวะการกรองที่ความเร็วการกรองต่าง ๆ กัน	66
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa	66
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นงวด ที่ความดันทำความสะอาดที่ 300 kPa	67
4.11	แผ่นกรองเซรามิกก่อนทำการทดสอบการกรอง	68
4.12	แผ่นกรองเซรามิกที่อยู่ในระหว่างทดสอบการกรอง	69
4.13	แผ่นกรองเซรามิกหลังจากทำความสะอาดแล้ว	69
ข.1	แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน	83
ข.2	แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 900ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน	83
ข.3	แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,250ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน	84

ประมวลศัพท์และคำย่อ

IR	=	Infrared
ZSM	=	Zeolite Socony Mobil
CMC	=	Sodium Carboxy Methyl Cellulose
α - alumina	=	Alpha Alumina
CPB	=	Conventional Power Boiler
FBC	=	Fluidized Bed Combustion Unit
BI-XDC	=	Brookhaven Instruments X-Ray Disc Centrifuge Particle Size Analyzer
PVA	=	Polyvinyl Alcohol
pH	=	Power of Hydrogen
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
Torr	=	Torricelli (1 Torr = 1 mmHg)
TiO_2	=	Titanium Dioxide
SiO_2	=	Silicon Dioxide, Silica
Al_2O_3	=	Aluminium Oxide, Alumina
ZrO_2	=	Zirconium Dioxide, Zirconia
MgO	=	Magnesium Oxide, Magnesia
SiC	=	Silicon Carbide
Si_3N_4	=	Silicon Nitride

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการของอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้า รวมไปถึงความต้องการของอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมกระบวนการ ได้ผลักดันให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อทำความสะอาดแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1,000°C ในอุตสาหกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรมเคมี รวมถึงในกระบวนการเผา (Incineration) ความจำเป็นต้องทำความสะอาดแก๊สได้เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อบังคับของกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของอนุภาคฝุ่น แก๊สกรด สารประกอบของโลหะหนัก ไฮโดรเจนคลอไรด์และสารอินทรีย์คลอไรด์ อย่างเช่น ไดออกซินและฟูแรน เหตุผลที่สนใจทำความสะอาดแก๊สร้อนมากกว่าแก๊สเย็นนั้นมีหลากหลายและแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะรวมถึงความต้องการที่จะคงสภาพไว้เหนือจุดน้ำค้างกรด และเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของกระบวนการให้เพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการทำความสะอาดแก๊สกระบวนการที่อุณหภูมิสูง ทำให้การกำจัดส่วนประกอบที่เป็นแก๊สมลพิษด้วยเทคนิคการสครับแบบแห้ง (Dry Scrubbing) สามารถกระทำไปพร้อมกันได้เลย นอกจากนี้แล้ว ข้อดีอีกประการหนึ่งของการทำความสะอาดแก๊สที่อุณหภูมิสูง จะเกี่ยวข้องกับการก่อกำเนิดขึ้นใหม่ของสารอินทรีย์คลอไรด์ อย่างเช่น ไดออกซิน ซึ่งปัจจุบันเชื่อกันว่าถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาเมื่อแก๊สเหล่านี้ถูกทำให้เย็นตัวลง ดังนั้นการกำจัดอนุภาคที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวออกไป จะช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยสารประกอบที่เป็นพิษเหล่านี้ออกสู่บรรยากาศได้อีกทางหนึ่งด้วย

อุปกรณ์จับเก็บฝุ่นแบบดั้งเดิมที่มีอยู่นั้น ไม่ว่าจะเป็นเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง หรือเครื่องแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต มีข้อจำกัดเมื่อนำไปใช้กรองฝุ่นออกจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง การพัฒนาอุปกรณ์จับเก็บฝุ่นแนวใหม่ที่สามารถจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง (โดยไม่ต้องทำแก๊สนั้นให้เย็นก่อน) จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในบรรดาเทคโนโลยีต่างๆ ที่กำลังพัฒนาอยู่ในปัจจุบัน การกรองด้วยตัวกรองเซรามิกถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีก้าวหน้าล่าสุดสำหรับการดักจับอนุภาคฝุ่นออกจากแก๊สร้อน ทั้งนี้เนื่องจากตัวกรองชนิดดังกล่าวมีความแข็งแกร่งเชิงกลสูง ทนต่อความร้อนและสารเคมี โดยเฉพาะไอน้ำและไอของสารแอลคาไล จากประสบการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันได้แสดงให้เห็นแล้วว่า เทคโนโลยีนี้สามารถบรรลุประสิทธิภาพการจับเก็บ (Collection Efficiency) ที่สูง อีกทั้งอุณหภูมิและความดันลดในระบบยังต่ำอีกด้วย โดยทั่วไประบบตัวกรองเซรามิกจะเดินเครื่องเป็นวัฏจักร โดยแก๊สปนฝุ่นจะไหลเข้าอุปกรณ์กรองภายใต้ความดัน และส่วนมากจะไหลจากด้านนอกสู่ด้านใน เกิดการสะสมตัวของฝุ่นที่ผิวด้านนอกของตัวกรองในรูปของเค้ก (Cake) หลังจากถึงเวลาที่กำหนดไว้หรือเมื่อความต้านทานต่อการไหลถึงระดับที่กำหนดไว้ ตัวกลางที่ใช้กรองจะถูกทำความสะอาด วิธีการทำความสะอาดที่ใช้กันบ่อยที่สุดก็คือ การพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงในลักษณะพัลส์เข้าทางด้านผิวสะอาดของตัวกรอง (ย้อนทางของแก๊สสกปรก) โดยไม่ต้องหยุดการกรอง

เค้กที่หลุดออกมาจะตกลงสู่ถังรองรับทางด้านล่างของหน่วยกรอง จากนั้นวัฏจักรการกรองก็กลับมาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง

ปัจจุบัน ตัวกรองเซรามิกที่มีจำหน่ายในต่างประเทศยังมีราคาแพงมาก จึงทำให้ยังไม่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายภายในประเทศ การวิจัยหาวัสดุเซรามิกที่มีความเหมาะสมและมีราคาไม่แพงนัก จึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาและวิจัยกันอย่างจริงจังต่อไป

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาเยื่อแผ่นเซรามิก (Ceramic Membrane) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นในอุตสาหกรรมอาหาร (การทำให้ใสในอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้และเบียร์) อุตสาหกรรมการผลิตน้ำดื่มและในโรงงานบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์กรองฝุ่นออกจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง สำหรับใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน รวมไปถึงโรงงานอุตสาหกรรมเคมีอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ผลิตแผ่นเซรามิกแบบแผ่นกลมที่เหมาะสำหรับนำไปใช้กรองฝุ่นออกจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ผลิตแผ่นกรองเซรามิกจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
2. ตรวจวัดคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ เช่น ขนาดรูพรุน ปริมาณรูพรุน ความแข็งแรงเชิงกล
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วในการกรอง ค่าความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิก ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่น และการไล่ฝุ่นออกจากแผ่นกรองเซรามิก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แผ่นกรองเซรามิกที่สามารถกรองฝุ่นขนาด 0.1-10 μm
2. ได้เทคโนโลยีในการผลิตแผ่นกรองเซรามิกจากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ
3. ได้แผ่นกรองเซรามิก สำหรับใช้เป็นต้นแบบในเชิงอุตสาหกรรม

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมตัวกรองเซรามิก

Auriol และ Gilot [3] ได้ทำการผลิตเยื่อแผ่นอะลูมินาเซรามิกแบบท่อกลวงรูพรุนไม่สมมาตร โดยเสนอการผลิตเยื่อแผ่นไว้ 3 แบบคือ แบบที่ 1 เป็นเยื่อแผ่นที่มีชั้นรองรับ 1 ชั้น และชั้นผิว 2 ชั้น โดยผ่านการขึ้นรูปแบบ Extrusion และอบที่อุณหภูมิ 180ºC ในบรรยากาศรีดักชัน จากนั้นเคลือบผิวอะลูมินาที่มีความหนืด 5 Poise โดยวิธี Slip Casting ได้ความหนา 24 μm โดยเคลือบไว้ที่ผิวด้านใน จากนั้นนำไปเผาอบผนึกที่ อุณหภูมิ 1,550ºC ในบรรยากาศออกซิเดชัน และเคลือบชั้นผิวอีกชั้นลงบนชั้นผิวที่ 1 ด้วย TiO_2 ความหนืด 5 Poise โดยวิธี Slip Casting แล้วนำไปเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,000ºC แบบที่ 2 ผลิตเยื่อแผ่นโดยใช้วัสดุและวิธีการเหมือนแบบที่ 1 แต่จะต่างกันที่ชั้นผิวที่สองนั้นจะเคลือบบนผิวด้านนอกของชั้นรองรับ ส่วนแบบที่ 3 เป็นเยื่อแผ่นที่มีชั้นรองรับ 2 ชั้นและมีชั้นผิว 1 ชั้น โดยชั้นรองรับจะขึ้นรูปด้วยวิธี Coaxial Extrusion ได้ชั้นรองรับ 2 ชั้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 180ºC ในบรรยากาศรีดักชัน จากนั้นเคลือบชั้นผิวด้วยอะลูมินาโดยวิธี Slip Casting โดยเคลือบที่ผิวด้านในของชั้นรองรับ จากนั้นเผาอบผนึกต่อที่อุณหภูมิ 1,550ºC ในบรรยากาศออกซิเดชัน

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นแบบที่ 1 และ 2 พบว่าความสามารถในการยอมให้น้ำและอากาศซึมผ่านหรือเรียกอีกอย่างว่าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของเยื่อแผ่นแบบที่ 2 สูงกว่าแบบที่ 1 ประมาณ 1.25 เท่า เนื่องจากการเคลือบชั้นผิวด้านนอกส่งผลให้ชั้นผิวมีพื้นที่ผิวมากกว่าเยื่อแผ่นแบบที่ 1 สำหรับแบบที่ 3 มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 1 แต่สามารถทนความดันได้สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมีความหนามากกว่าจึงแข็งแรงและสามารถรับแรงดันได้สูงกว่า ซึ่งสรุปได้ว่า ความหนาและพื้นที่ผิวมีผลต่อความแข็งแรงและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เป็นอย่างมาก

Raileanu และคณะ [4] ได้ทำการเตรียมเยื่อแผ่นซีโอไลต์ (Zeolite) ที่ไม่มีชั้นรองรับ 2 ชนิด คือ Silicalite 1 และ 2 กับแบบมีชั้นรองรับที่ทำจากอะลูมินา โดยทั้งหมดใช้การเตรียมโดยวิธี Hydrothermal Sol–Gel Synthesis นอกจากนี้ ยังทำการศึกษาอิทธิพลของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่ง SiO_2, อุณหภูมิของระบบ Thermal Treatment และการมีชั้นรองรับเซรามิกของซีโอไลต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการถูกตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติต่างๆ โดยการใช้ X-Ray Diffraction, IR Spectroscopy และ Scanning Electron Microscope ผลที่ได้คือ แหล่ง SiO_2 มีความสำคัญมาก และส่งผลต่อผลิตภัณฑ์สุดท้ายของแผ่นซีโอไลต์คือ ถ้าใช้สารละลาย Colloidal Silica Sol (ZCS) เป็นโซลจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็น ZSM-11 (Silicalite-2) ขณะที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (ZSS) จะได้

เป็น ZSM-5 (Silicalite-1) ส่วนแผ่นที่มีอะลูมินาเป็นชั้นรองรับจะทำให้การเกิดนิวคลิเอชันและออเดอริงของกระบวนการเกิดผลึกแก้ว (Crystallization) ของ ZSM-5 ได้ดีขึ้น

Terpsta และคณะ [5] ทำการศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดไมโครฟิลเตรชันและนำเยื่อแผ่นที่ผลิตได้มาเป็นชั้นรองรับในการผลิตเยื่อแผ่นสำหรับอัลตราฟิลเตรชัน สำหรับแก๊สเพอมีเอชันจะผลิตชั้นรองรับจากแอลฟาอะลูมินา (α - alumina) โดยกระบวนการ Extrusion จากนั้นนำไปเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,600ºC และเคลือบ Slip ที่เป็นแอลฟาอะลูมินาลงบนชั้นรองรับที่ทำการเผาอบผนึกแล้ว ต่อมานำไปเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,200ºC จะได้ชั้นผิวหนา 30 μm พบว่าความหนาของชั้นผิวขึ้นอยู่กับความเร็วของอนุภาคที่ตกตามแรงโน้มถ่วงในน้ำ Slip ที่ใช้ในการเคลือบชั้นรองรับ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนืดของ Slip ถ้า Slip มีความหนืดมากให้ควบคุมโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอลฟาอะลูมินาใน Slip ให้น้อยลง

Jo และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาลักษณะของ Composite Ceramic Membrane โดยการนำเอาเยื่อแผ่น (Membrane) ที่เตรียมมาจาก Titanium และเถ้าลอยมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งทั้งสองจะมีโครงสร้างเป็นแบบ Packed Bed ที่มีความหนาน้อยกว่า 100 μm โดยเยื่อแผ่น Titania จะมีขนาดรูพรุนเล็กและละเอียดกว่าเยื่อแผ่นเถ้าลอย ซึ่งผลจากการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า ความดันลดที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดลอง และจากการทำนายตามความสัมพันธ์ของ Kozeny-Carman มีความแตกต่างกัน และมีความแปรปรวนที่เยื่อแผ่นเถ้าลอยมากกว่า นอกจากนี้ยังพบด้วยว่า อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการไหลผ่าน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของเยื่อแผ่นทั้งสอง พบว่ามีค่าสูงกว่า 99%

เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์ และคณะ [7] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่อง Extruder แบบสกรูเพื่อใช้ในการขึ้นรูปเซรามิกให้มีลักษณะเป็นท่อกลวง โดยทำการทดลองใช้กับดินเหนียว พบว่าท่อกลวงที่มีส่วนผสมที่เป็นน้ำในปริมาณ 18 – 20% ให้ผลค่อนข้างดีคือ สามารถดัดให้ตรงได้อีกทั้งไม่แตกหรือร้าวเมื่อแห้ง ซึ่งส่วนผสมที่มีความชื้นต่ำจะทำให้ดินแห้งและแข็งอยู่ภายใน Barrel แต่ถ้ามีปริมาณความชื้นสูง ดินที่เหลวมากจะเกาะติดกับสกรู (Screw)

ชัชวาลย์ สุขมั่น [8] ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตชั้นรองรับเยื่อแผ่นอะลูมินารูปแบบท่อให้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 5 – 10 μm พบว่าส่วนผสมและสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตคือ ผงอะลูมินา, Sodium Carboxy Methyl Cellulose (CMC), Zinc Stearate, ผงคาร์บอนและน้ำกลั่น ในปริมาณ 62.90, 2.50, 0.65, 2.5 และ 31.45%wt ตามลำดับ จากนั้นนำไปเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,700ºC เป็นเวลา 3 h พบว่าได้ชั้นรองรับเยื่อแผ่นแบบสมมาตรที่แข็งแรงพอใช้งานได้ โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 5.29 μm ปริมาตรรูพรุน 46.68%

นอกจากนั้นยังพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดรูพรุนคือ ปริมาณของผงคาร์บอน โดยอุณหภูมินั้นมีผลกระทบน้อยมาก แต่สำหรับปริมาตรรูพรุน อุณหภูมิจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากที่อุณหภูมิเผาอบผนึกตั้งแต่ 1,600ºC ไปจนถึง 1,700ºC ปริมาตรรูพรุนลดลงจาก 47.14% ไปเป็น 32.53% สำหรับชั้นรองรับเมื่อไปทดสอบการกรอง พบว่าสามารถกักเซลล์ยีสต์ได้ 100% และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 1.94 x10^{7} m^{-1}

ปฏิมา เทพยายน [9] ได้ทำการศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกไมโครฟิลเตรชันที่ขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการ Extrusion แบบแรมใช้ขึ้นรูปชั้นรองรับเยื่อแผ่นและใช้กระบวนการ Slip Casting ในการขึ้นรูปชั้นผิว พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชั้นรองรับคือ ผงอะลูมินา, Sodium Carboxy Methyl Cellulose, Zinc Sterate และน้ำในอัตราส่วน 72.5 : 2 : 0.5 : 25%wt ตามลำดับ จากนั้นนำไปเผาอบผนึกที่อุณหภูมิ 1,600ºC เป็นเวลา 1 h พบว่าได้ชั้นรองรับที่แข็งแรงสามารถนำไปใช้งานได้ โดยชั้นรองรับจะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 1 μm ปริมาตรรูพรุน 44% ความต้านทานการไหลของเยื่อแผ่น 1.30 x 10^{9} m^{-1} นอกจากนั้นยังศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อแผ่นพบว่า ปริมาณน้ำจะเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการ Extrusion และอุณหภูมิเผาอบผนึกที่สูงประกอบกับเวลาในการเผาอบผนึกที่ยาวต่างก็เป็นตัวแปรที่ทำให้รูพรุนมีแนวโน้มลดลง

Jo, et al. [10] ได้ทำการผลิตตัวกรองเซรามิกจากเถ้าลอยของโรงไฟฟ้า โดยวิธีการเคลือบผิวแผ่นตะแกรงเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมด้วยสเลอรี (Slurry) ที่เตรียมจากเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า 38 μm การทดสอบกำหนดคุณลักษณะของตัวกรอง จะพิจารณาในเรื่องขนาดและโครงสร้างรูพรุน ความดันตกคร่อมที่ผ่านตัวกรองและความแข็งแรงเชิงกล จากการทดสอบพบว่ารูพรุนของตัวกรองที่ผลิตขึ้นมามีขนาดเฉลี่ย 2.3 μm และเกรเดียนต์ของความดันแตกต่างเท่ากับ 0.9 kPa l^{-1} min^{-1} นอกจากนี้ตัวกรองที่ได้ยังแสดงความงอได้ (Flexibility) ที่ดีเนื่องจากมีส่วนประกอบที่เป็นโลหะและเซรามิก

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความสามารถในการจับเก็บฝุ่น

Berbner และ Löffler [11] พบว่าเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกไล่ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของเค้กฝุ่นจะเป็นการเพิ่มความดันสูงสุดภายในแท่งตัวกรอง อย่างไรก็ดีที่อุณหภูมิสูง (850ºC) ข้อได้เปรียบของเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกลดทอนลงด้วยแรงเกาะติดของฝุ่น (Cohesive Force) ที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

Kanaoka และ Amornkitbamrung [12] ได้ทำการศึกษาผลของค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ของตัวกรอง (Filter Permeability) ที่มีต่อพฤติกรรมการไล่เค้กฝุ่นออกจากผิวของตัวกรองเซรามิก จากผลการทดลองพบว่า Pressure Trace หลังฉีดพ่นด้วยแก๊สพัลส์ มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของตัวกรอง ในกรณีของตัวกรองที่มีสภาพให้ซึมผ่านได้สูง กระบวนการทำ

ความสะอาดเกือบจะเกิดขึ้นทันทีภายหลังฉีดพ่นด้วยแก๊สพัลส์ สำหรับตัวกรองที่มีสภาพให้ซึมผ่านได้ต่ำ แก๊สสะอาดจะถูกเก็บสะสมไว้ก่อนกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้น

Giernoth และ Renz [13] พบว่ากระบวนการทำความสะอาดไม่เพียงขึ้นอยู่กับสภาพการซึมผ่านของเค้กฝุ่น (Dust Cake Permeability) แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการกรอง (Filtration Velocity) และความหนาของชั้นฝุ่นอีกด้วย การเพิ่มช่วงรอบ (Cycle Duration) หรือเวลาระหว่างการทำความสะอาดด้วยการฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ และการเพิ่มความเร็วในการกรองที่สูงจะทำให้เกิดชั้นฝุ่นมีความหนามากขึ้นและลดสภาพให้ซึมผ่านได้ลง ความเร็วในการกรองที่สูงจะทำให้เกิดชั้นฝุ่นตกค้างที่มีลักษณะเนื้อแน่น เนื่องจากอนุภาคฝุ่นจะหลุดลอดเข้าไปในตัวกลางและเกิดการอัดตัวกันแน่นของเค้กฝุ่น นอกจากนี้ยังพบว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของเค้กฝุ่นไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

Innocentini และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้ในการกรองที่อุณหภูมิสูง โดยทำการเปรียบเทียบเยื่อแผ่นเซรามิก 2 แบบด้วยกัน คือ แบบเยื่อชั้นเดียว (Monolayered) และ แบบเยื่อสองชั้น (Two-Layered) โดยแบบชั้นเดียวจะขึ้นรูปและผลิตเยื่อแผ่นโดยใช้ผงอะลูมินาผสมกับดินเหนียวเพียงอย่างเดียวไม่มีชั้นรองรับ และแบบสองชั้น ชั้นรองรับจะขึ้นรูปโดยใช้ดินเหนียวผสมกับ Kaolin มีรูพรุนสูงและชั้นผิวกรองจะขึ้นรูปตามแบบชั้นเดียวแต่อัตราส่วนต่างกัน เมื่อนำมาตรวจวัดประสิทธิภาพในการกรองที่อุณหภูมิต่างกันจากอุณหภูมิห้องจนถึง 700ºC ของทั้ง 2 แบบ พบว่าทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพในการกรองสูงสำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 μm แต่แบบชั้นเดียวจะมีคุณลักษณะโดยรวมที่ดีกว่า

Hajek และ Peukert [15] ได้ทำการศึกษาการกรองที่อุณหภูมิสูงโดยเปรียบเทียบการกรองของเยื่อแผ่นที่ทำจากเซรามิกและโลหะ สภาวะที่ทำการทดสอบคือ การกรองที่ความเร็ว 2 ถึง 5 m/s และอุณหภูมิอยู่ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 600ºC พบว่าทั้งสองมีประสิทธิภาพในการกรองที่สูง แต่จะแตกต่างกันที่ค่าความดันลด นอกจากนี้ยังได้แนะนำเกี่ยวกับการทำความสะอาดเพื่อที่จะทำให้เยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพสูงอยู่ตลอดเวลา และระบบที่ดีที่ใช้ในการทำความสะอาดเยื่อแผ่นคือ แบบ Pulse Jet

มานะ อมรกิจบำรุง [16] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกรองฝุ่นของตัวกรองเซรามิกและอิทธิพลของความดันแก๊สพัลส์ที่มีต่อการกำจัดเค้กฝุ่น โดยตัวกรองเซรามิกที่ใช้เป็นรูปแท่งกระบอกพื้นที่มีผิวการกรองเท่ากับ 0.051 m^2 ในการทดลองจะดำเนินการที่ความเร็วการกรองเท่ากับ 0.05 m/s ความดันแก๊สพัลส์เท่ากับ 100, 300 และ 500 kPa ระยะเวลาการพัลส์เท่ากับ 200 และ 300 ms ผลที่ได้พบว่า ความดันลดบนตัวกรองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นและจะค่อยๆ ลดช้าลงจนกระทั่งอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันลดมีค่าคงที่ ส่วนประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่นจะเพิ่มขึ้นตาม

ความดันของแก๊สพัลส์ และจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันสูงกว่า 300 kPa ส่วนระยะเวลาการพัลส์แทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่น

Choi และคณะ [17] ทำการทดลองและศึกษาผลกระทบของหัวฉีดที่ใช้พัลส์ทำความสะอาดกับตัวกรองเซรามิกรูปแท่งทรงกระบอกที่มีขายในเชิงพาณิชย์ และติดตั้งตัวกรองในห้องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.52 m ความสูงของห้องติดตั้งตัวกรองสูง 3.2 m โดยทดลองทำการพัลส์ด้วยหัวฉีดต่างขนาดกัน และทำการป้อนฝุ่นในสองลักษณะคือ ทำการป้อนฝุ่นร้อนและเย็น เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความดัน ผลของการใช้หัวฉีดและมุมเปิดที่ปลายหัวฉีดที่มีขนาดแตก ต่างกัน ผลการทดลองสรุปได้ว่า (1) ที่อุณหภูมิสูงจะมีความเหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาดตัวกรองด้วยการพัลส์ (2) ขนาดของหัวฉีดที่เล็กลงจะทำให้ความดันในการพัลส์สูง และ (3) ปลายของหัวฉีดที่ตรงจะทำให้ความดันในการพัลส์สูงกว่าปลายหัวฉีดที่ทำเป็นมุม แต่ต้องระวังไม่ให้ความดันสูงเกินไป เพราะจะทำให้ความดันติดลบที่ทางเข้าของตัวกรอง

Dittler และ Umhauer [18] ได้ศึกษาอิทธิพลในการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้าตัวกรองแข็งเกร็งสำหรับใช้แยกอนุภาคออกจากแก๊สโดยใช้ตัวกรองที่มีการฉาบผิวหน้า ลักษณะของโครงสร้างเป็นใยเซรามิกและโครงสร้างเป็นเม็ดเกรนเซรามิกกับอนุภาคที่มีขนาดในช่วง 0.1-1.0 μm ความเร็วในการกรองเฉลี่ย 5 cm/s ทำการติดตั้งกล้องถ่ายและตัวนับจำนวนอนุภาคบนชุดทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้าตัวกรองทั้งสอง พบว่าตัวกรองที่ทำการฉาบผิวหน้าด้วยลักษณะโครงสร้างเป็นเม็ดเกรนเซรามิก สามารถทำการแยกและเกิดการก่อตัวของอนุภาคบนผิวหน้ามากกว่าตัวกรองที่ฉาบด้วยลักษณะโครงสร้างใยเซรามิก

Choi และ Ahn [19] ทำการศึกษาคุณสมบัติอนุภาคฝุ่นกับการตัวกรองเซรามิกแบบแท่งที่อุณหภูมิสูง การทดลองใช้เครื่องทดสอบร้อนแบบแก๊สไอเสียที่มาจากหัวเผาน้ำมัน (Oil Burner) กับเถ้าลอยโรงไฟฟ้าซึ่งมีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8.5 μm โดยเถ้าลอยของโรงไฟฟ้ามี 2 ชนิดคือเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแบบธรรมดา (PC) และเถ้าลอยโรงไฟฟ้าที่เผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด (FBC) ผลที่ได้คือ ความดันในการพัลส์ทำความสะอาดตัวกรองที่ใช้เถ้าลอย FBC ต่ำกว่าความดันในการพัลส์ทำความสะอาดตัวกรองที่ใช้เถ้าลอย PC จึงสมมติฐานว่าเถ้าลอย FBC เกิดความพรุนของเค้กฝุ่นบนตัวกรองมากกว่าเถ้าลอยแบบ PC

Dittler และ Kasper [20] ทำการศึกษาความถี่ในการทำความสะอาดตัวกรองเซรามิก พบว่าตัวกรองเซรามิกที่ทำความสะอาดไม่หมดจะเกิด “Patchy” แต่จะไม่เป็นสาเหตุของการเกิดเค้กฝุ่นใหม่ที่ไม่สมบูรณ์ และไม่มีผลต่อเค้กฝุ่นที่เหลือ โดยพบว่าตัวกรองเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เกิดเค้กฝุ่นใหม่ ซึ่งความถี่ในการเกิดเค้กฝุ่นใหม่ วัดโดยค่าความสูงของเค้กฝุ่นก่อนและหลังการเกิดเค้กฝุ่นใหม่ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเกิดเค้กฝุ่นใหม่บนตัวกรองเพียงบางส่วนเท่านั้นในวงจรการกรองอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การเกิดเค้กฝุ่นใหม่บนตัวกรองขึ้นอยู่กับชนิดของฝุ่น และสภาวะการทำความ

สะอาดที่ไม่หมดซึ่งสังเกตได้จากพฤติกรรมในการเกิดเค้กฝุ่นใหม่บนตัวกรอง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความดันตกคร่อมตัวกรองเพิ่มขึ้น

Hemmer และ Kasper [21] ได้ทำนายพฤติกรรมตัวกรองเซรามิกจากสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนของเถ้า อุณหภูมิการทดลองอยู่ระหว่าง 200ºC และ 800ºC ความเข้มข้นของฝุ่น 5 g/m^3 เถ้าที่ใช้ได้มาจากการเผาไหม้มวลชีวภาพและของเสียจากชุมชน การวิเคราะห์พฤติกรรมเถ้ากระทำโดยวิธี Dilatometer (DIL) และ Thermo-Gravimetry (TGA) การเปรียบเทียบพฤติกรรมการกรองในช่วงใกล้อุณหภูมิ 500ºC พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 470ºC จะเริ่มเกิด Na_2CO_3 ส่วนการแยกตัวของ $NaHCO_3$ จาก Na_2CO_3 เกิดที่อุณหภูมิ 110–200ºC

Pastila และคณะ [22] ศึกษาผลกระทบของไอน้ำ และอุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างและโมเลกุลของตัวกรองแก๊สร้อนที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์เปลี่ยนไป โดยการทำลายด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูงการใช้งานมากกว่า 10,000 h ทดลองภายใต้ความดันต่ำ ในสภาวะที่มีไอน้ำ ฝุ่น กำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุให้โครงสร้างของตัวกรองแก๊สร้อนเปลี่ยนแปลงไป ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 150ºC ถึง 400ºC ในสภาวะของไอน้ำอุณหภูมิ 850ºC จากผลการทดลองพบว่า การทำลายด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ตัวกรองแก๊สร้อนที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ยังคงใช้งานได้นานกว่าการทำลายด้วยวิธี Thermal Cycling

Yamamoto และคณะ [23] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของเวลาที่มีผลต่อการทะลุผ่านของอนุภาคที่ผ่านรูเล็กๆ ของเยื่อบุผิว โดยใช้ขนาดอนุภาคมาตราฐานเดียวกันคือ 0.2 μm กับตัวกรองสองชนิดซึ่งมีโครงสร้างแบบเส้นใยและโครงสร้างแบบรูพรุน ในการทดลองพบว่าตอนเริ่มต้นการกรอง ขนาดของอนุภาคส่วนใหญ่ที่มีขนาดใหญ่จะถูกกรองก่อน ต่อมาเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะถูกกรอง โดยจะติดอยู่ตามขอบของรูพรุนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ติดอยู่หลังจากนั้นจะเกิดการอุดตันภายในตัวกรอง

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการวิจัยในเรื่องการผลิตตัวกรองที่มีราคาถูกและสามารถใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศ สำหรับนำมาใช้กรองอนุภาคฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งต้องการตัวกรองที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 0.1–10 μm เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรมเคมี รวมถึงกระบวนการเผาที่เกิดขึ้นภายในประเทศ

2.2 เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น

การเลือกระบบเก็บอนุภาคฝุ่นที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

ก. กระบวนการเก็บอนุภาคฝุ่น ซึ่งสิ่งที่ต้องทำการศึกษาคือลักษณะของอนุภาคฝุ่นที่จะเก็บและลักษณะสมบัติการไหลของแก๊สทิ้ง ได้แก่ การกระจายของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความเข้มข้นของอนุภาคในแก๊ส อัตราการไหลของแก๊ส อุณหภูมิ ความชื้น ฤทธิ์กัดกร่อน เป็นต้น

ข. ความต้องการทางด้านอุปกรณ์ ควรคำนึงถึงการติดตั้งเครื่องเก็บฝุ่น มีการใช้น้ำในกระบวนการเก็บหรือไม่เพื่อที่จะได้นำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ การกำจัด (Dispose) ฝุ่นที่รวบรวมได้ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By Product) และขีดจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้ง

ค. ค่าใช้จ่ายของกระบวนการ ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่ากำจัดของทิ้ง ค่าน้ำกระบวนการ ค่าวัสดุ ค่าประกันภัย ค่าใช้จ่ายในการศึกษาทางวิศวกรรม ค่าก่อสร้าง เป็นต้น เพื่อใช้ในการตัดสินในเลือกเครื่องเก็บฝุ่นที่เหมาะที่สุด

เครื่องเก็บฝุ่นที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งประเภทตามกลไกของการแยกฝุ่นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นและลักษณะสมบัติของอนุภาคฝุ่น [24]

ประเภทของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่น	อนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่แยกเก็บได้ (μm)	ความดันสูญเสีย (mmH_2O)	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	ความเข้มข้นที่ทางเข้า (g/m^3)	หมายเหตุ
แบบแรงโน้มถ่วง	20	~15	1,000	~10	ใช้ติดตั้งหน้าเครื่องแบบอื่น
แบบแรงเฉื่อย	20	~50	1,000	~10	ใช้ติดตั้งหน้าเครื่องแบบอื่น
ไซโคลน	1	~200	1,000	~5	โครงสร้างแบบง่าย
แบบถุงกรอง	0.01	~200	250	0.1~20	ใช้กับแก๊สควบแน่นไม่ได้
แบบชั้นของวัสดุเม็ด	0.1	~300	1,000	0.1~20	ยังใช้กันไม่แพร่หลาย
แบบสครับเบอร์	0.2	~2,000	-	1-100	ต้องมีอุปกรณ์บำบัดน้ำทิ้ง
แบบไฟฟ้าสถิต	0.02	~30	1,000	1~50	ห้ามใช้กับแก๊สที่ระเบิดได้

ในแง่ของสมรรถนะในการเก็บอนุภาคฝุ่นแล้ว เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบถุงกรอง (Bag House) จะดีที่สุด แต่เนื่องจากความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านถุงกรองต้องมีค่าต่ำมากคือประมาณ 1 m/s ดังนั้นเครื่องแบบนี้ต้องมีขนาดใหญ่มากจึงจะบำบัดแก๊สปริมาณมาก ๆ ได้ นอกจากนี้ยังไม่สามารถทนแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสูงมากไม่ได้ ในกรณีดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) แทน เพราะสามารถบำบัดแก๊สความเร็วสูงและแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงได้ด้วย ถึงแม้ว่าจะมีลักษณะสมบัติในการเก็บอนุภาคฝุ่นด้อยกว่าเครื่องแบบถุง

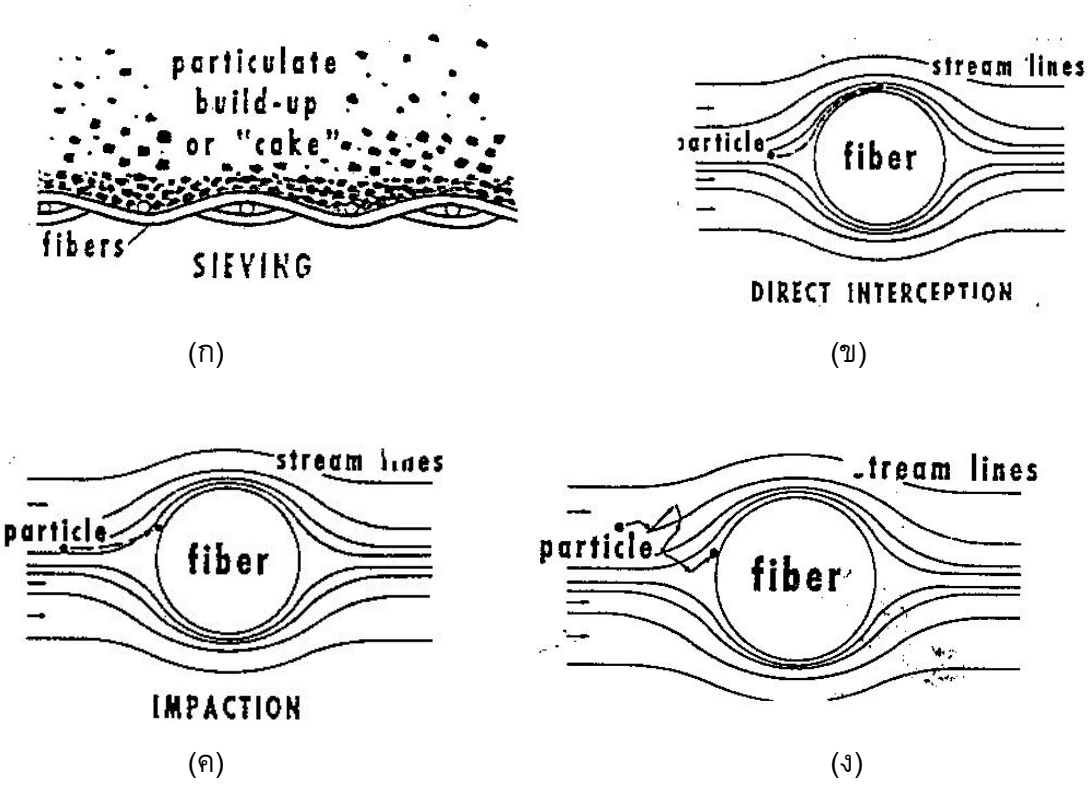
กรองเล็กน้อย อนึ่งเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบสครับเบอร์บางชนิดก็มีสมรรถนะในการเก็บอนุภาคฝุ่นดีเลิศ แต่ความดันสูญเสียจะมีค่าสูงตาม และยังก่อปัญหาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากการเก็บอนุภาคฝุ่นด้วย ดังนั้น ในปัจจุบันจึงไม่ค่อยใช้เครื่องแบบนี้เพื่อจุดประสงค์เก็บอนุภาคฝุ่นเพียงอย่างเดียว

2.3 การกรองอนุภาค

ฝุ่น (Dust) หมายถึง มวลสารอนุภาค (Particulate Matter) ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งเท่านั้น และสามารถแขวนลอยในบรรยากาศได้ชั่วคราว [25] ถ้าหากอนุภาคของแข็งนี้มีขนาดโตมากกว่า 100 μm อาจเรียกว่า อนุภาคหยาบ (Coarse Particle) และเล็กกว่า 100 μm เรียกว่าอนุภาคละเอียด (Fine Particle)

การกรอง (Filtration) หมายถึงการแยกอนุภาคออกจากของไหลอันได้แก่ แก๊สและของเหลว โดยการผ่านตัวกลางที่มีรูพรุนหรือเรียกว่า “ตัวกรอง” ที่ขนาดรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่จะกรอง สำหรับตัวกรองแต่ละตัวจะมีกลไกในการกักอนุภาคอย่างน้อย 1 กลไกในการดักอนุภาค ซึ่งกลไกที่ใช้ในการดักอนุภาคของตัวกรองมีดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 2.1

1. Sieving เรียกอีกอย่างว่า Screening Straining จะดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างเปิดของตัวกรองทำหน้าที่คล้ายกับตะแกรงร่อน
2. Direct Interception อนุภาคที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในเส้นกระแสการเคลื่อนที่เมื่อผ่านตัวกรอง อนุภาคจะดูดติดกับโครงสร้างของตัวกรองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces)
3. Inertial Impaction การชนตัวกรองโดยตรงของอนุภาคเนื่องจากแรงเฉื่อยในการเคลื่อนที่
4. Diffusion เกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ จะมีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian Motion) ทำให้เพิ่มโอกาสในการพุ่งชนหรือติดกับตัวกรองได้มากเพิ่มขึ้น
5. Gravitation Settling เป็นการตกตัวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ลงบนตัวกรอง หรือลงสู่ฮอปเปอร์ (Hopper) เบื้องล่าง
6. Electrostatic Attraction เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตของอนุภาคกับตัวกรองหรือระหว่างอนุภาคกับอนุภาคด้วยกัน ทำให้อนุภาคติดกับตัวกรองได้หรือจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคฝุ่นซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดักอนุภาคของตัวกรองและทำความสะอาดตัวกรองที่ดีขึ้น
7. Filter Dust Cake เป็นกระบวนการที่ถูกสร้างโดยชั้นเค้กฝุ่นบนตัวกรองทำให้ตัวกรองสามารถดักอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีมากขึ้น
8. Flow Aid Cake จะเป็นการดักจับแบบให้ผงฝุ่น หรือชั้นฝุ่นมาให้ทำหน้าที่ช่วยในการดักอนุภาคให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นและบางตัวสามารถทำหน้าที่ในการลด SO_2 ได้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกลไกการดักอนุภาคของตัวกรอง: (ก) Sieving (ข) Direct Interception (ค) Inertial Impaction (ง) Diffusion

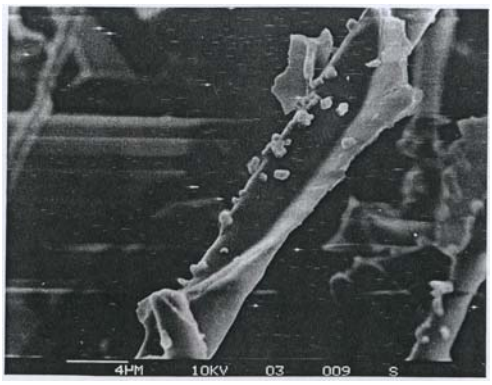
และเมื่อแบ่งกระบวนการกรองตามลักษณะการกรองจะแบ่งออกเป็น 2 แบบหลักๆ ด้วยกันคือ “Depth Filtration” และ “Surface Filtration” ดังรูปที่ 2.2

Depth Filtration จะเป็นการกรองอนุภาคฝุ่นออกจากแก๊สโดยใช้หลักให้อากาศไหลผ่านเข้าไปในตัวกรอง ลักษณะของโครงสร้างภายในของตัวกรองจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดอนุภาคฝุ่นเอาไว้ ส่วนใหญ่ตัวกรองที่ใช้จะอยู่ในรูปเส้นใย ส่วน Surface Filtration ตัวกรองจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวกีดกันที่คอยดักอนุภาคฝุ่นไว้ เกิดการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นที่ชั้นผิวด้านนอกของตัวกรองในรูปของเค้ก (Cake)

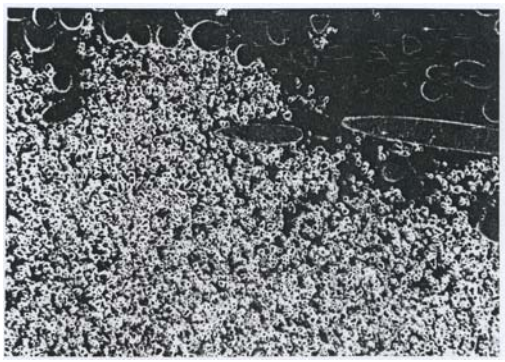
ในทางปฏิบัติแล้วนั้น การกรองจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทั้งฝุ่นและตัวกลางที่มาทำเป็นตัวกรองไม่ใช่เฉพาะขนาดของรูพรุนในตัวกรองเท่านั้น แต่ยังจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกาะตัวกันของอนุภาคฝุ่นและความสามารถการเกาะกับตัวกรองด้วย โดยปกติในการทำความสะอาดแก๊สโดยใช้ตัวกรองที่เป็นวัสดุเซรามิกจะเป็นการกรองแบบ Surface Filtration แต่การเกิดการกรองแบบ Surface Filtration อย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยาก เพราะว่าในกระบวนการจริงนั้นมักจะมีอนุภาคฝุ่น

สามารถเล็ดลอดเข้าไปในตัวกรองได้ก่อนที่จะมีการทำความสะอาดตัวกรองเกิดขึ้น ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่ค้างอยู่ภายในตัวกรองจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองค่อยๆ ลดลง

สำหรับระบบตัวกรองเซรามิกจะทำงานเป็นแบบวงจรวัฏจักร เริ่มต้นจากแก๊สปนฝุ่นจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์กรองภายใต้ความดันโดยจะไหลจากด้านนอกตัวกรองเข้าสู่ภายในตัวกรอง เกิดการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นด้านนอกผิวตัวกรองเกิดเป็นชั้นเค้ก หลังจากถึงเวลาหรือความต้านทานการไหลตามที่กำหนดไว้ ตัวกรองจะถูกทำความสะอาดโดยการพ่นแก๊สพัลส์เข้าทางด้านผิวของผิวเซรามิกที่สะอาด(Backwash Cleaning) ชั้นเค้กจะหลุดออกมา จากนั้นวัฏจักรการกรองก็กลับมาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง [26]



(ก)



(ข)

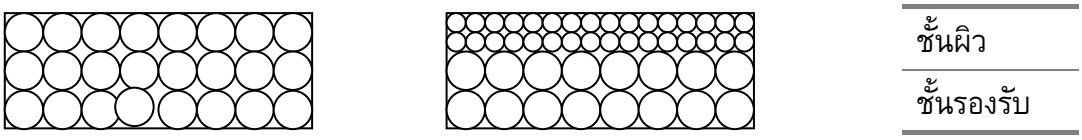
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพของ (ก) Depth Filtration และ (ข) Surface Filtration [26]

2.4 โครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิก

เยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้เมื่อพิจารณาตามลักษณะพื้นผิวและรูพรุน สามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างของเยื่อแผ่นเป็น 2 แบบ คือ

2.4.1 โครงสร้างแบบสมมาตร (Symmetric Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างรูพรุนสม่ำเสมอตลอดความหนาของเยื่อแผ่น ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.3 (ก)

2.4.2 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีโครงสร้างหลายชั้น ประกอบด้วยชั้นรองรับซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งเพอมีเอทสามารถผ่านได้อย่างสะดวก นอกจากนี้ชั้นรองรับยังทำหน้าที่เสริมความเข็งแรงให้กับเยื่อแผ่นด้วย และชั้นผิวซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นชั้นที่มีหน้าที่ในการกรองโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



(ก) โครงสร้างแบบสมมาตร (ข) โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

รูปที่ 2.3 โครงสร้างรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิก [8]

2.5 วัสดุสำหรับผลิตเยื่อแผ่นเซรามิก

วัสดุที่นิยมนำมาผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

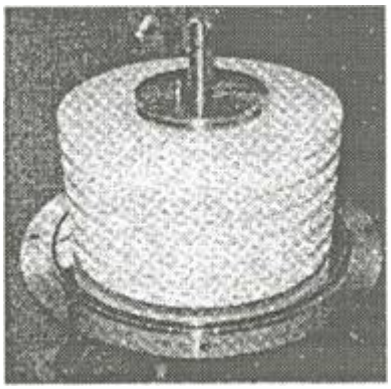
1. กลุ่มออกไซด์ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) เซอร์โคเนีย (ZrO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ ไททาเนีย (TiO_2)
2. กลุ่มที่ไม่ใช่ออกไซด์ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โบรอนไนไตรด์ (B_3N_5) และอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN)

การเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาผลิตเยื่อแผ่นนั้นมีความสำคัญมาก เพราะว่าจะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเยื่อแผ่น ความเหมาะสมกับการใช้งานและยังสามารถลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย จากกลุ่มเซรามิกที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีแตกต่างกันไป คือ กลุ่มออกไซด์ มีราคาถูกและผลิตได้ง่ายกว่า ส่วนกลุ่มที่ไม่ใช่ออกไซด์จะให้ความแข็งแรงและสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า [27]

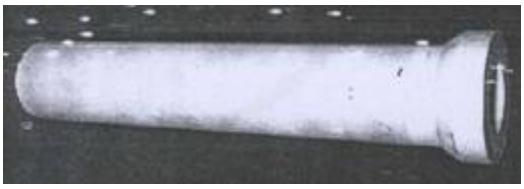
2.6 รูปแบบของตัวกรองเซรามิก

รูปแบบทั่วไปของตัวกรองเซรามิก ที่ใช้ในงานด้านทำความสะอาดแก๊สมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

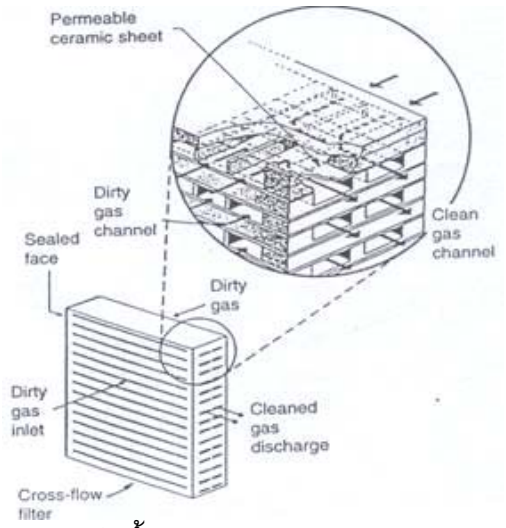
- แบบแผ่น (Disk) ในรูปที่ 2.4 (ก)
- แบบแท่ง (Candle) ในรูปที่ 2.4 (ข)
- แบบรังผึ้ง (Multichannel Monolith หรือ Westinghouse Cross-Flow Filter) ในรูป 2.4 (ค)



(ก) แบบแผ่น (Disk) [26]



(ข) แบบแท่ง (Candle) [16]



(ค) แบบรังผึ้ง (Multichannel Monolith) [26]

รูปที่ 2.4 รูปแบบของตัวกรองเซรามิก

2.7 วิธีการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิก

การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกประกอบไปด้วยขั้นตอนสำคัญต่างๆ ดังนี้

2.7.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคอะลูมินามีความสำคัญต่อเยื่อแผ่นที่ต้องการผลิตเป็นอย่างมาก ถ้าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็ก เยื่อแผ่นที่ได้จะมีความหนาแน่นมาก ส่วนการใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เยื่อแผ่นที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ แต่ขนาดรูพรุนที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่า สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดอนุภาคที่มีอยู่ พิจารณาจากหลักการทำงานจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

2.7.1.1 เทคนิคการใช้ตะแกรง (Sieving) เป็นวิธีการคัดขนาดอนุภาคที่ง่าย อาศัยหลักการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ซึ่งมีรูเปิดขนาดมาตรฐานซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 โดยกำหนดให้ขนาดของรูเปิดมาตรฐานที่อนุภาคสามารถผ่านได้นั้นเป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคด้วย การทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ ทำได้โดยการเขย่าหรือใช้ลมเป่า เป็นต้น สำหรับเทคนิคการใช้ตะแกรงนี้จะเหมาะสมกับอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ คือ สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วงประมาณ 44 - 250 μm เท่านั้น เนื่องจากว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 44 μm มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเกาะกันของอนุภาค (Agglomerate) แต่ในบางบริษัทมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มขีดความสามารถเครื่องมือให้มากขึ้น โดยให้ทำงานในน้ำหรืออาจเป็นของเหลวชนิดอื่น เรียกว่า “Wet Sieve” ซึ่งจะเขย่าโดยใช้คลื่นเสียงทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนไหว ผงขนาดเล็กที่เกาะกันจะแตกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ซึ่งวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาได้ดี สามารถคัดขนาดอนุภาคได้ถึง 2 μm [28]

ตารางที่ 2.2 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน ASTM [28]

มาตรฐาน ASTM	
เบอร์เรียก (Mesh)	**ช่องเปิด (μm)**
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

2.7.1.2 เทคนิคการตกตะกอน (Sedimentation) สำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้วิธีนี้เป็นไปตามกฎของสโตกส์ (Stokes' Law) ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารตัวกลางภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก เป็นไปตามสมการ 2.1 ดังต่อไปนี้

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

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 cm พบว่าผงอะลูมินาขนาด 10 μm ใช้เวลา 1 min แต่อะลูมินาขนาด 1 μm ใช้เวลาถึง 2 h [29] ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตออกแบบให้เครื่องมือทำงานภายใต้แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลาง แทนที่จะเป็นแรงโน้มถ่วงของโลก ทั้งนี้เพื่อให้เวลาของการวิเคราะห์ลดน้อยลงโดยเฉพาะกรณีที่อนุภาคขนาดเล็ก บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้หลักการตกตะกอนนี้แสดงในตารางที่ 2.3

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคนั้น บางบริษัทจะใช้วิธีชั่งน้ำหนักของผงอะลูมินาที่ตกลงมาที่เวลาหนึ่งๆ แต่วิธีการนี้เป็นวิธีการแบบเก่า ให้ผลไม่แม่นยำ บางบริษัทที่ผลิตใช้วิธีวัดความเข้มของแสง เมื่อผงอะลูมินาที่ตกลงมาที่เวลาหนึ่งๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางตรวจจับซึ่งติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งถ้าอนุภาคมีปริมาณมากความเข้มของแสงจะลดลงมาก [28] ซึ่งจะได้ผลดีกว่าวิธีแบบเก่า เครื่องมือวัดที่ใช้วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดขนาดอนุภาคที่มีหลายชนิดรวมกัน เนื่องจากแต่ละชนิดมีความหนาแน่นต่างกันทำให้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผิดพลาดได้

ตารางที่ 2.3 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการตกตะกอน [29]

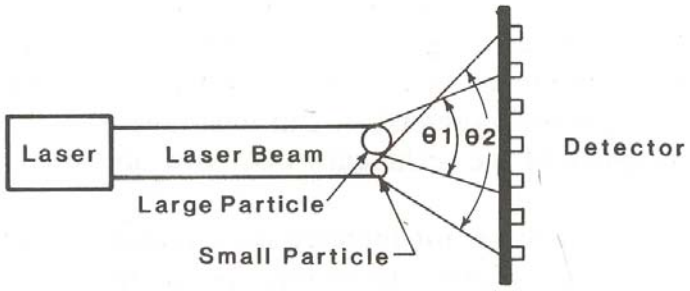
บริษัท/ ผู้ผลิต	เครื่องมือวัด	ขนาดอนุภาค (μm)	หลักการ
Brookhaven	BI-XDC	0.01 – 100	X-Ray Sedimentation Centrifuge
Fritsch/Antal Direct	Analysette 20	0.5 – 500	Photosedimentation
Micrometrics	Sedi Graph 5100	0.1 – 300	X-Ray Sedimentation
Quantachrome	Microscan	0.1 – 300	X-Ray Sedimentation
Shimadzu	SA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

2.7.1.3 เทคนิคการใช้ Laser Diffraction เทคนิคนี้อาศัยหลักการพื้นฐานของแสง เมื่อเดินทางไปกระทบอนุภาคจะเกิดการกระเจิงหรือการหักแหของแสง โดยมุมการกระเจิงจะแปรผกผันกับขนาดอนุภาค ซึ่งบริษัทผู้ผลิตที่ใช้หลักการนี้ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้หลักการ Laser Diffraction [29]

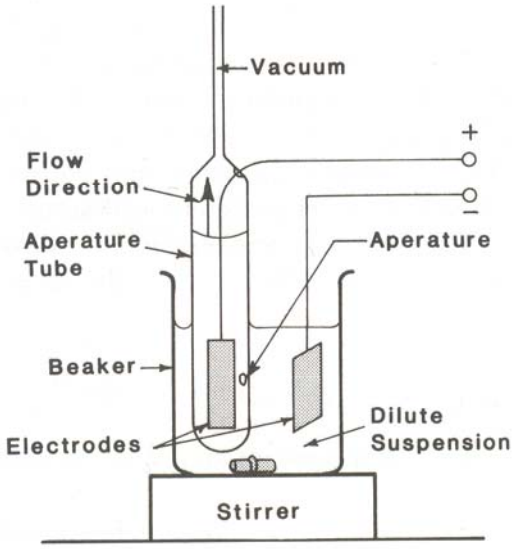
บริษัท / ผู้ผลิต	เครื่องมือวัด	ขนาดอนุภาค (μm)
Coulter	LS Series	0.1-800
Fritsch / Antal Direct	Analysette 22	0.16-1160
Leeds &Northrup	Microtrac FRA	0.1-700
Malvern	Mastersizer Series	0.1-600
Shimadzu	SALD - 1100	0.1-500

ลักษณะของเครื่อง Laser Diffraction แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยเริ่มต้นจากลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงผ่านสารแขวนลอย เมื่อกระทบกับอนุภาค ลำแสงจะเกิดการกระเจิงเป็นมุมกระเจิงมีขนาดเท่าไหร่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค กล่าวคือ ถ้าขนาดอนุภาคเล็กมุมกระเจิงก็จะเป็นมุมใหญ่ และตัวตรวจวัดก็จะจับความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมา ถ้าความเข้มแสงมากแสดงว่าอนุภาคขนาดนั้นๆ มีปริมาณมากทำให้ทราบการกระจายขนาดอนุภาค เครื่องมือวัดที่ใช้วิธีนี้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความเที่ยงตรงในการวิเคราะห์ ใช้เวลาค่อนข้างน้อยประมาณ 5 นาทีในการวิเคราะห์ และใช้ได้กับผงหลายชนิดในครั้งเดียวกัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น



รูปที่ 2.5 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Laser Diffraction [26]

2.7.1.4 เทคนิค Electrical Sensing ลักษณะของเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้หลักการนี้ แสดงในรูปที่ 2.6 โดยลักษณะการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะคล้ายกับวิธีการใช้ตะแกรง กล่าวคือ จะใช้หลอด Aperature โดยใช้แม่เหล็กเป็นเครื่องกวนสารเพื่อให้อนุภาคในสารแขวนลอยเกิดการเคลื่อนที่ จากนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดจะผ่านเข้าไปในหลอด ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ายังค้างอยู่ภายนอก เมื่ออนุภาคผ่านช่องเปิดนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดความต้านทานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเพิ่มขึ้น ซึ่งความต้านทานที่เกิดขึ้นนี้เครื่องมือจะแปรผลเป็นปริมาณของขนาดอนุภาคนั้น โดยค่าของความต้านทานยิ่งมาก แสดงว่ามีปริมาณของขนาดอนุภาคนั้นมาก



รูปที่ 2.6 เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคโดยใช้วิธี Electrical Sensing [26]

2.7.2 การเลือกสารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกมีด้วยกันหลายชนิดดังตารางที่ 2.5 [30] ซึ่งในการเลือกใช้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการผลิตขึ้น แต่โดยส่วนใหญ่สารเติมแต่งที่ใช้กันในงานทั่วๆไปจะได้แก่ สารพวกเชื่อมประสาน (Binder) สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) สารหล่อลื่น (Lubricant) และสารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)

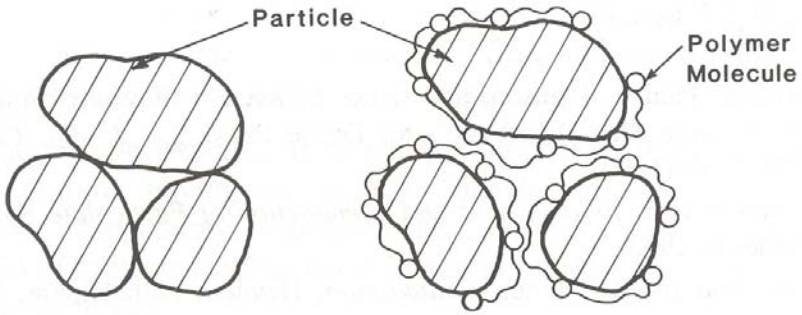
ตารางที่ 2.5 กลไกการทำงานของสารเติมแต่ง [30]

สารเติมแต่ง	คุณสมบัติ
สารเชื่อมประสาน (Binder)	เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา และช่วยให้เกิดการหล่อลื่น
สารหล่อลื่น (Lubricant)	ช่วยการถอดแบบ ลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและอนุภาคกับผนังแบบ
สารช่วยการอัดตัว (Compaction Aid)	ช่วยการจัดเรียงตัวระหว่างการอัดแบบ
สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer)	ช่วยการไหลตัวของสเลอรี ทำให้ฟิล์มของสารเชื่อมประสานมีความยืดหยุ่นตัวทำให้แกรนูลเสียรูปแบบพลาสติก
สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)	ปรับ pH ควบคุมประจุที่ผิวอนุภาค
Wetting Agent	ลดแรงตึงผิว (Surface Tension)
Antistatic Agent	ควบคุมประจุ
Antifoaming Agent	ป้องกันการเกิดโฟมหรือฟอง
Foam Stabilizer	ทำให้เกิดโฟม
สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)	ยับยั้งความไวต่อปฏิกิริยาของประจุที่ไม่ต้องการ
Fungicide / Bactericide	ช่วยป้องกัน/ลดโอกาสการเสื่อมสภาพ เนื่องจากเชื้อราหรือแบคทีเรีย
Sintering Aid	ช่วยการผนึกอนุภาค
Dopants	ปรับสมบัติทางไฟฟ้า แม่เหล็กและทางแสง
Phase Stabilizers	ควบคุมเฟสหรือผลึกที่เกิดขึ้น

2.7.2.1 สารเชื่อมประสานหรือตัวประสาน (Binders) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของสาร คือ

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

ในปัจจุบันตัวประสานอินทรีย์ได้รับความนิยมมาก ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด ดังตารางที่ 2.6 เนื่องมาจากให้ความเหนียวและความแข็งแรงแก่ชิ้นงานเซรามิกได้อย่างดี อีกทั้งยังสามารถกำจัดได้ง่ายเมื่อนำชิ้นงานไปทำการเผาอบผนึก การเชื่อมอนุภาคเซรามิกด้วยตัวประสานแสดง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเชื่อมประสานอนุภาคเซรามิกเข้าด้วยกันด้วยตัวประสาน [26]

ตารางที่ 2.6 ตัวประสานชนิดอินทรีย์สาร [31]

ตัวประสาน	ระดับความหนืด	ชนิดไฟฟ้าเคมี
Aqueous Systems		
Colloidal types		
- Cellulose	Low	
Carbohydrate-derived organics		
- Methyl cellulose,other cellulose ethers	Medium – High	Non – ionic
- Straches and dextrins	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	-	-

2.7.2.2 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer)

โดยทั่วไปการใช้ตัวประสานมักจะต้องใช้ร่วมกับสารเพิ่มความยืดหยุ่น ทั้งนี้เนื่องจากจะเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนไหวของโซ่ของโมเลกุลตัวประสาน ซึ่งผลที่ได้คือเป็นการช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นแก่ชิ้นงาน และจะมีผลโดยตรงต่อความหนืดของเนื้อเซรามิก เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำจึงเปรียบเสมือนตัวทำละลาย ดังนั้นจึงควรใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ โดยสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่นิยมใช้กันคือ สารกลุ่ม Glycols และกลุ่ม Phthalate เช่น Polyethylene Glycol, Dimethyl Phthalate เป็นต้น

2.7.2.3 สารหล่อลื่น (Lubricant)

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

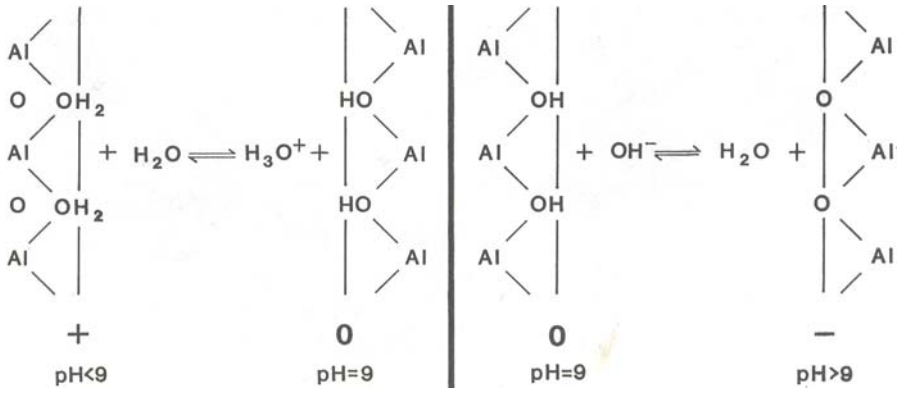
2.7.2.4 สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)

สารช่วยการกระจายตัว หมายถึง สารที่เติมเข้าไปในส่วนผสมแล้วทำให้ผิวของอนุภาคเกิดประจุที่เหมือนกันจำนวนมาก เป็นการเพิ่มประจุไฟฟ้าสถิตที่ผิวของอนุภาคซึ่งแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตนี้ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าประจุเหมือนกันจะผลักกัน ถ้าประจุต่างกันจะดูดกัน ซึ่งสารช่วยการกระจายตัวนี้จะใช้กับวิธีการขึ้นรูปแบบ Slip Casting

สารช่วยการกระจายตัวนั้นใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นกรดและด่าง ซึ่งจะมีผลต่อผิวอนุภาคโดยทำให้ผิวของอนุภาคมีประจุ [26] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 กล่าวคือ สารช่วยการกระจายตัวที่มีสภาพเป็นกรด เช่น กรด HNO_3 หรือ HCl เมื่อเติมลงไปในน้ำอะลูมินา คือเป็นการเติมไอออน H_3O^+ ลงไป จะเป็นสาเหตุให้น้ำอะลูมินามี pH ลดลง และยังทำให้ผิวของผงอะลูมินาซึ่งเดิมไม่มีประจุนั้นกลายเป็นผิวซึ่งมีประจุบวกได้

การเติมสารช่วยการกระจายตัวซึ่งมีความเป็นด่างเช่น เมื่อเติมด่างประเภท Alkali Hydroxide ลงในน้ำอะลูมินาคือ การเติมไอออน OH^- ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนจากผิว และสร้างประจุลบขึ้นที่ผิวของผงอะลูมินา อีกทั้งยังเป็นผลให้ pH ของน้ำอะลูมินาสูงขึ้นอีกด้วย

จากที่กล่าวมา อาจสรุปได้ว่าสารช่วยการกระจายตัวสำหรับอะลูมินาใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นเกณฑ์ได้ คือ ในช่วง pH = 3.5 – 4.5 ประจุที่ผิวส่วนใหญ่เป็นประจุบวก ทำให้เกิดการกระจายตัวเนื่องจากมีการผลักกัน และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ประจุบวกที่ผิวจะเริ่มลดลงจนกระทั่ง pH อยู่ในช่วง 8-9 เป็นจุดที่ผิวของอะลูมินาไม่มีประจุ ทำให้อนุภาคมีการเกาะตัวกันอย่างมาก แต่เมื่อ pH อยู่ในช่วง 11-12 ผิวของอนุภาคส่วนใหญ่กลายเป็นประจุลบ และน้ำอะลูมินาจะกลับสู่สภาวะการกระจายตัวอีกครั้ง



รูปที่ 2.8 การเกิดประจุที่ผิวของอะลูมินาที่อิ่มตัวด้วยน้ำ [26]

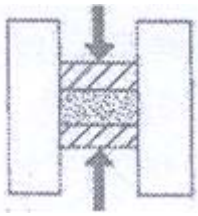
สารที่กล่าวมาข้างต้น เป็นสารเติมหลักที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการเตรียมเนื้อเซรามิกเพื่อทำการขึ้นรูป แต่ยังมีสารเติมอีกหลายชนิดที่จะให้คุณสมบัติต่างๆ แก่เนื้อเซรามิกดังแสดงในตารางที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สารเติมควรใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุด ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังเป็นการลดความเสี่ยงในการเสียรูปร่างของชิ้นงานเมื่อผ่านขั้นตอนการกำจัดสารเติมเหล่านี้อีกด้วย อีกประการหนึ่งคือปริมาณสารเติมมากยิ่งเป็นการทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้ไม่แข็งแรง

ตารางที่ 2.7 สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปแต่ละชนิด [9]

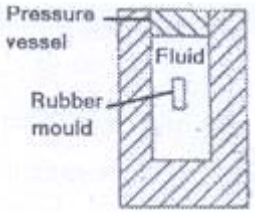
สารเติมแต่ง	วิธีการขึ้นรูป
สารเชื่อมประสาน (Binder)	Extrusion, Slip Casting, Pressing
สารหล่อลื่น (Lubricant)	Extrusion, Pressing
สารช่วยการกระจายตัว (Deflocculant)	Extrusion, Slip Casting
Wetting Agent	Slip Casting
Water Retainer	Pressing
Antielectrostatic Agent	Pressing
Antifoaming Agent	Slip Casting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

2.7.3 การขึ้นรูป (Forming)

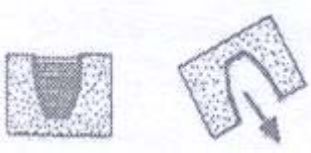
ในการเลือกกระบวนการขึ้นรูป สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก่อนก็คือ ต้องทราบว่าจะผลิตเยื่อแผ่นรูปแบบใด และต้องการให้โครงสร้างของเยื่อแผ่นเป็นแบบใด จากนั้นจึงมาเลือกกระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 [31]



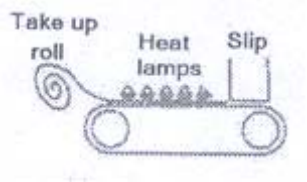
(ก)



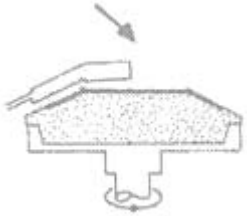
(ข)



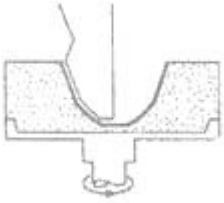
(ค)



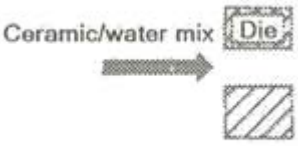
(ง)



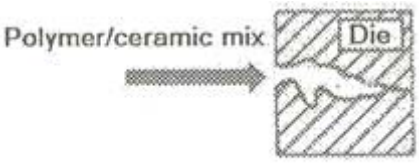
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 2.9 กระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบต่างๆ [31]

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

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

(ค) Slip Casting เป็นกระบวนการที่เตรียมลักษณะเนื้องานเป็นสลิป ซึ่งแบ่งการขึ้นรูปเป็น 2 วิธี

- Solid Casting คือ การเทแบบโดยให้น้ำสลิปแข็งตัวอยู่ในแบบ โดยสารแขวนลอยจะมีความหนืดประมาณ 5-80 Poise เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความหนา รูปร่างซับซ้อน
- Drain Casting คือ การเทแบบ โดยมีการเทน้ำสลิปที่เหลือออกไป เมื่อได้ความหนาของชิ้นงานตามต้องการ โดยสารแขวนลอยจะมีความหนืดประมาณ 1-5 Poise เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความหนา รูปร่างซับซ้อน การขึ้นรูปชิ้นงานตามกระบวนการ Slip Casting เป็นวิธีที่ง่ายและชิ้นส่วนอุปกรณ์น้อย

(ง) Tape Casting เป็นกระบวนการที่เตรียมเนื้องานเหมือนกับกระบวนการ Slip Casting แต่ชิ้นงาน ที่ได้ มีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบ

(จ) Jolleying เป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะก้นลึก เช่น ถ้วยชาม โดยการขึ้นรูปจากภายนอก ชิ้นงานจะวางอยู่บนแม่พิมพ์พลาสเตอร์ที่หมุนได้

(ฉ) Jiggering เป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะแบน โดยมีแท่นโลหะไปสัมผัสกับเนื้องานซึ่งวางอยู่บนแม่พิมพ์พลาสเตอร์หมุนได้

(ช) Extrusion เป็นกระบวนการที่วัตถุดิบถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปภายใต้สภาวะของแรงอัดผ่านแม่พิมพ์ออกมาในรูปทรงที่ต้องการ วัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบนั้นจะมีผงอนุภาคและสารเติมต่างๆ โดยมีความชื้น 18-25% เนื้อเซรามิกจะมีความเหนียว และยืดหยุ่นเกาะตัวกันเป็นก้อน ถ้าความชื้นมากเกินไปกว่านี้ ชิ้นงานจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้

(ซ) Injection Moulding เป็นกระบวนการที่เนื้องานถูกแรงอันผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์ที่เป็นระบบปิดมีข้อเสียคือ มีส่วนของสารยึดเกาะสูงซึ่งต้องกำจัดออกไป

2.7.4 การทำแห้งและกำจัดสารเติมแต่ง (Drying and Burn Out Binders)

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วอยู่ในลักษณะกึ่งเปียกกึ่งแห้ง เมื่อมีแรงมากระทำชิ้นงานจะเสียรูปทันที ดังนั้นควรทำให้ชิ้นงานแห้งสนิทก่อนซึ่งการทำให้แห้งนี้เพียงวางชิ้นงานไว้ในอุณหภูมิปกติ น้ำที่อยู่รอบๆ อนุภาคจะระเหยออกไปสู่บรรยากาศ ทำให้อนุภาคนั้นชิดกันมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานแห้งและแข็งแรง แต่การทำให้แห้งนี้ควรป้องกันไม่ให้น้ำระเหยเร็วเกินไป เช่น ไม่ควรวางชิ้นงานบริเวณที่มีแสงแดดหรือมีลมพัดตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานโก่งงอหรือแตกร้าว การกำจัดสารเติมแต่งเป็นขั้นตอนที่ต้องระมัดระวังมาก เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อนรวมทั้งต้องใช้เวลาเป็นอย่างมากด้วย โดยบางครั้งชิ้นงานที่หนา มีขนาดใหญ่ รูปร่างซับซ้อน อาจต้องใช้เวลาเพื่อการกำจัดสารเติมนี้นานเป็นวัน หรือเป็นสัปดาห์ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น และข้อบกพร่องนี้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น การบวม การแตกร้าว

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การกำจัดสารเติมแต่งจะเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ความร้อนซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิ 600ºC - 800ºC โดยประมาณ เนื่องจากสารเติมที่ใช้เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และจะระเหิดกลายเป็นไอออกจากชิ้นงาน แต่มีข้อควรระวังคือการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิดังกล่าว หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิไม่ควรเร็วเกินไปเนื่องจาก

1. ถ้าชิ้นงานมีความหนา จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวด้านนอกกับผิวด้านใน ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ อีกประการหนึ่งคือ ผิวด้านนอกมีอุณหภูมิที่สูงกว่าสารเติมแต่งจึงระเหยออกไปได้เร็วกว่า ทำให้มีการหดตัวที่ผิวด้านนอกมากกว่าด้านใน ดังนั้นชิ้นงานจะโก่งงอได้
2. การที่สารเติมแต่งเกิดการหลอมละลายและกลายเป็นไอ แต่ไม่สามารถระเหยออกจากชิ้นงานได้ เนื่องจากบริเวณผิวเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคไปแล้ว ทำให้ไอเหล่านั้นถูกปิดกั้นเป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการบวมหรือพอง

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้ผลกระทบดังที่กล่าวมา ดังนั้นจึงไม่ควรให้มีการเพิ่มอุณหภูมิเร็วเกินไป แต่ขณะเดียวกันก็ไม่ควรช้าเกินไป เนื่องจากเป็นการเสียเวลาและเพิ่มต้นทุนการผลิต (เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าเสื่อมราคาของเตาเผา) อีกด้วย แต่เวลาที่เหมาะสมนั้นไม่สามารถกำหนดได้ เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นขั้นตอนการกำจัดสารเติมนี้จะต้องศึกษาและทดลองให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ผลิตออกมา [32]

2.7.5 การเผาอบผนึก (Sintering)

กระบวนการเผาอบผนึก คือ การนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาอบในเตาเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศการเผาอบผนึกได้ ซึ่งอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการเผาอบผนึกจะเป็นครึ่งหนึ่ง หรือเป็นสองในสามของอุณหภูมิหลอมเหลวของผงเซรามิกชนิดนั้นๆ เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งผลจากการเผาอบผนึกนี้จะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เช่น มีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีความหนาแน่นมากขึ้น

กระบวนการเผาอบผนึกนี้ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยมีแรงขับดัน (Driving Force) คือ การลดพลังงานอิสระโดยรวมของชิ้นงาน ($\triangle G_T$) ให้ลดต่ำลง โดยที่

$$\triangle G_T = \triangle Gv + \triangle G_B + \triangle G_S \qquad (2.2)$$

เมื่อ $\triangle G_T$ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระโดยรวม

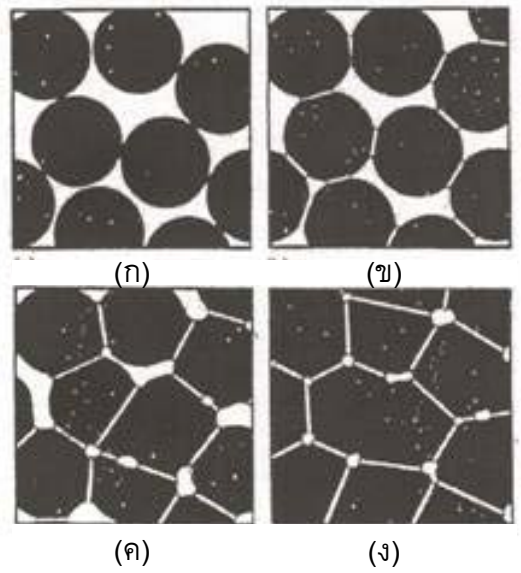
$\triangle Gv$ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับปริมาตร

$\triangle G_B$ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับขอบเขต

$\triangle G_S$ = การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิว

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระโดยรวมนี้ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่ผิว (ΔG_S) เป็นหลัก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า แรงขับดันสำหรับกระบวนการเผาอบผนึก คือ พลังงานอิสระที่ผิวจะถูกทำให้ลดลง โดยการพยายามลดพื้นที่ผิวของอนุภาคให้น้อยลงเป็นผลให้อนุภาคเกิดการเชื่อมติดกัน

กระบวนการเผาอบผนึก สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้โดยอาศัยพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผงเซรามิกเหล่านั้น ซึ่งเริ่มจากการที่เม็ดอนุภาคแต่ละอนุภาคเชื่อมติดกันจนกลายเป็นโครงสร้างแบบหลายผลึก (Polycrystalline Structure) การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.10 [31]



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาอบผนึก [31]

- ระยะต้น (Initial Stage) เป็นช่วงที่อนุภาคจะเชื่อมติดกัน โดยเริ่มจากการที่อนุภาคที่ชิดกันมีจุดสัมผัสกัน เกิดการถ่ายเทมวลซึ่งส่งผลให้เกิดขอบรอยต่อขึ้นมาระหว่างอนุภาค เรียกว่า “Neck” ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก)

- ระยะกลาง (Intermediate Stage) เป็นช่วงที่ Neck มีการขยายใหญ่ขึ้น และส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรูพรุนจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และ (ค)

- ระยะสุดท้าย (Final Stage) จำนวนรูพรุนจะลดน้อยลง โดยที่รูพรุนจะกระจายเป็นรูพรุนเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ง)

2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นกรองสำหรับงานวิจัย

ในการผลิตแผ่นกรองในระยะนี้จะใช้ดินผสมสำหรับผลิตเซรามิกที่มีชื่อทางการค้าคือดิน PBA จากบริษัท Compound Clay ผสมน้ำที่อัตราส่วนต่างๆ และใช้ฟองน้ำเป็นโครงสร้างสำหรับให้น้ำดิน PBA ยึดเกาะซึ่งมีข้อมูลของดิน PBA ดังนี้

สมบัติทางกายภาพของน้ำดิน		
ความถ่วงจำเพาะ	1.68 - 1.72	
สารละลายโซเดียมซิลิเกต (42 – 43 Baumé)	0.25 - 0.50%	ต่อน้ำหนักดินแห้ง
ความหนืด (Poises)	2.0 – 5.0	
ความแข็งแรงก่อนเผา (kg/cm^2)	> 40	

สมบัติหลังเผา	Oxidation Fire	Reduction Fire
อุณหภูมิเผา (°C)	1200	1280
การหดตัวหลังอบ (%)	3.50 - 4.75	3.50 - 4.75
ภาระการดูดซึมน้ำ (%)	0.50 - 3.50	0.00 - 0.20
สีหลังเผา (L, a, b)	86.36, 1.43, 14.99	79.59, -1.13, 7.53
ความแข็งแรงหลังเผา (kg/cm^2)	> 450	> 650
สัมประสิทธิ์การขยายตัว 25 - 500°C ($\times 10^{-7} K^{-1}$)	152 - 177	145 - 171
การขยายตัวที่อุณหภูมิ 500°C (%)	0.24 – 0.28	0.23 – 0.27

ที่มา: บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

ส่วนฟองน้ำที่ใช้เป็นโครงสร้างซึ่งทำให้เกิดรูพรุนนั้น ทำมาจากพอลิยูรีเทนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายต่อการใช้งาน พอลิยูริเทนใช้กันมากในการผลิตโฟม ซึ่งมีทั้งโฟมแข็งและโฟมยืดหยุ่น ซึ่งโฟมยืดหยุ่นหรือฟองน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้พอลิออนที่มีโซ่ยาว และมีมอนอเมอร์ที่มีหมู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา 3 หมู่ และถ้าหากต้องการโฟมที่แข็งแรงขึ้นจะต้องใช้พอลิออนโซ่สั้น เพื่อให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างแบบตาข่ายมากขึ้น

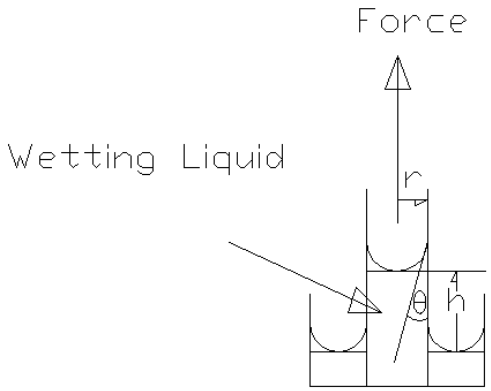
2.9 การทดสอบคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเซรามิก

2.9.1 การทดสอบหาขนาดรูพรุน

ในการหาขนาดรูพรุนของชิ้นงาน สามารถใช้เทคนิคทดสอบหาขนาดรูพรุนของชิ้นงานได้ดังนี้

2.9.1.1 วิธี Bubble Point

เทคนิคนี้เป็นการวัดขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในชิ้นงาน โดยใช้หลักการของ Capillary ดังรูปที่ 2.11 โดยให้รูพรุนเปรียบเสมือนกับหลอด Capillary เมื่อจุ่มลงในของเหลว ของเหลวจะไหลเข้าไปตามแรงตึงผิวและเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ จะกระทั่งเกิดแรงสมดุลระหว่างแรงตึงผิวกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.11 หลักการของ Capillary Action [33]

เทคนิคนี้เริ่มต้นด้วยการที่เยื่อแผ่นนั้นจะต้องแช่อยู่ในของเหลว และต้องแน่ใจว่าของเหลวนั้นเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนด้วย โดยของเหลวนี้จะต้องสามารถเปียกกับเยื่อแผ่นได้ดี ถ้าเยื่อแผ่นนั้นเป็นชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น เยื่อแผ่นอะลูมินาจะใช้น้ำ แต่ถ้าเยื่อแผ่นนั้นเป็นชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักนิยมใช้ Ethanol หรือ Iso-Propanol

$$2\pi r\gamma\cos\theta = \pi r2(h\rho g) \qquad (2.3)$$

เมื่อ γ = แรงตึงผิวของของเหลว

θ = มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับผนังหลอด Capillary

R = รัศมีของหลอด Capillary

h = ความสูงของของเหลวภายในหลอด Capillary

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

g = แรงโน้มถ่วงของโลก

การวัดขนาดรูพรุนมีวิธีการ คือ เยื่อแผ่นที่เปียกด้วยของเหลวแล้วปิดปลายด้านหนึ่งไว้ จากนั้นจะใช้แรงดันผ่านเข้าไปทางปลายอีกด้านหนึ่งโดยเพิ่มความดันไปเรื่อยๆ เพื่อวัดค่าความดันที่สามารถดันของเหลวออกจากรูพรุนได้ โดยสังเกตความดันที่ทำให้มีฟองอากาศออกมา

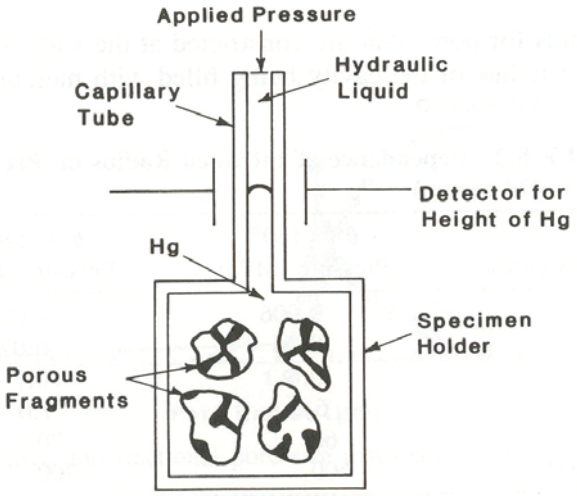
ขนาดของรูพรุนสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลมาจากสมการที่ 2.3 ซึ่งสำหรับเทคนิคนี้ของเหลวที่ใช้ต้องเปียกกับเยื่อแผ่น ดังนั้นวิธีการวัดขนาดรูพรุนแบบนี้สามารถทดสอบด้วยตัวเอง โดยรายละเอียดเป็นไปตาม ASTM F316-76 ซึ่งจะวัดได้เฉพาะรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในชิ้นงานเท่านั้น ไม่สามารถทราบปริมาณรูพรุน และการแจกแจงขนาดรูพรุนได้

$$r = 2\gamma\cos\theta/ P \qquad (P= h\rho g) \qquad (2.4)$$

2.9.1.2 วิธีการใช้ปรอท

เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธี Bubble Point โดยการใช้ปรอทแทนของเหลวอื่น ซึ่งในการวัดขนาดและการแจกแจงขนาดของรูพรุนอยู่บนพื้นฐานของการเพิ่มความดันให้กับปรอท ซึ่งจะมีความดันระดับหนึ่งที่สามารถดันปรอทเข้าไปอยู่ในรูพรุนของชิ้นงานได้ (โดยชิ้นงานนั้นผ่านการดูดอากาศออกแล้ว อยู่ในระดับ 10^{-2} torr)

เครื่องมือวัดขนาดรูพรุนแบบนี้ จะมีส่วนประกอบสำคัญคือ อุปกรณ์สำหรับใส่ชิ้นงานซึ่งเรียกว่า “Penetrometer” ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งหลังจากใส่ชิ้นงานเข้าไปแล้วจึงเริ่มทำการวัดขนาดรูพรุนโดยการเพิ่มความดันเพื่อให้ปรอทเข้าไปอยู่ในรูพรุน ซึ่งที่บริเวณก้านของ Penetrometer จะมีการเคลือบสารบางอย่างไว้เพื่อบ่งบอกถึงปริมาณปรอทที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ให้ปรอทกับปริมาณปรอทที่เข้าไปในรูพรุน คือการแจกแจงขนาดของรูพรุน



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Penetrometer [26]

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับขนาดรูพรุนนั้นอธิบายได้โดยใช้สมการที่ 2.5 เช่นเดียวกับเทคนิค Bubble Point

$$r = 2\gamma\cos\theta / P \qquad (2.5)$$

เมื่อ γ = แรงตึงผิวของปรอทซึ่งมีค่าเท่ากับ 485.0 Dyne/cm

θ = มุมสัมผัสระหว่างปรอทกับชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 130 องศา

r = รัศมีของขนาดรูพรุน (μm)

P = ความดันที่ดันปรอทเข้าไปในรูพรุน (psi)

ดังนั้น

$$r = 180 / P$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงวิธีการวัดขนาดรูพรุนทั้ง 2 วิธีนั้น จะเห็นว่าต่างเป็นวิธีการที่ใช้หลักการในการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเหมือนกันคือใช้ความดันเป็นเกณฑ์ โดยความดันที่ใช้เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดรูพรุน ดังนั้น ถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กก็ต้องใช้ความดันค่อนข้างสูง จึงจัดเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คืออยู่ในระดับไมโครฟิลเตรชันเท่านั้น

2.9.2 การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน

การทดสอบเพื่อหาปริมาณรูพรุนนั้น ที่จะกล่าวถึงมี 2 วิธีคือ

2.9.2.1 การแทนที่ด้วยน้ำ

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำได้โดยอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยาก กล่าวคือเป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของชิ้นงานระหว่าง น้ำหนักของชิ้นงานที่แห้ง น้ำหนักในน้ำของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และน้ำหนักในอากาศของชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

วิธีการแทนที่ด้วยน้ำนี้สามารถบอกถึงปริมาตรรูพรุนเปิด และค่าความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานได้โดยรายละเอียดเป็นไปตาม ASTM C-373

2.9.2.2 การคำนวณจากปริมาณปรอท

การหาปริมาตรรูพรุนแบบนี้เป็นการคำนวณจากปริมาณปรอททั้งหมดที่เข้าไปอยู่ในรูพรุน [8] โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.6

$$\%TP = (Vs\rho/1+Vs\rho) * 100 \qquad (2.6)$$

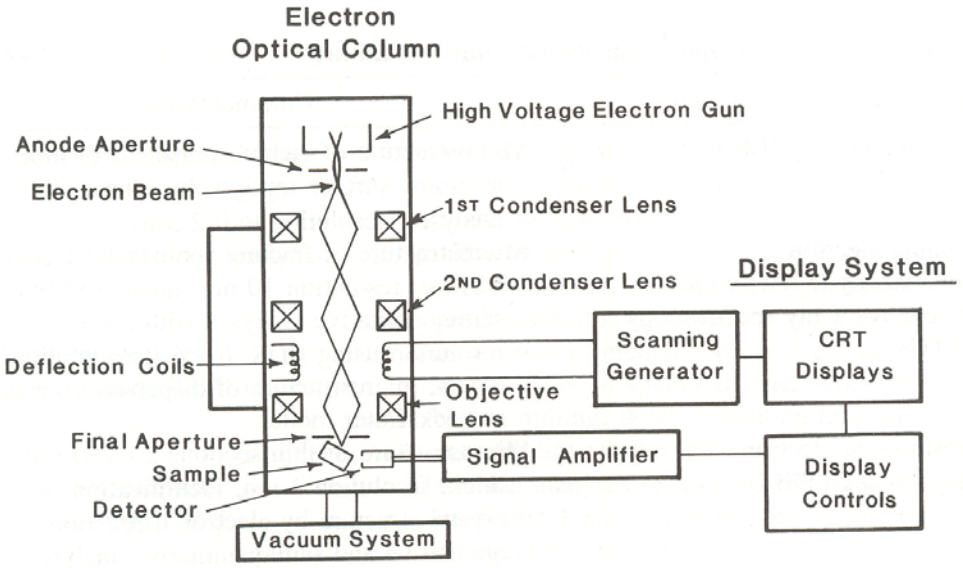
เมื่อ TP = ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดในเยื่อแผ่น (%)

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

ρ = ความหนาแน่นของผงอะลูมินา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.98 g/cm^3

2.9.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

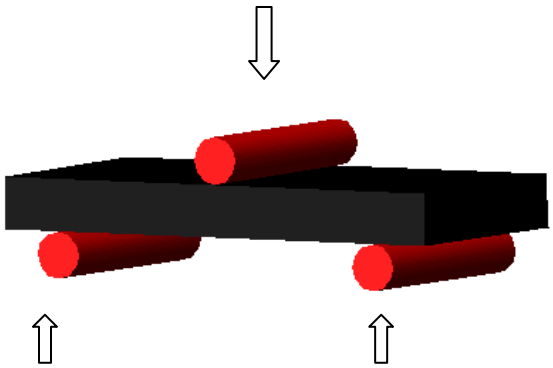
การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเยื่อแผ่น เป็นการศึกษาลักษณะรูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เครื่อง SEM มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.13 [26] กล่าวคือ อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้หลุดออก และวิ่งด้วยความเร็วสูงผ่าน Electro Magnetic Lens ชุดต่างๆ ภายใน Column ซึ่งทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กและโฟกัสลำอิเล็กตรอนวิ่งกราดบนผิวของตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนความเร็วสูงชนกับผิวตัวอย่าง จะให้สัญญาณออกมาหลายชนิด เช่น Secondary Electron, Backscattered Electron และ X-Rays ซึ่งสัญญาณแสงที่ได้จะถูกจับด้วย Detector จากนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำหน้าที่เปลี่ยนกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าเกิดเป็นภาพที่จอรับภาพ (Cathode Ray Tube)



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [26]

2.9.4 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical Strength)

โดยการทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก แบบ 3 - Point Flexure [34] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การทดสอบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก

ค่า Flexural Strength ของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าคำนวณได้จากสมการ

$$S = MC/I$$

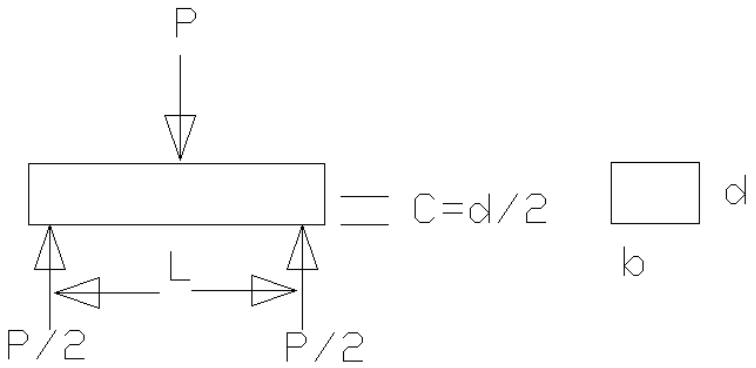
เมื่อ M = โมเมนต์ (Moment)

C = ระยะจากแกนกลางถึง Tensile Surface

I = Moment of Inertia

กรณีชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.15 ค่า I มีค่าเท่ากับ $bd^3/12$ และ C มีค่าเท่ากับ d/2 โดยที่ d และ b คือ ความหนาและความกว้างของชิ้นงาน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการทดสอบ แบบ 3 – Point Flexure ของชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้สมการคำนวณ Strength ดังนี้



รูปที่ 2.15 แรงที่กระทำบนชิ้นงานขณะทำการทดสอบ Flexural Strength [34]

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

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

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

เมื่อ Q = Flexural Strength, MPa

P = Fracture Load, N

L = Fixture Outer Span, mm

b = Specimen Width, mm

d = Specimen Height, parallel to the direction of test force, mm

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการผลิตแผ่นกรองเซรามิกให้ได้ขนาดรูพรุน 0.1–10 μm จากวัสดุที่หาได้ภายในประเทศ รวมทั้งทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ เพื่อให้ได้เทคโนโลยีในการผลิตตัวกรองสำหรับใช้กรองฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ 3 ส่วนด้วยกันคือ

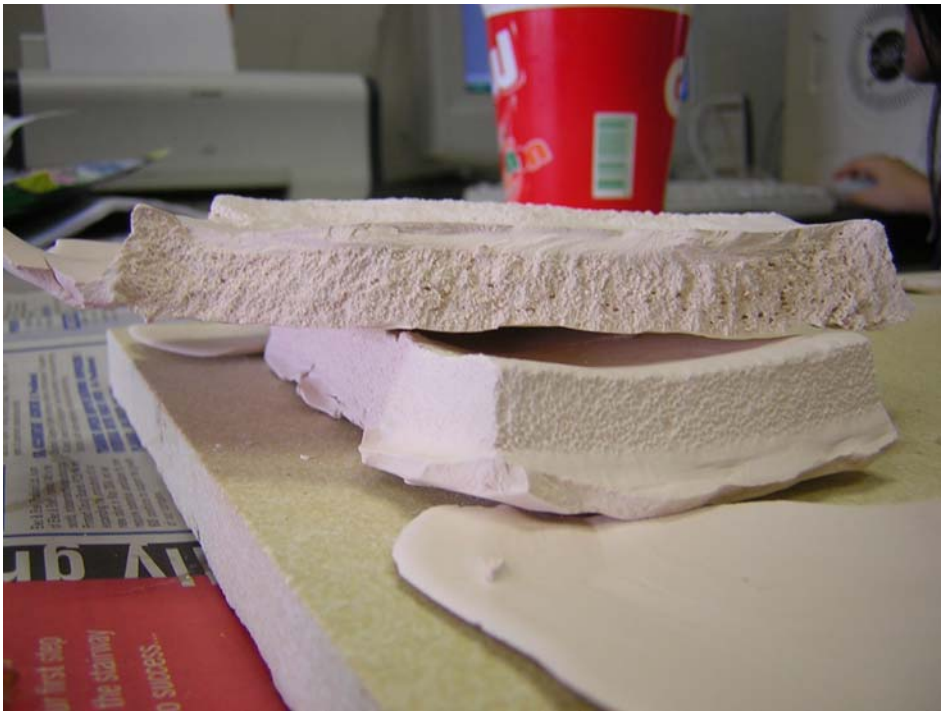
1. การผลิตแผ่นกรองเซรามิก
2. การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้
3. ทดสอบประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้

3.1 การผลิตแผ่นกรองเซรามิก

เนื่องจากการผลิตแผ่นกรองที่ผ่านมา [35] ทำการขึ้นรูปโดยการใช้เส้นเอ็นขนาดเล็กตัดดิน PBA ตามแนวหน้าตัดให้มีขนาดความหนาประมาณ 10 mm นั้น ทำให้ได้ขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าช่วงที่ต้องการ คือเล็กกว่า 0.1 – 10 μm และมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่า 40% ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกใหม่ โดยเบื้องต้นนั้นได้ทำการผลิตแผ่นกรองขึ้นมาด้วยวิธีการต่างๆ มีดังนี้ คือ

3.1.1 การทดลองผลิตแผ่นกรองอย่างง่ายที่ความหนา 1.5 cm

โดยตัดฟองน้ำมีขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา เท่ากับ 12 cm × 12 cm × 1.5 cm เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วนำไปจุ่มลงในส่วนผสมของดิน PBA ผสมน้ำ ในอัตราส่วน 50 : 50 แล้วนำไปวางไว้บนตะแกรงภายในห้องที่อากาศนิ่ง เพื่อให้แผ่นกรองเกิดการแห้ง พบว่าแผ่นกรองเกิดการหดตัวทุกๆด้านประมาณ 30% และเกิดการโก่งงอเสียรูปร่าง และบางแผ่นเกิดการแตกร้าว ซึ่งเมื่อนำไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000ºC แผ่นกรองจะมีรูพรุนเกิดขึ้นด้านในของแผ่นตามโครงสร้างของฟองน้ำซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3.1



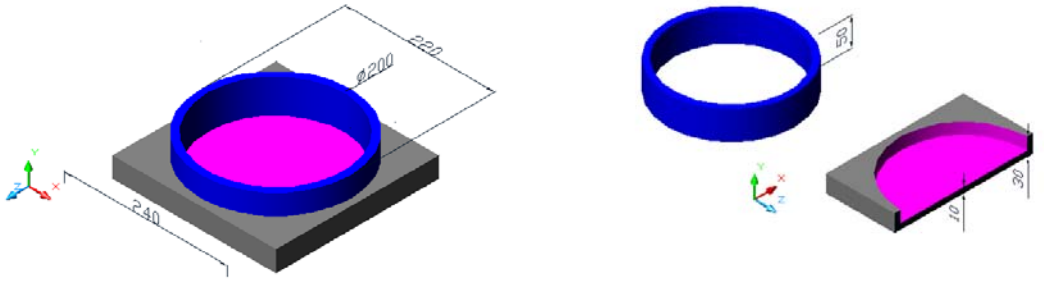
รูปที่ 3.1 ลักษณะรูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำเมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1,000ºC

3.1.2 การทดลองผลิตแผ่นกรองอย่างง่ายที่ความหนา 3.8 cm

หลังจากที่ได้ผลิตแผ่นกรองโดยใช้ฟองน้ำเป็นโครงสร้างภายใน เพื่อดูว่าแผ่นกรองจะมีรูพรุนตามที่คาดไว้หรือไม่ เมื่อปรากฏว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นและมีความแข็งแรงพอที่จะใช้เป็นแผ่นกรองได้แต่โครงสร้างเสียรูปไป ทำให้เกิดสมมุติฐานดังนี้

1. ฟองน้ำบางเกินไป
2. การเสียรูปและรอยแตกเนื่องจากการตัดฟองน้ำที่ไม่ตรง
3. ไม่มีแม่พิมพ์เป็นตัวบังคับให้ฟองน้ำคงรูปเดิมเอาไว้

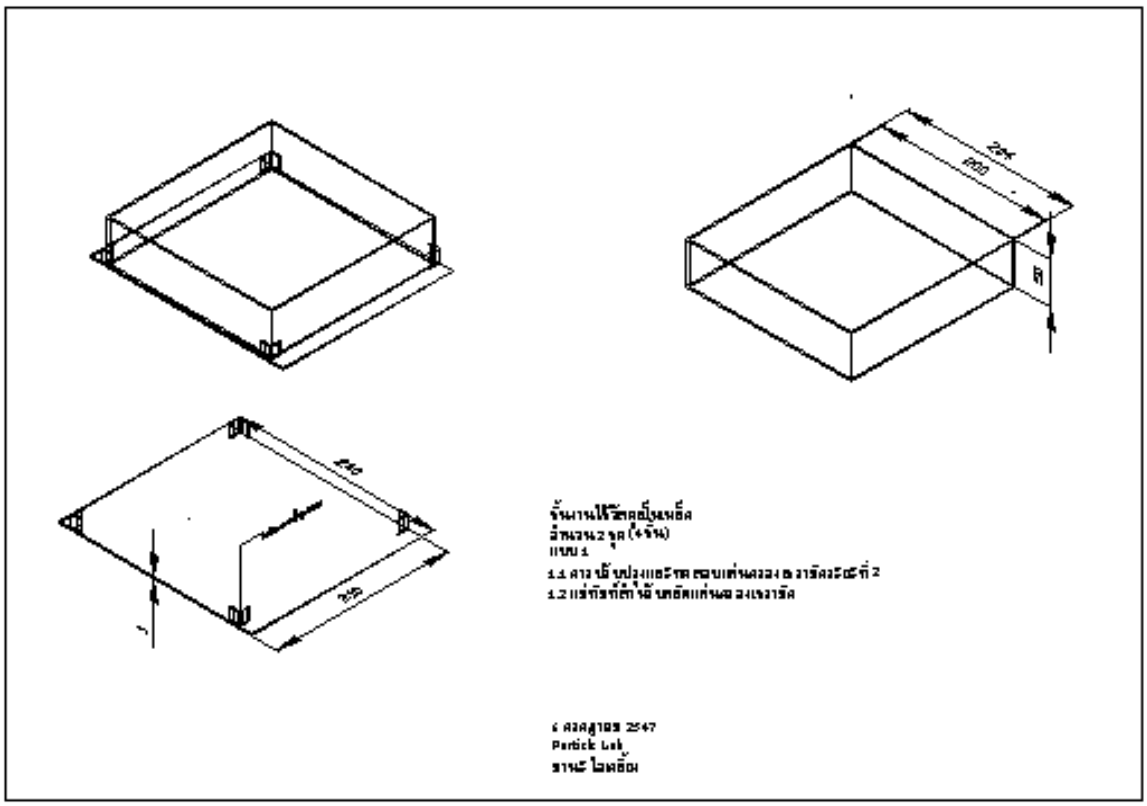
จึงได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.2 สำหรับการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกที่มีโครงสร้างเป็นฟองน้ำ ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการผลิตขึ้นมาจำนวน 1 แผ่นโดยแม่พิมพ์ที่ใช้นั้นทำจากอะคริลิกแผ่นเรียบเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานที่ตั้งไว้ เมื่อพบว่าเป็นไปตามสมมุติฐานข้อที่ 3 ก็ทำการผลิตแผ่นกรองเพิ่มขึ้นอีก 2 แผ่นเพื่อยืนยันข้อสมมุติฐานดังกล่าว



รูปที่ 3.2 การออกแบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิกครั้งที่ 1

3.1.3 การผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm

สมมุติฐานที่ตั้งไว้ข้างต้นที่ได้พิสูจน์แล้วคือ จะต้องใช้แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นกรองเกิดการโก่งงอจนเกิดการแตกร้าว และรอยตัดฟองน้ำจะต้องเรียบ จึงนำแผ่นฟองน้ำที่เหลือไปให้ทางโรงงานผ่าครึ่งแผ่นฟองน้ำ 3.8 cm ด้วยเครื่องจักร และทำการผลิตแผ่นกรองเซรามิกเพิ่มครั้งละ 2 แผ่น ซึ่งการผลิตต่อมาได้ทำการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้ ดังรูปที่ 3.3 เนื่องจากการแห้งของแผ่นกรองเซรามิกโดยธรรมชาติใช้เวลาประมาณ 15 วันจึงสามารถทำการเผาชิ้นงานได้ และได้ทำการผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีส่วนผสมของดิน PBA และน้ำ เท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนักจำนวน 6 แผ่น โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,250ºC



รูปที่ 3.3 แบบแม่พิมพ์แผ่นกรองเซรามิกที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วและนำไปจัดสร้าง

3.1.4 การผลิตแผ่นกรองที่อัตราส่วนผสมดิน PBA : น้ำ ต่าง ๆ กัน

การผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm จากหัวข้อที่ผ่านมาตั้งข้อสมมุติฐานได้ว่าการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,250ºC ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ดิน PBA เริ่มสุกตัวทำให้ชิ้นงานแข็งไม่สามารถที่จะขัดตกแต่งชิ้นงานได้ตามต้องการ จึงได้ผลิตแผ่นกรองขึ้นมาใหม่ทั้งหมดจำนวน 6 แผ่นโดยเปลี่ยนแปลงส่วนผสมดังนี้

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

การผลิตแผ่นกรองที่ความหนา 1.5 cm ที่ผ่านมาทำให้ได้ข้อจำกัดของการผลิตแผ่นกรองที่เหมาะสมพบว่าแผ่นกรองที่มีส่วนผสม ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60 มีความเหมาะสมสำหรับความเป็นตัวกรองมากกว่าส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนซึ่งเกิดจากฟองน้ำและน้ำหนักที่เบากว่าซึ่งแผ่นกรองที่ส่วนผสมนี้มีความแข็งแรงพอที่จะนำไปใช้เป็นตัวกรอง จากการพิจารณาอย่างคร่าวๆ โดยบีบแผ่นกรองเซรามิกด้วยนิ้วมือ และนอกจากนี้ยังพบว่าส่วนผสมที่ตกตะกอนเองนั้นมีความพรุน

เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงได้นำแผ่นกรองนี้ไปทำการทดสอบเพื่อหาขนาดรูพรุนเปิดที่เกิดขึ้นจากผลการตกตะกอน และทำการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการ SEM เนื่องจากขนาดของชั้นรองรับนั้นสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงไม่ได้ทำการทดสอบ

3.1.5 การทำให้แห้งและการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิต่างกัน

แผ่นกรองเซรามิกที่ผ่านการขึ้นรูปจะถูกเก็บไว้ในบริเวณที่มีอากาศนิ่ง ณ อุณหภูมิปกติ เพื่อให้น้ำระเหยออกไปจากแผ่นกรองเซรามิก จนกระทั่งแห้งสนิทจึงจะนำมาเผาให้เกิดความคงตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตแผ่นกรองเซรามิกขึ้นมาโดยเงื่อนไขที่แตกต่างกันกล่าวคือ เมื่อได้ทำการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกแล้วก็จะทำการเผาในเตาไฟฟ้า ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C และ 1,250°C และเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดจะทำการรักษาอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 h โดยมีขั้นตอนการผลิตที่สำคัญ ดังนี้

1. เตรียมน้ำดิน (ดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60)
2. ผสมให้เข้ากัน โดยสังเกตได้จากเนื้อของเหลวของส่วนผสมมีสีกลมกลืนกัน และไม่มีกากตะกอน ของดิน PBA ที่กันถังผสม
3. นำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วมาใส่ลงแบบพิมพ์ ซึ่งมีแผ่นฟองน้ำเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดรูพรุนวางอยู่ภายใน จนท่วมแผ่นฟองน้ำ
4. สำหรับแผ่นฟองน้ำที่วางอยู่ในแบบพิมพ์ จะต้องให้อุ้มน้ำส่วนผสมดังกล่าวข้างต้นทั่วทั้งแผ่น โดยอาจจุ่มแผ่นฟองน้ำในน้ำส่วนผสม แล้วทำการขยำแผ่นฟองน้ำในน้ำส่วนผสมเพื่อไล่อากาศและให้น้ำส่วนผสมเข้าไปทั่วทั้งแผ่นก่อนวางลงในแบบพิมพ์
5. นำแบบพิมพ์ที่ได้เทน้ำส่วนผสมท่วมแผ่นฟองน้ำแล้ววางบนพื้นที่ได้ระดับ ทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 80 h
6. นำแบบพิมพ์ซึ่งผ่านข้อ 5 มาเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 68ºC เป็นเวลา 24 h
7. นำแบบพิมพ์ออกจากตู้อบแล้วนำแผ่นกรองไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 700ºC
8. เมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง (ใช้เวลาประมาณ 12 h) นำชิ้นงานมาขัดด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงาน ซึ่งในขณะขัดจะต้องใช้น้ำเป็นตัวชะล้างผิวส่วนที่ขัดออกไป และเป็นไปด้วยความสม่ำเสมอจนผิวของแผ่นกรองเซรามิกทุกด้านโผล่ให้เห็นรูพรุนที่เกิดจากโครงสร้างของแผ่นฟองน้ำ ซึ่งถูกเผาออกไป และเรียบเสมอกันในแต่ละด้าน ทุกๆด้าน
9. นำแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ผ่านการขัดผิวแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 68 ºC เป็นเวลา 24 h เมื่อแห้งแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C และ 1,250ºC

3.2 การทดสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิก

3.2.1 ขนาดและปริมาตรรูพรุน

ใช้หลักการของวิธีการวัดจากปริมาณปรอทโดยใช้เครื่อง Mercury Porosimetry เพื่อหาขนาดรูพรุนเฉลี่ย การแจกแจงของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิก [31]

3.2.2 การวิเคราะห์ความหนาและโครงสร้างจุลภาค

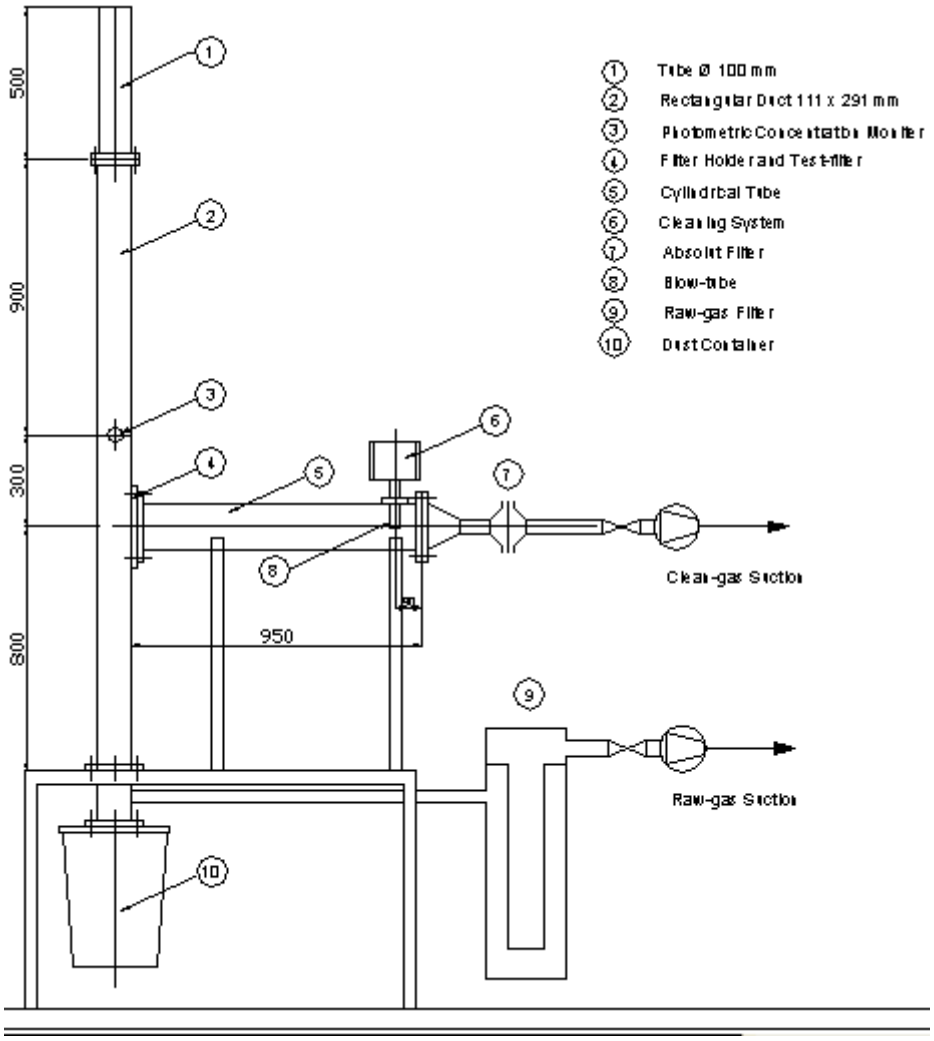
ในการวิเคราะห์ความหนา จะใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิก จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.3 การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิก

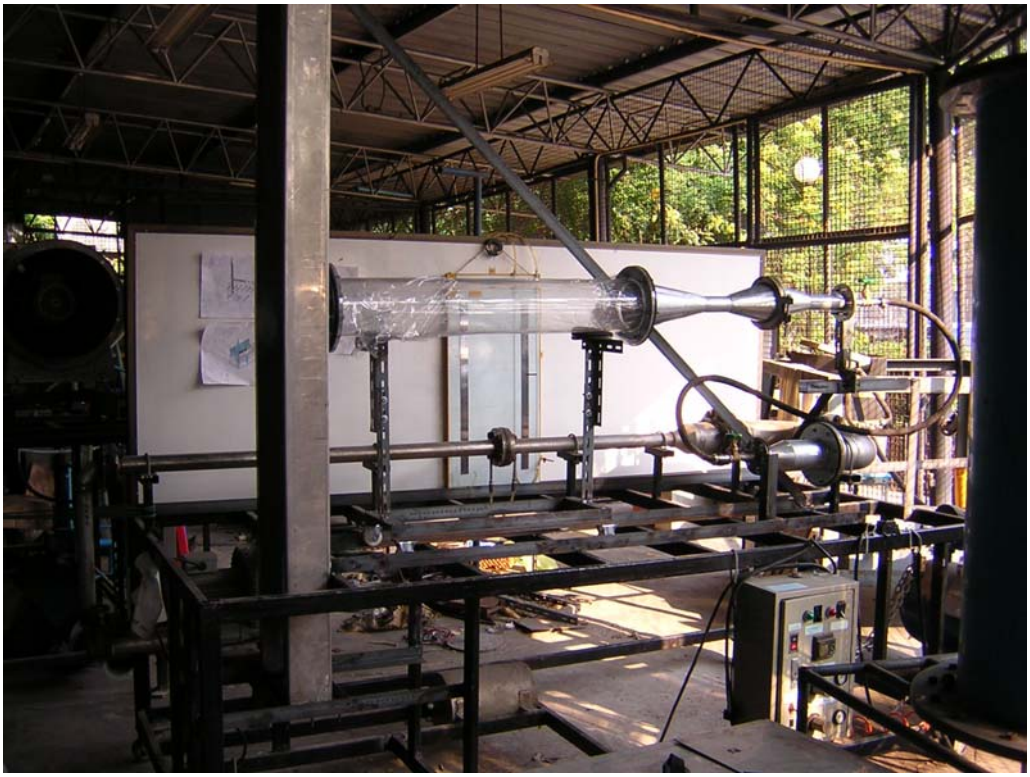
ในการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นกรองเซรามิกจะเป็นการทดสอบแบบ Flexural Strength ของแผ่นกรองเซรามิก แบบ 3 - Point Flexure โดยนำมาตรฐาน มอก.558 เล่ม 8 - 2528 มาประยุกต์ใช้ ซึ่งชิ้นทดสอบมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดประมาณ 10 mm × 10 mm × 100 mm และทำการทดสอบโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.3 การปรับปรุงชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก

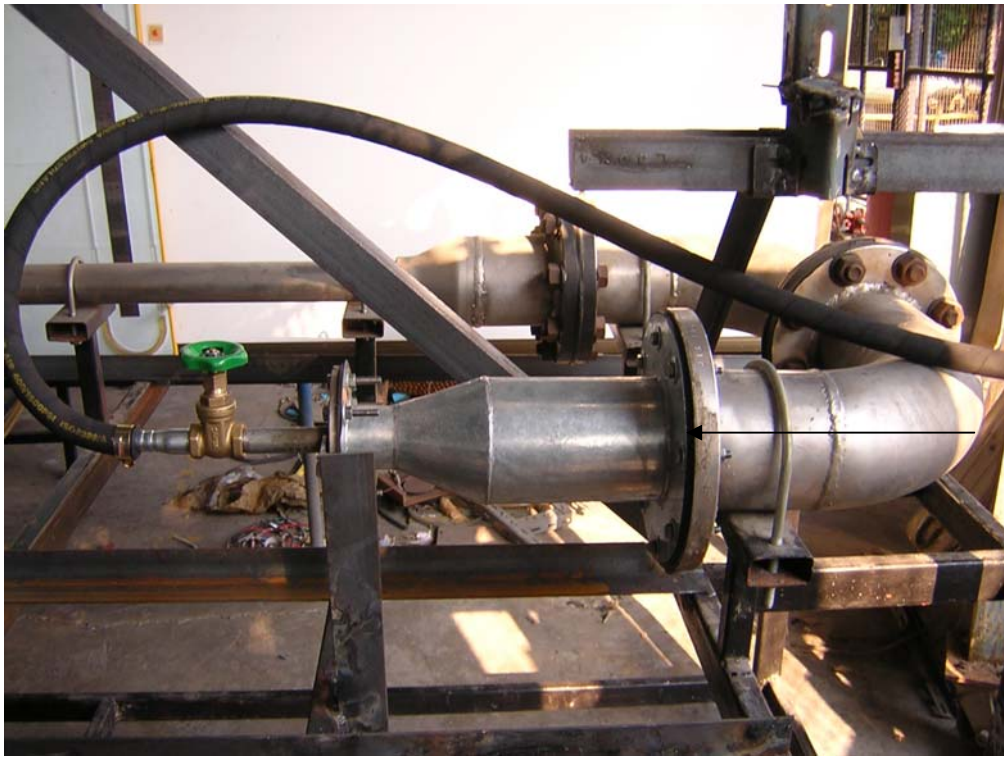
เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา [35] พบว่าชุดทดสอบประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นมีข้อบกพร่องที่ต้องทำการแก้ไข เช่น ไม่สามารถปรับอัตราการไหลได้เมื่อปฏิบัติงานโดยลำพัง, Chamber ที่ทำหน้าที่กระจายฝุ่นมีการรั่วไหลของฝุ่นออกมาข้างนอก, Housing จับยึดแผ่นกรองเซรามิกมีความไม่เหมาะสม เป็นต้นว่า ประกอบแผ่นกรองเข้าออกสำหรับทดสอบไม่สะดวก และอาจมีการรั่วเกิดขึ้น, Housing ของกระดาษกรองสำหรับใส่กระดาษกรองเข้าออกเพื่อทดสอบประสิทธิภาพมีความยากลำบากในการทำงาน ฝุ่นมีการตกค้างอยู่หน้าตัวกรองเมื่อทำความสะอาด จึงทำการปรับปรุงชุดทดสอบโดยให้มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดทดสอบของ P. Gäng ดังรูปที่ 3.4 การปรับปรุงชุดทดสอบซึ่งได้ทำการปรับปรุงส่วนของ Chamber ทำหน้าที่กระจายฝุ่นให้ฝุ่นกระจายตัวดังรูปที่ 3.5 และมาต่อเข้ากับชุดทดสอบเดิมจุดต่อแสดง ดังรูปที่ 3.6 นอกจากนี้ยังได้ปรับปรุงอุปกรณ์จับยึดหน้าแปลน Backup Filter ของกระดาษกรองอีกด้วย ดังรูปที่ 3.7



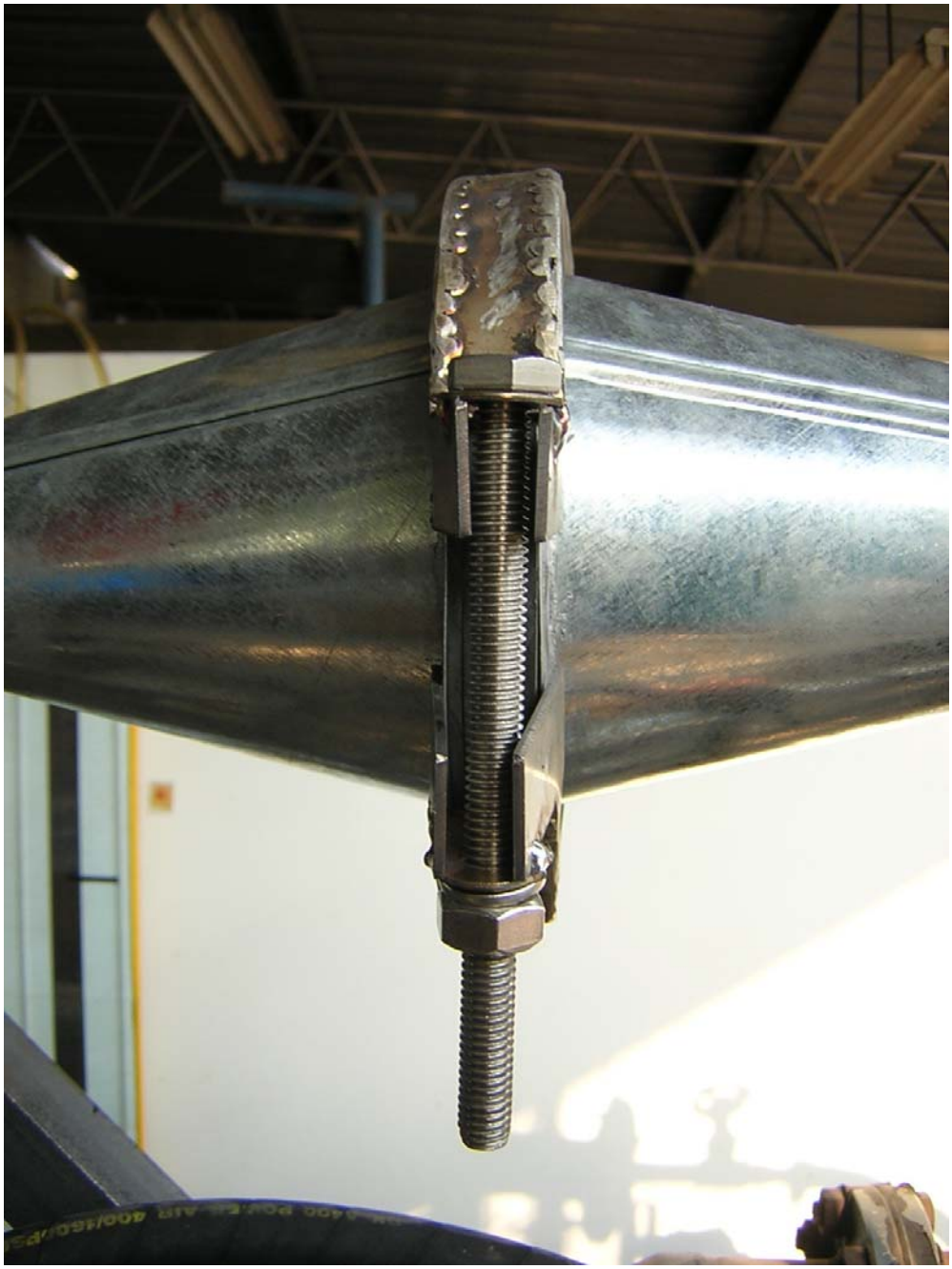
รูปที่ 3.4 แบบชุดทดสอบการจับเก็บฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิกของ P. Gäng



รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว



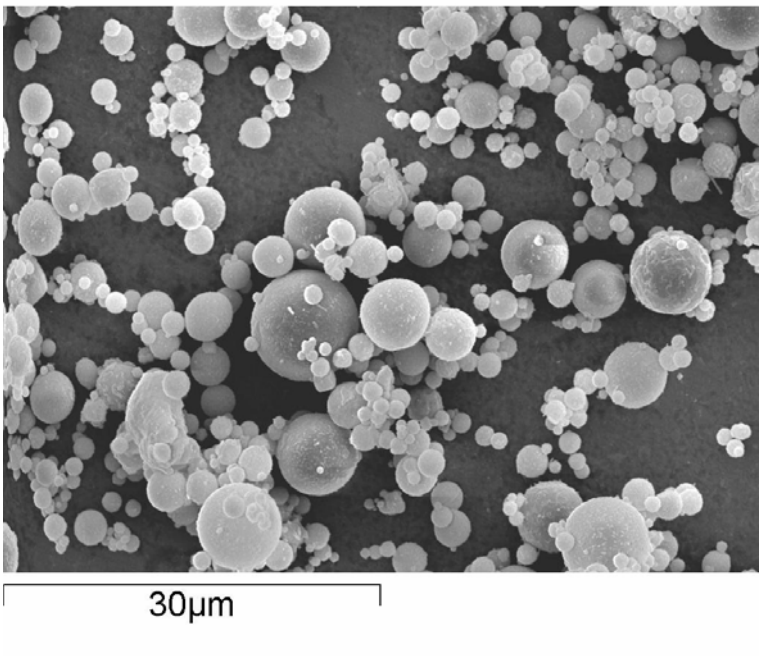
รูปที่ 3.6 จุดที่ทำการต่อกับชุดทดสอบเดิม



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์จับยึดหน้าแปลน Backup Filter

3.4 การปรับปรุงชุดป้อนฝุ่น

ฝุ่นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นฝุ่นเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ดังในรูปที่ 3.8 ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 3.1 สำหรับการแจกแจงขนาดของฝุ่น พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 8.81 μm



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายอนุภาคฝุ่นเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของฝุ่นจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

องค์ประกอบของฝุ่น	เปอร์เซ็นต์ (%wt)
SiO_2	48.6
Al_2O_3	25.9
Fe_2O_3	10.3
CaO	4.21
MgO	1.7
Na_2O	0.76
K_2O	2.26
TiO_2	0.45
SO_3	5.03
P_2O_5	0.075
อื่นๆ	0.715
รวม	100

ที่มา: โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ในงานวิจัยที่ผ่านมา [35] พบว่าชุดป้อนฝุ่นมีข้อบกพร่องที่ต้องทำการแก้ไข เช่น แรงบิดของมอเตอร์น้อยเกินไป ทำให้ชุดป้อนฝุ่นหยุดหมุนในบางช่วงของการทำงาน ฝุ่นที่ป้อนออกมาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากช่องทางออกของชุดป้อนฝุ่นมีช่องว่างมากเกินไป จึงได้ทำการปรับปรุงใหม่ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 3.9

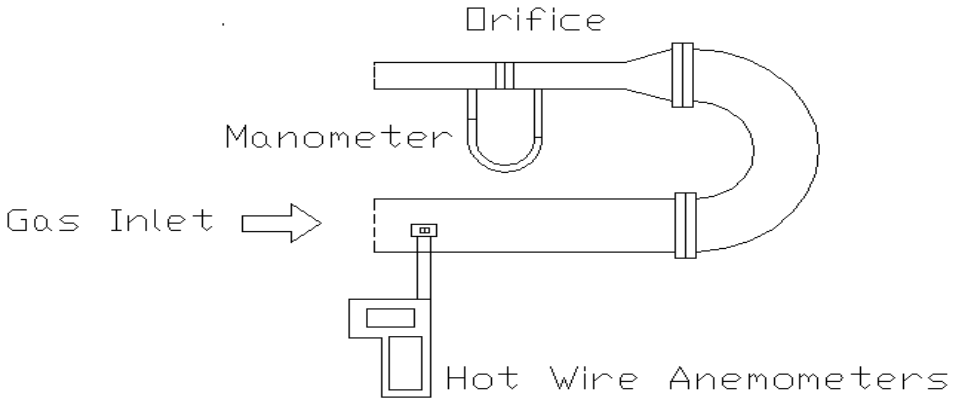
รูปที่ 3.9 ชุดป้อนฝุ่นที่จัดสร้างขึ้นใหม่

3.5 การสอบเทียบชุดทดลองและชุดป้อนฝุ่น

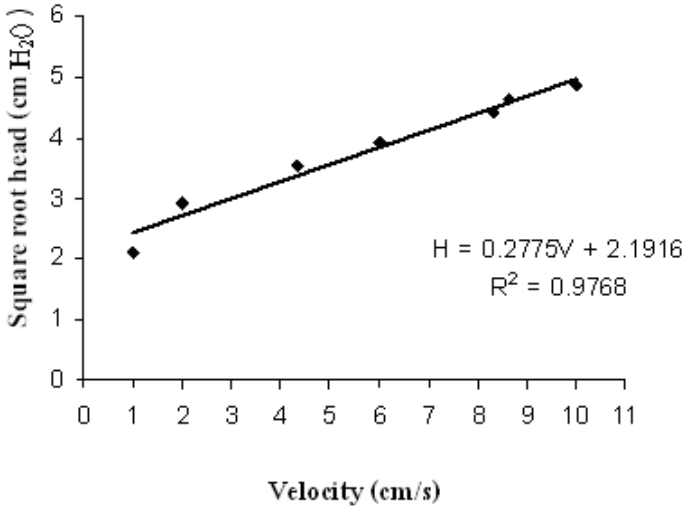
สำหรับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ได้จัดสร้างขึ้นมานั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการสอบเทียบเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่แม่นยำและน่าเชื่อถือ ซึ่งในการสอบเทียบชุดทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองเซรามิก และชุดป้อนฝุ่นมีรายละเอียด ดังนี้

3.5.1 มาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ

การสอบเทียบมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซจะหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านกับความดันลดคร่อมแผ่นออริฟิซ โดยในการสอบเทียบจะใช้มาตรวัดความเร็วลมแบบขดลวดร้อน (Hot Wire Anemometer) Model HTA 4200 ทำการวัดความเร็วอากาศภายในท่อเทียบกับความดันที่แสดงผลออกมา วิธีการเป็นดังรูปที่ 3.10 เมื่อนำผลที่ได้จากการสอบเทียบมาตรความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรอัตราการไหลแบบออริฟิซมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ จะได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 การสอบเทียบมาตรอัตราการไหลแบบออริฟิซ

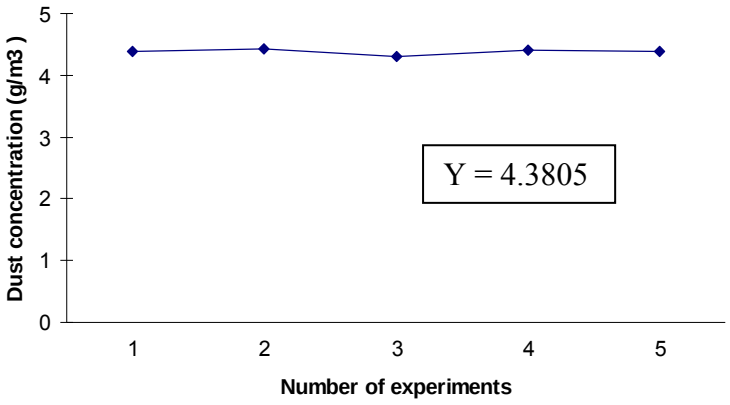


รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรากที่สองของเฮดความดันแตกต่างภายในมาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ

จากรูปที่ 3.11 กราฟที่ได้ใช้สำหรับการหาค่าความเร็วภายในระบบ โดยความเร็วจะแปรผันตามรากที่สองของเฮด (Head) น้ำในมาตรวัดความดันแบบแมนอมิเตอร์ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบออริฟิซ เป็นไปตามความสัมพันธ์ H = 0.2775V+2.1916

3.5.2 ชุดป้อนฝุ่น

ในการสอบเทียบชุดป้อนฝุ่นได้ทำการปรับสภาวะตามเงื่อนไขที่จะทำการทดลองจริงที่อัตราการกรอง 3 cm/s ก่อนป้อนฝุ่นเข้าสู่ระบบ โดยใช้กระดาษกรองในการกรองแทนตัวกรองเซรามิก ระยะเวลาในการกรอง 300 วินาที ได้เป็นค่าความเข้มข้นฝุ่นทางเข้า ในการสอบเทียบจะทำการทดลอง 5 ครั้งนำค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ได้มาเฉลี่ยได้ค่าความเข้มข้นฝุ่นทางเข้าเป็นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความเข้มข้นฝุ่นที่ได้จากเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่ที่อัตราการป้อนฝุ่น 7.5 g/min

จากรูปที่ 3.12 ความเข้มข้นฝุ่นที่คำนวณได้จากการเก็บตัวอย่างทั้ง 5 ครั้งนำมาเฉลี่ยค่าความเข้มข้นฝุ่นเฉลี่ยของเครื่องป้อนฝุ่นตัวใหม่ได้เท่ากับ 4.4 g/m^3 ที่ความเร็ว 3 cm/s โดยอัตราการป้อนฝุ่นคงที่ 7.5 g/min ตรงตามสภาวะภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจริง

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิก

3.6.1 การหาค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้

ส่วนใหญ่การหาค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ จะใช้สมการของ Kozeny คำนวณ เนื่องจากว่าสมการ Kozeny มีเหตุผลพอเพียงและน่าเชื่อถือมากกว่าสมการอื่นๆ โดยแสดงให้เห็นความเกี่ยวข้องโดยตรงระหว่างรูพรุนและคุณสมบัติของการซึมผ่านได้ เนื่องจากมีแนวคิดที่มาจากลักษณะของพื้นที่ผิวจำเพาะและเส้นทางที่คดเคี้ยวของรูพรุน สมการของ Kozeny มาจากการทดลองแบบตัวอย่างรูพรุนและหลักการ Capillary Tube ที่เกิดขึ้นในแบบตัวอย่าง โดยพิจารณาในสภาวะเฟสเดียว การไหลแบบราบเรียบ ความหนืดของไหลคงที่ ของไหลผ่านท่อตามแนวนอน ที่สภาวะเหล่านี้ โพรไฟล์ความเร็วของไหลจะเป็นรูปพาราโบลาในท่อ ความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่กลางท่อ ส่วนผนังท่อมีความเร็วเป็นศูนย์ สภาวะเหล่านี้ทำให้เข้าใจได้ง่ายต่อความสัมพันธ์ระหว่างความสมดุลของไหลที่ไหลผ่านท่อ ความเร็วเฉลี่ย ขนาดท่อ และความกดดันที่เกิดขึ้น นิยามของการซึมผ่านได้ คือ ค่าคงที่ระหว่างอัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านสัมพันธ์กับความดันที่เกิดขึ้น กฎของ Darcy ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของไหลกับความหนืดของของไหล โดยที่ความเร็วของของไหลหาได้จากอัตราการไหลหารด้วยพื้นที่หน้าตัด (Q/A) รูปแบบของสมการ คือ

$$\frac{Q}{A} = u = \kappa \frac{\Delta p}{\mu L} \tag{3.1}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (m^3/s)
A = พื้นที่หน้าตัดการไหล (m^2)
κ = สภาพให้ซึมผ่านได้ (m^2)
μ = ความหนืดของแก๊ส (Pa-s)
u = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
Δp = ความดันลดคร่อมชั้นเบด (Pa)
L = ความหนาของชั้นเบด (m)

จากสมการข้างต้น เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความดันลดคร่อมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลหรือความเร็ว ส่วนค่าสภาพให้ซึมผ่านได้จะคงที่ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้จะขึ้นกับความหนืดของของไหลที่ไหลผ่านตัวกลางและความหนาของชั้นการไหล โดยทั่วไปความเร็วของการไหลในท่อ u คือ สัดส่วนของอัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัดการไหลในท่อปกติ แต่สำหรับการหาค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ในตัวกลางที่มีทางคดเคี้ยวโดยใช้สมการของ Kozeny จะใช้ v ซึ่งหมายถึง สัดส่วนของความเร็วตามผิว (Superficial Velocity) หารด้วยค่าความพรุนของตัวกลาง รูปแบบของสมการคือ

$$\Delta p = \frac{\mu}{\kappa} \Delta L v \tag{3.2}$$

เมื่อ Δp = ความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิก (Pa)

μ = ความหนืดของแก๊ส (Pa-s)

κ = สภาพให้ซึมผ่านได้ (m^2)

ΔL = ความหนาของแผ่นกรอง (m)

v = ความเร็วในการกรอง (m/s)

รูปแบบของสมการนั้นได้มาจากการปรับปรุงสมการของ Darcy ซึ่งแทนความเร็วของการไหลด้วย v โดยหมายถึงความเร็วที่ไหลผ่านรูคดเคี้ยวของตัวกลาง และสำหรับตัวอย่างการใช้งานของสมการ Kozeny โดยความเร็วการไหลผ่านนั้นเป็นช่วงการไหลแบบเป็นชั้น (Laminar Flow) ในสภาวะการไหลแบบ 1 มิติ จะได้สมการความเร็ว คือ

$$v = \frac{\pi r^2}{8 \mu L} \Delta p \tag{3.3}$$

เมื่อนำสมการความเร็วดังกล่าวไปแทนลงในสมการ Kozeny จะได้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ดังนี้

$$\kappa = \frac{\varepsilon^3}{8 \tau (1 - \varepsilon)^2 a^2} \tag{3.4}$$

เมื่อ ε = Porosity (pore volume / bulk volume)

τ = Tortuosity (mean path length / total length)^2

a = Specific surface area (area / ceramic volume)

สำหรับกรณีอื่น สามารถนำสมการ Kozeny ไปประยุกต์ใช้งานได้ โดยให้สมการความเร็ว ซึ่งอยู่ในรูปของการหาค่าเลขเรย์โนลดส์สัมพันธ์กับความดันของการไหล ไปแทนในสมการ Kozeny ก็จะได้ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้เช่นกัน

3.6.2 ความสามารถในการกรองฝุ่น

โดยนำแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ไปติดตั้งกับชุดทดสอบ ดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 การติดตั้งเครื่องมือชุดป้อนฝุ่นเข้ากับชุดทดสอบ

การทำงานเริ่มจากป้อนฝุ่นจากชุดป้อนฝุ่นเข้าชุดทดสอบ โดยติดตั้งไว้ทางด้านบนของ Chamber ฝุ่นจะตกลงมาทางปล่องของชุดทดสอบและกระจายลงมาทางด้านล่าง ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ฝุ่นเข้าชุดทดสอบในลักษณะของการกรอง เมื่อความดันจากการก่อตัวของเค้กฝุ่นถึงค่าที่ตั้งไว้ ชุดทำความสะอาดแผ่นกรองจะส่งลมความดันสูงจากถังเก็บออกมาทางหัวฉีดแบบท่อเซ็ต (Jetpipe nozzle) สวนทางกับทิศทางการกรองฝุ่น ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเปิดของแผ่นกรองจะถูกจับเก็บด้วยกระดาษกรอง หลังจากการทดลองเสร็จสิ้นจะนำกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนัก แล้วหักออกด้วยน้ำหนัก

กระดาษกรองก่อนใช้ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตได้ และใช้เปรียบเทียบกับแผ่นกรองที่เคยผลิตมาก่อน ซึ่งประสิทธิภาพการกรองคำนวณตามสมการที่ 3.2

$$\% \text{ ประสิทธิภาพการกรอง} = (\frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}) \times 100 \quad (3.5)$$

โดย

$$C_{out} = \frac{\Delta W}{Qt} \quad (3.6)$$

$$Q = AV \quad (3.7)$$

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (3.8)$$

เมื่อ C_{in} = ความเข้มข้นฝุ่นเข้าสู่ระบบ (g/m^3)

C_{out} = ความเข้มข้นฝุ่นออกจากระบบ (g/m^3)

ΔW = ผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองก่อนและหลังการกรอง (g)

Q = อัตราการกรอง (m^3/s)

t = เวลาที่ใช้ในการกรอง (s)

A = พื้นที่การกรอง (m^2)

V = ความเร็วในการกรอง (m/s)

W_1 = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนการกรอง (g)

W_2 = น้ำหนักกระดาษกรองหลังการกรอง (g)

สำหรับประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวกรองสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$\eta = \frac{\Delta p_d - \Delta p_a}{\Delta p_d - \Delta p_o} \quad (3.9)$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

Δp_d = ความดันลดก่อนทำความสะอาด (มีปริมาณฝุ่นเกาะ)

Δp_a = ความดันลดหลังทำความสะอาด

Δp_o = ความดันลดสภาวะเริ่มต้น

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ ได้นำผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกในแง่การแจกแจงขนาดรูพรุน ความพรุน และความแข็งแรงเชิงกล มาวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิกที่มีความเหมาะสม จากนั้นนำแผ่นกรองที่ได้คัดเลือกแล้ว ไปทดสอบความสามารถในการดักจับฝุ่นเถ้าลอยของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของแผ่นกรองดังกล่าวต่อไป

4.1 คุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิก

4.1.1 การแจกแจงขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล

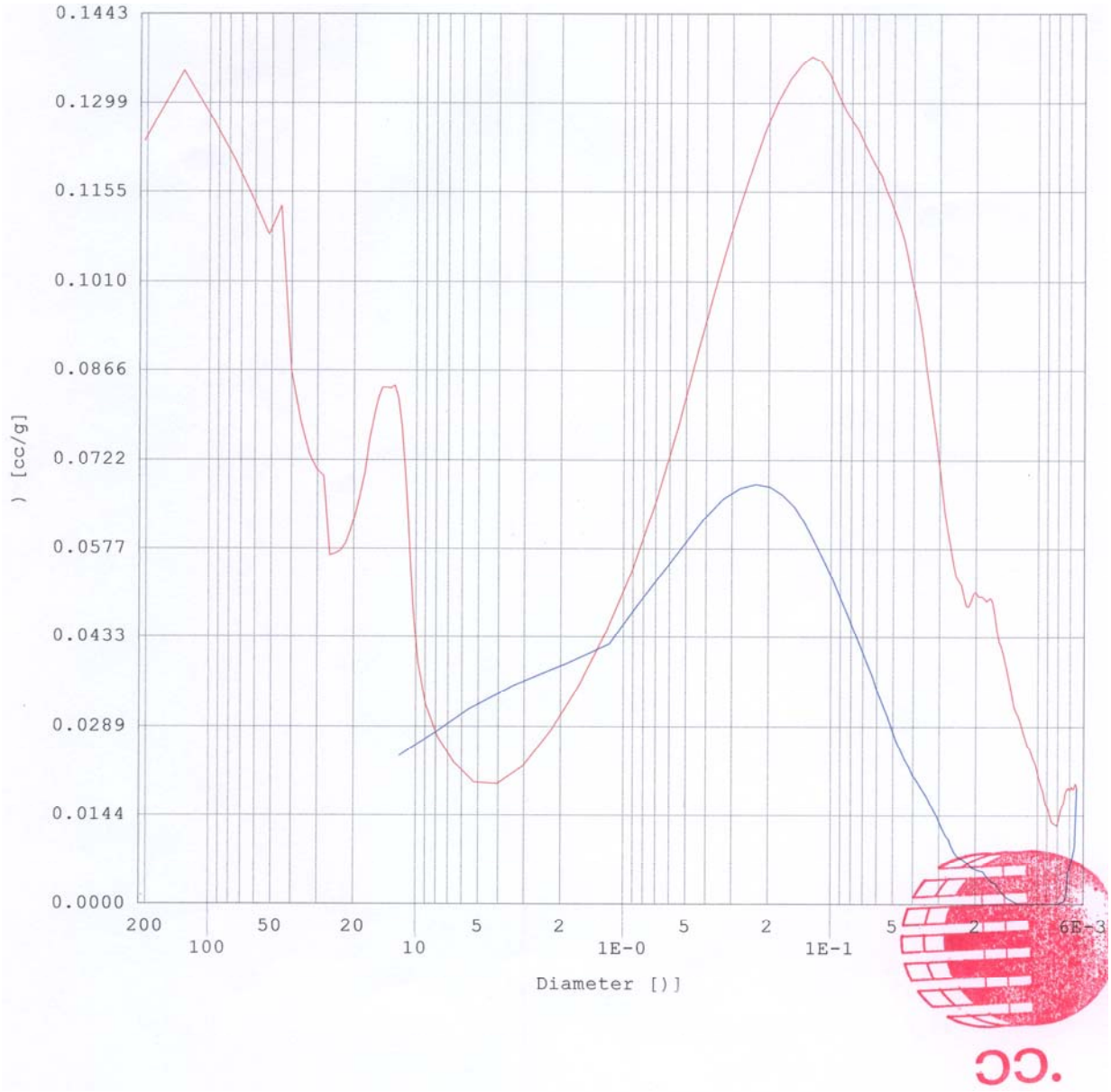
การแจกแจงขนาดรูพรุนและปริมาตรความพรุนของแผ่นกรองเซรามิก ทำการตรวจวัดโดยวิธี Mercury Porosimetry โดยใช้หลักการอัดปรอทเข้าไปแทนที่รูพรุนภายในของแผ่นกรองแล้วคำนวณโดยใช้สมการของ Washburn [29] จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C ค่าปริมาตรความพรุนภายในแผ่นกรองและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจะสูงขึ้น โดยมีค่าปริมาตรความพรุน 62.92% และ 73.72% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 μm และ 0.96 μm ตามลำดับ แต่เมื่อเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 1,250°C ซึ่งเป็นการเผาที่อุณหภูมิสุกตัวของแผ่นกรอง กลับทำให้ค่าปริมาตรความพรุนภายในแผ่นกรองต่ำลงคือ 23.46% แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงคือ 27.06 μm ดังผลการทดสอบในภาคผนวกท้ายเล่ม ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความแตกต่างจากแผ่นกรองที่ผลิตในระยะแรก [35] คือที่อุณหภูมิเผาแผ่นกรอง 700°C มีค่าปริมาตรความพรุนภายในมากกว่าการเผาแผ่นกรองที่อุณหภูมิ 900°C คือ 27.32% และ 20.47% ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของแผ่นกรองเผาที่อุณหภูมิ 700°C มีค่าเท่ากับ 0.067 μm โดยมีขนาดใหญ่กว่าของแผ่นกรองเผาที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.042 μm ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกที่ไม่เหมือนกัน

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น

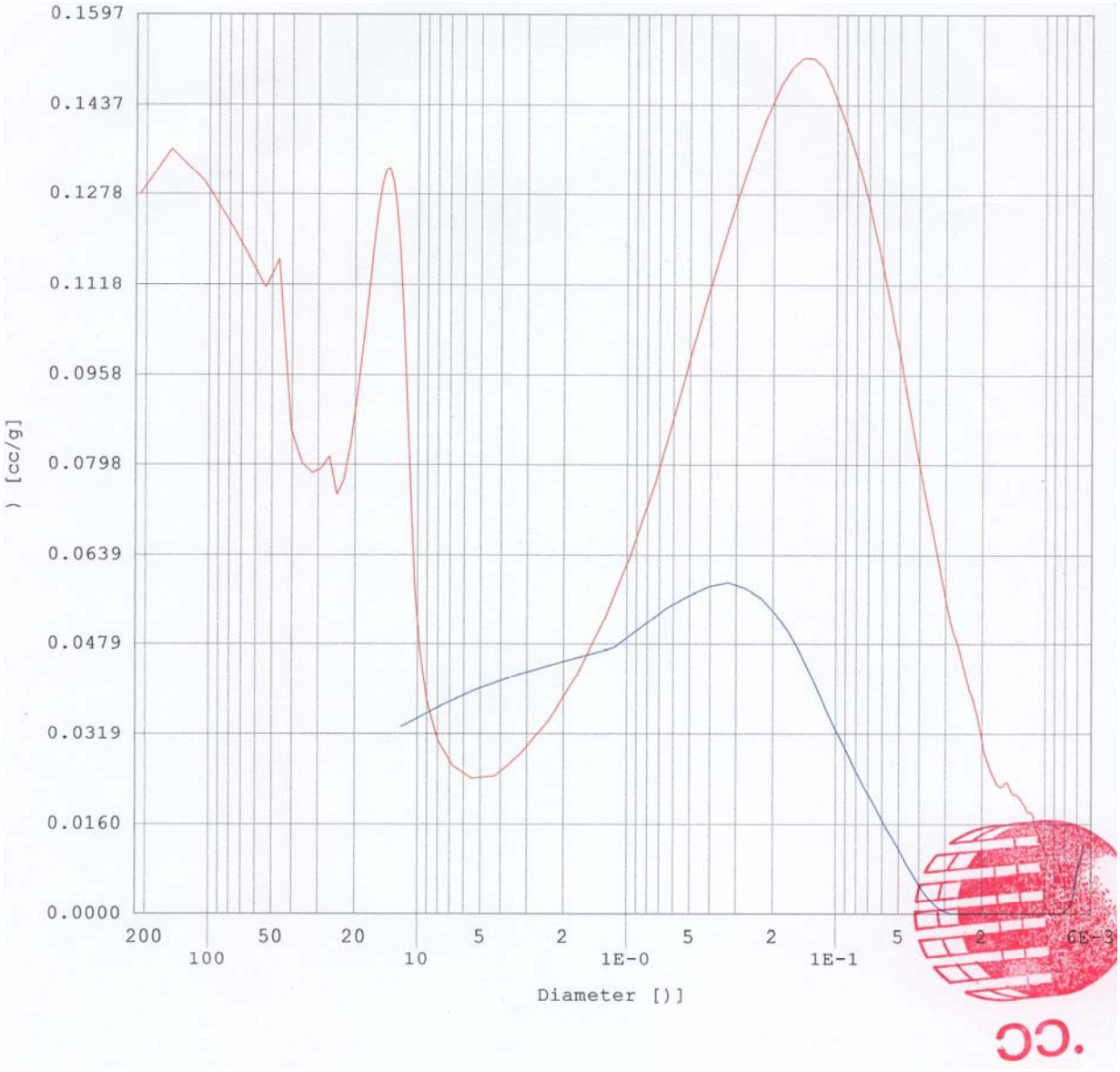
คุณสมบัติของตัวกรองเซรามิก	**อุณหภูมิการเผา**		
	700°C	**900°C**	**1,250°C**
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (μm)	0.35	0.96	27.06
ความพรุน (%)	62.92	73.72	23.46

หมายเหตุ: ตรวจวัดโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

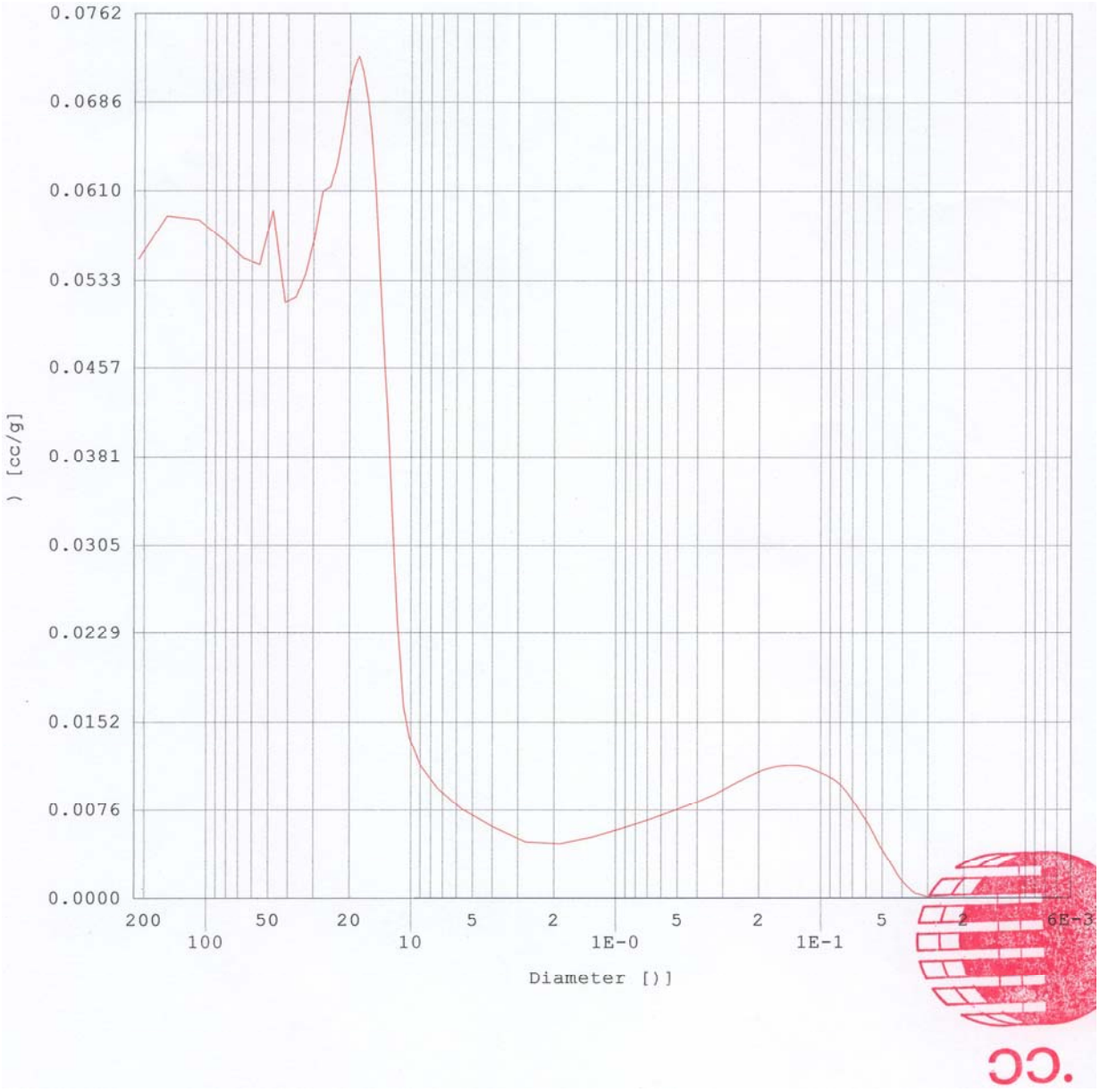
นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.1 การแจกแจงขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C จะกระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.006 ถึง 133.16 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 μm มากที่สุด ขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C กระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.007 ถึง 213.23 μm มีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.96 μm มากที่สุดดังรูปที่ 4.2 ส่วนที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C ขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิก กระจายตัวอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.007 ถึง 155.56 μm มีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27.06 μm มากที่สุด ดังรูปที่ 4.3 ส่วนรายละเอียดผลการทดสอบจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย แสดงไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม ซึ่งผลการทดสอบแตกต่างจากการผลิตแผ่นกรองเซรามิกในระยะแรก [35] โดยที่อุณหภูมิการเผา 700°C การกระจายตัวของรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 ถึง 1.57 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 μm มากที่สุด ในขณะที่การแจกแจงขนาดรูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C การกระจายตัวของรูพรุนอยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.006 ถึง 0.66 μm และมีปริมาณรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 μm มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องตาม Lee และ Richard [27] กล่าวไว้ถึง ผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวมหรือการเพิ่มอุณหภูมิการเผา ส่งผลทำให้อนุภาคของเม็ดดินแพร่เข้าหากันมากขึ้น เพราะพลังงานอิสระที่พื้นผิวลดลง เป็นผลทำให้อนุภาคที่เกิดการเชื่อมติดกันแข็งแรงมากขึ้นและขนาดรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง จำนวนรูพรุนจะลดน้อยลง โดยที่รูพรุนจะกระจายเป็นรูพรุนเดี่ยว



รูปที่ 4.1 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 700°C



รูปที่ 4.2 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 900°C



รูปที่ 4.3 การแจกแจงรูพรุนในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 1,250°C

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะมีผลต่อการลดขนาดรูพรุนแล้ว [27] ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 4.2 ผลจากอุณหภูมิการเผา ทำให้ตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C มีค่าความแข็งแรงเชิงกลมากกว่าตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C และ 700°C ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับระยะแรก [35]

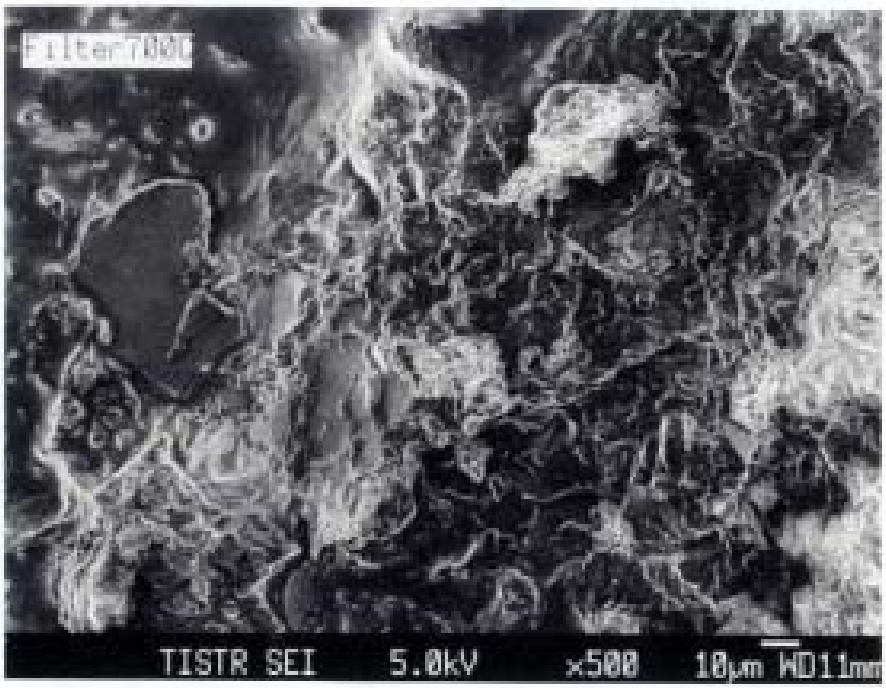
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงเชิงกลของตัวกรองเซรามิกที่ผลิตได้

แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย Flexural Strength (MPa)
700°C	0.20 ± 0.05
900°C	0.38 ± 0.08
1,250°C	3.05 ± 0.32

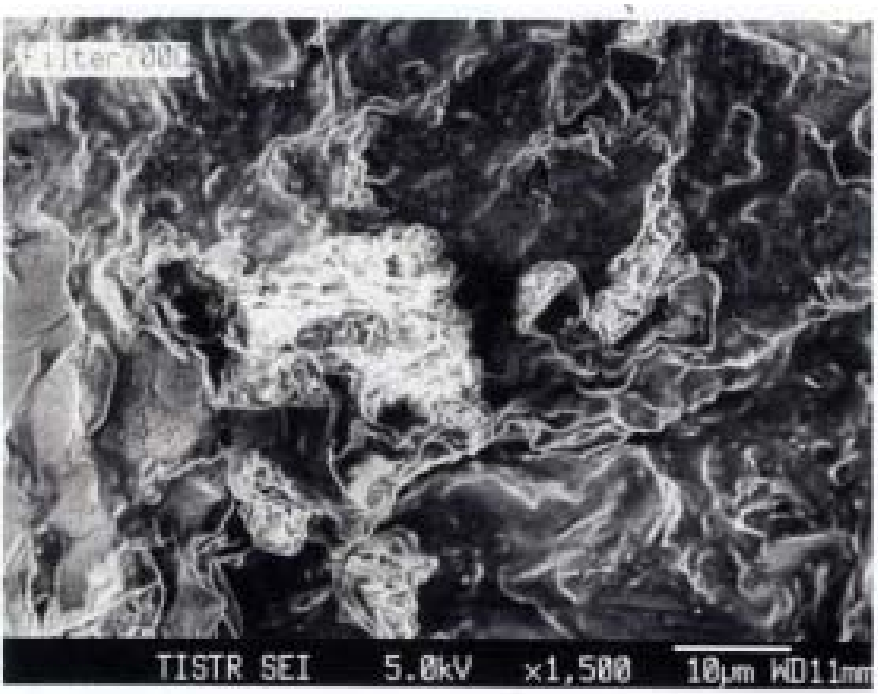
หมายเหตุ: ตรวจวัดโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

สำหรับโครงสร้างทางจุลภาคของตัวกรองจะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตภัณฑ์ของ JEOL รุ่น JSM-5410 ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ทำการถ่ายภาพโครงสร้างภายในตัวกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C ได้ผลดังรูปที่ 4.4 อุณหภูมิการเผา 900°C ได้ผลดังรูปที่ 4.5 และอุณหภูมิการเผา 1,250°C ได้ผลดังรูปที่ 4.6

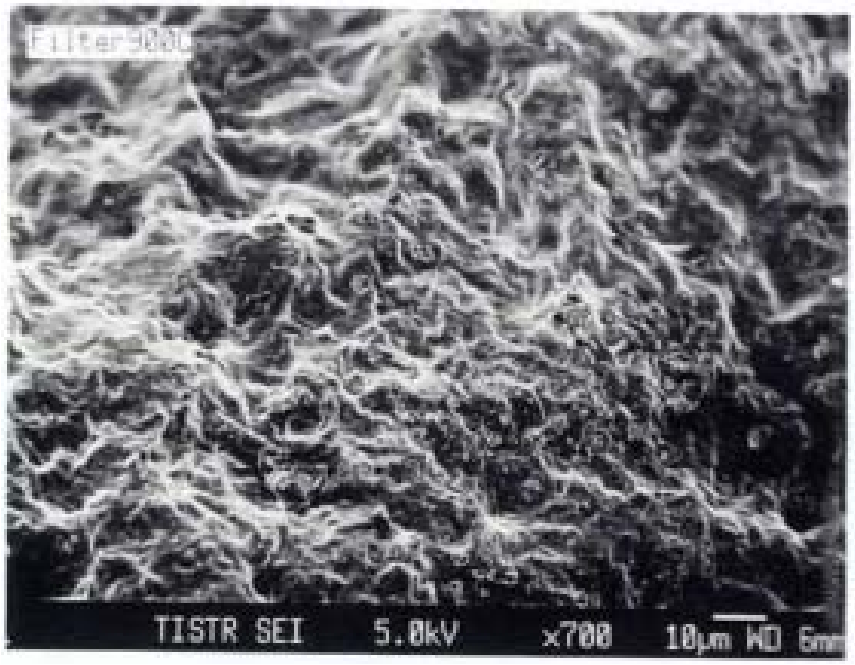


(ก) อุณหภูมิการเผา 700°C ขยาย 500 เท่า

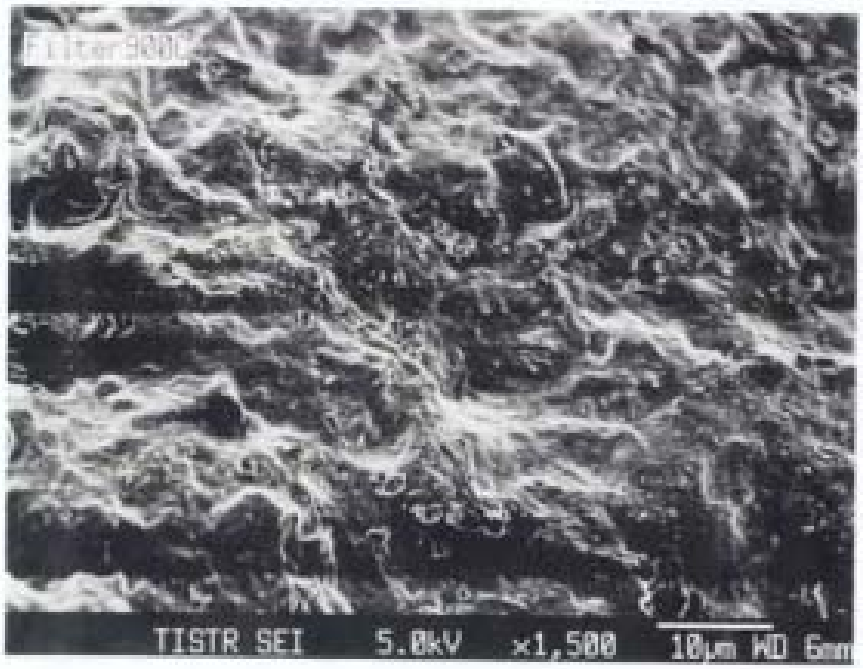


(ข) อุณหภูมิการเผา 700°C ขยาย 1,500 เท่า

รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 700°C (ก) ภาพถ่ายขยาย 500 เท่า; (ข) ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่า

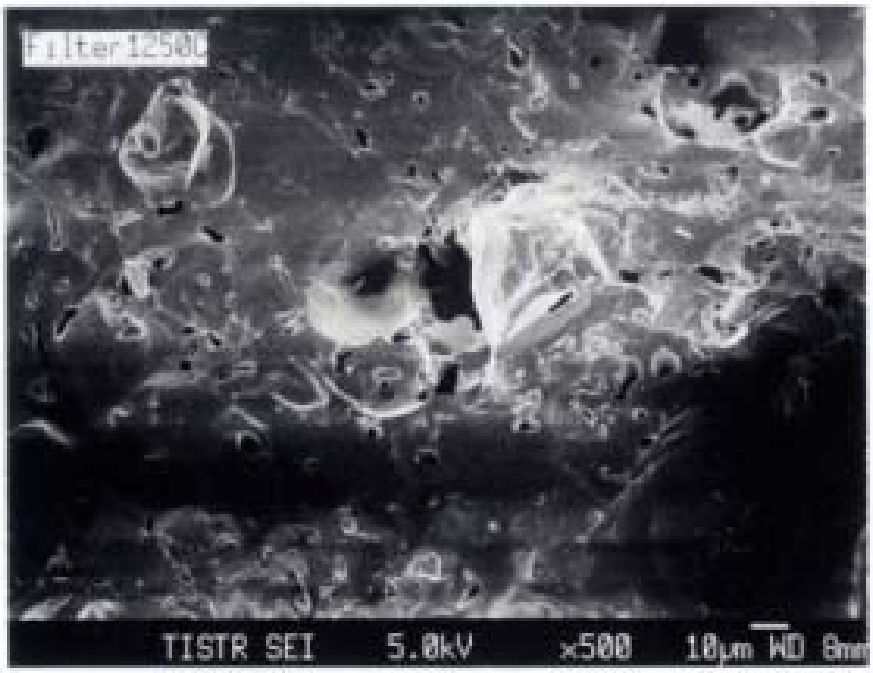


(ก) อุณหภูมิการเผา 900°C ขยาย 500 เท่า

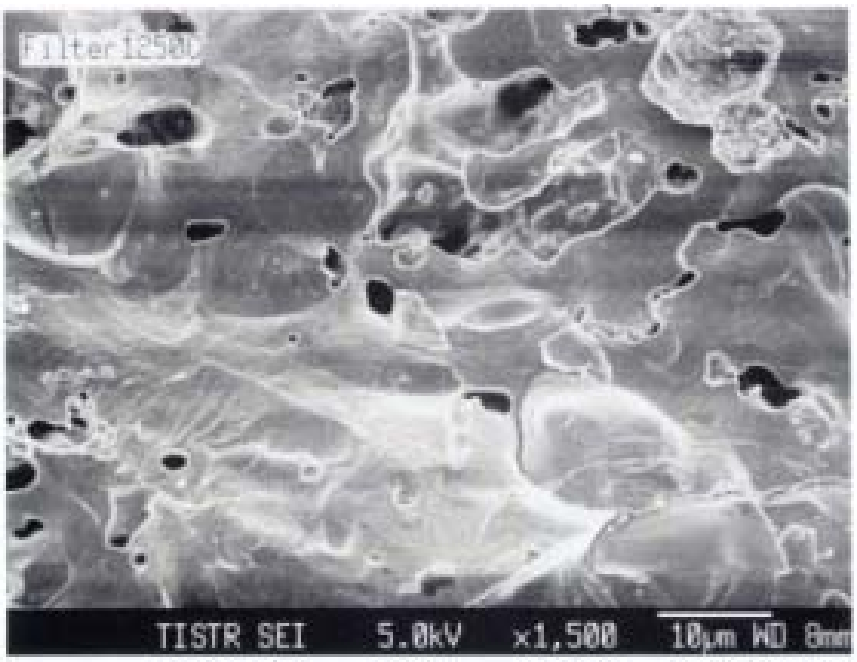


(ข) อุณหภูมิการเผา 900°C ขยาย 1,500 เท่า

รูปที่ 4.5 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 900°C (ก) ภาพถ่ายขยาย 500 เท่า; (ข) ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่า



(ก) อุณหภูมิการเผา 1250°C ขยาย 500 เท่า



(ข) อุณหภูมิการเผา 1250°C ขยาย 1,500 เท่า

รูปที่ 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C (ก) ภาพถ่ายขยาย 500 เท่า; (ข) ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 700°C พบว่าพื้นผิวของแผ่นกรอง มีรูพรุนขนาดเล็กและจำนวนรูพรุนน้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C โดยมีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 10 μm ดังรายละเอียดผลการทดสอบที่แสดงในภาคผนวกท้ายเล่ม

จากรูปที่ 4.6 พบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก ดังรายละเอียดผลการทดสอบที่แสดงในภาคผนวกท้ายเล่ม

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคข้างต้น พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C มีลักษณะพรุนน้อยกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 900°C แต่ทั้งแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C นั้นมีลักษณะพรุนมากกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1,250°C

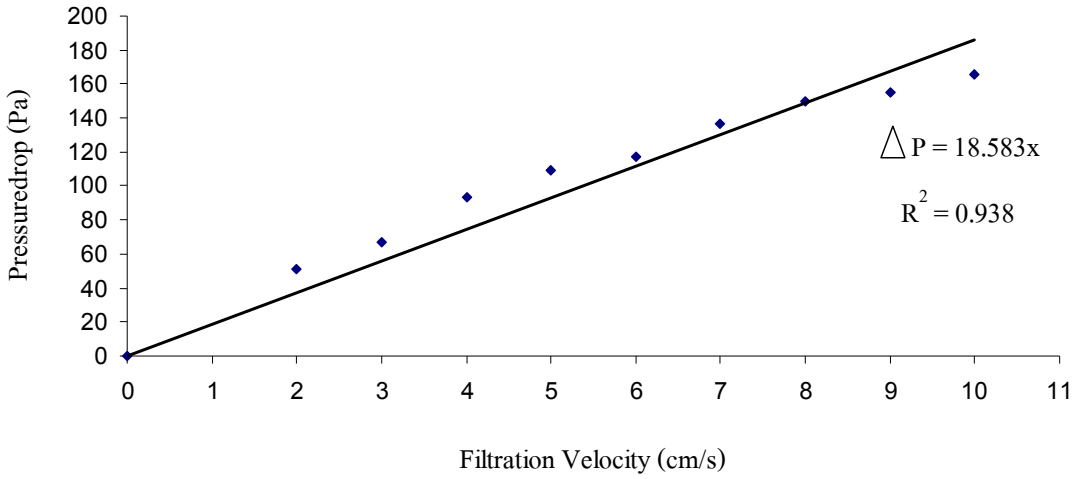
4.1.3 การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิก

เมื่อนำคุณสมบัติของแผ่นกรองเซรามิกทั้งสามมาเปรียบเทียบกัน พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นตัวกรอง เนื่องจากมีแข็งแรงเชิงกลสูงเพียงพอที่จะใช้เป็นตัวกรองได้ ส่วนแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C ในทางปฏิบัติพบว่าค่าความแข็งแรงเชิงกลไม่สูงพอที่จะสามารถใช้เป็นตัวกรอง เนื่องจากเกิดการแตกร้าวในขั้นตอนการประกอบเข้ากับชุดทดลองจนไม่สามารถนำมาทำการทดสอบได้ จึงได้นำแผ่นกรองเซรามิกที่อุณหภูมิการเผา 1,250°C มาทำการทดสอบเพียงอุณหภูมิเดียว แม้ว่ารูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะมีขนาดโตกว่าที่ต้องการ แต่ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของแผ่นกรองมีลักษณะเป็นชั้น และรูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่ตรงกัน ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวกรองได้

4.2 คุณสมบัติของแผ่นกรองในการดักเก็บฝุ่น

4.2.1 การหาค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้

เนื่องจากแผ่นกรองทำการเผาที่อุณหภูมิการเผา 700°C และ 900°C ไม่สามารถนำมาทดสอบประสิทธิภาพการจับเก็บฝุ่นได้ เนื่องจากความแข็งแรงเชิงกลน้อยเกินไปที่จะนำมาทดสอบได้ จึงได้ทำการทดสอบคุณสมบัติในการจับเก็บฝุ่นเฉพาะแผ่นกรองที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,250°C ซึ่งเมื่อพิจารณา จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลดคร่อมตัวกรองเซรามิกมีลักษณะแปรผันตามความเร็วแบบเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องตามความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวไว้ ทำให้สามารถนำเอาค่าความชันที่ได้จากกราฟมาคำนวณตามสมการ Kozeny-Carman [16] ได้ค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการกรองกับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ของตัวกรองเซรามิก

ตัวกรองเซรามิก	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ (m^2)
ตัวกรองเซรามิกที่ผลิต ณ ปัจจุบัน	9.69×10^{-11}
ตัวกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะแรก	1.11×10^{-11}
ตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่น	5.67×10^{-11}

จากตารางที่ 4.3 พบว่าตัวกรองเซรามิกที่ได้จากประเทศญี่ปุ่น [35] มีค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้มากกว่าตัวกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระยะแรก [35] แต่แผ่นกรองที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันมีค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้มากกว่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการยอมให้อากาศซึมผ่านได้ดีกว่า

ดังนั้นที่ความเร็วในการกรองเท่ากัน ค่าความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในปัจจุบันจะมีค่าน้อยกว่าตามสมการ Kozeny-Carman

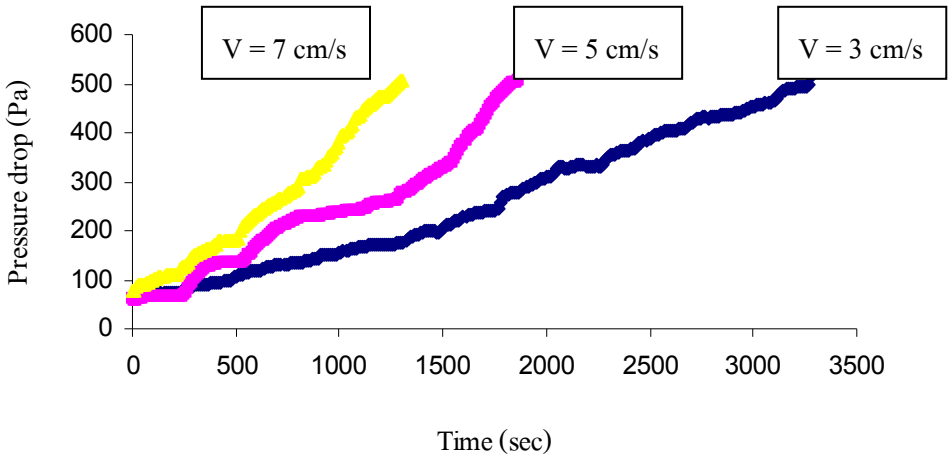
4.2.2 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นอันเนื่องมาจากผลของความเร็วในการกรองและผลของความดันลดของชั้นฝุ่น

สำหรับประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นงวดที่ความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa ใช้ระยะเวลาในการพัลส์เท่ากับ 200 ms กระทำการทดลอง 1 วัฏจักรการกรอง เงื่อนไขตัวแปรของความเร็ว 3 ค่า และ เงื่อนไขการกำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนไล่เค้กฝุ่น 3 ค่า คือที่ความเร็วการกรอง 3, 5 และ 7 cm/s กำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนไล่เค้กฝุ่นไว้ที่ 500, 700 และ 900 Pa ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองที่ความเร็ว 5 cm/s และ 7 cm/s โดยกำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนไล่เค้กฝุ่นไว้ที่ 500 Pa และ 700 Pa ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ เนื่องจากในขั้นตอนการทดลองไม่สามารถมองเห็นฝุ่นจับตัวบนผิวหน้าแผ่นกรองเซรามิก แต่มีค่าความดันลดคร่อมเกิดขึ้นอย่างเร็วจนถึงค่าความดันลดคร่อมที่ตั้งไว้ จึงได้ยกเลิกผลการทดลองที่สภาวะดังกล่าวออกไป

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นของแผ่นกรองเซรามิก

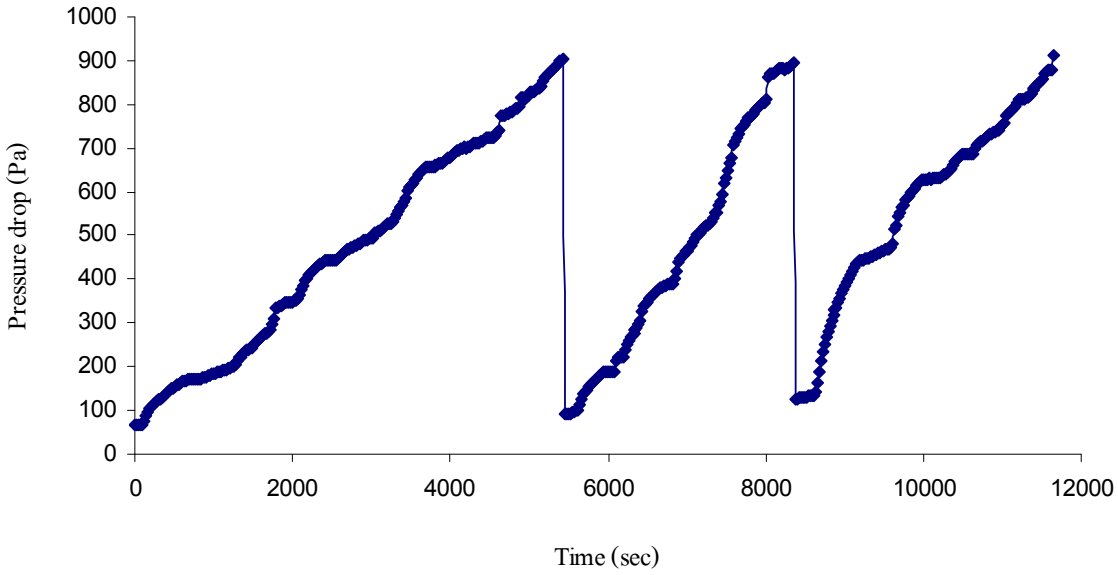
ความเร็วในการกรอง	ความดันลดที่กำหนดไว้ก่อนไล่เค้กฝุ่น (Pa)		
(cm/s)	500	700	900
3	99.2	99.1	98.3
5	-	-	97.8
7	-	-	97.5

จากตารางที่ 4.4 พบว่าความเร็วในการกรองที่สูงขึ้น และความดันลดที่กำหนดไว้ก่อนไล่เค้กฝุ่นที่เกิดขึ้นบนแผ่นกรองที่มากกว่ามีผลให้ประสิทธิภาพการกรองลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วการกรองที่สูงทำให้ความดันลดคร่อมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกด้วย ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิก ภายใต้สภาวะการกรองที่ความเร็วการกรองต่างๆ กัน

ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น เป็นสิ่งสำคัญที่สุดของการผลิตแผ่นกรองเพื่อกรองฝุ่นปนเปื้อนในอากาศ สำหรับระบบกรองฝุ่นที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมต่างๆ สภาวะการกรองเป็นแบบต่อเนื่องทำความสะอาดแผ่นกรองโดยการพ่นอากาศความดันสูง (Pulse Jet) ในลักษณะย้อนทิศทางการกรอง เพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงในอุตสาหกรรม การหาประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นกระทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขแบบต่อเนื่องที่อัตราการกรอง 3 cm/s ความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa ใช้ระยะเวลาในการพัลส์เท่ากับ 200 ms เมื่อดำเนินการทดลองไปได้ 3 วัฏจักรการกรอง พบว่ามีฝุ่นหลุดผ่านแผ่นกรองเซรามิกออกมาทางด้านหน้าแผ่นกรอง จึงได้หยุดทำการทดลอง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa

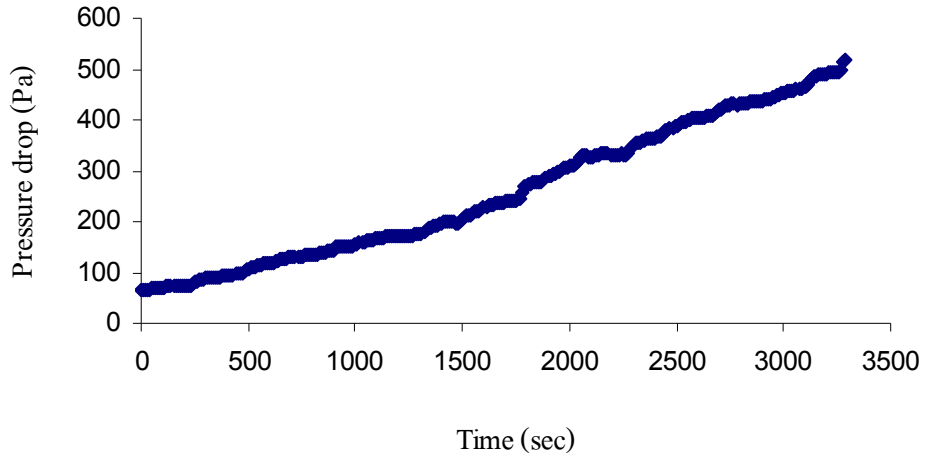
จากรูปที่ 4.9 พบว่าวัฏจักรการกรองแต่ละวัฏจักรใช้เวลาในการกรองไม่เท่ากัน เนื่องจากการทำความสะอาดตัวกรองที่ไม่สมบูรณ์ของวัฏจักรการกรองอันดับแรก ทำให้เกิดความดันลดตกค้างในตัวกรอง(Residual Pressure Drop) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dittler และ Kasper [20] กล่าวถึงปรากฏการณ์ของเค้กฝุ่นที่ติดค้างอยู่บนผิวตัวกรอง อันเนื่องมาจากการทำความสะอาดตัวกรองที่ไม่สมบูรณ์เรียกว่า Patchy Cleaning ส่งผลทำให้เกิดความดันลดตกค้างในตัวกรองเซรามิกและอัตราการเพิ่มของความดันลดไม่เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น

เค้กฝุ่นที่ติดค้างอยู่บนตัวกรองเซรามิก ส่งผลกระทบต่อความดันลดเริ่มต้นของวัฏจักรมีค่าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ของการเพิ่มความดันน้อยลงกว่าเดิม ทำให้วัฏจักรการกรองสั้นลงแปรผันตามแนวโน้มของความดันตกค้างเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.9 โดยความดันลดตกค้างในตัวกรองที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อายุการใช้งานของตัวกรองเซรามิกสั้นลง

4.2.3 การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

ระบบการกรองฝุ่นที่ดีจำเป็นต้องมีระบบการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ โดยความดันทำความสะอาดต้องเหมาะสมต่อระบบการกรองฝุ่น ทั้งนี้ความดันที่ใช้ต้องไม่สูงมากจนส่งผลต่อแผ่นกรองเซรามิกทำให้เกิดความเสียหายกับแผ่นกรองและสิ้นเปลืองพลังงานจนเกินไป แต่ไม่น้อยจนไม่สามารถไล่เค้กฝุ่นออกได้ เกิดการตกค้างในตัวกรองมากส่งผลต่ออายุการใช้งานให้สั้นลง

พิจารณารูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันลดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น หมายความถึงการเกิดของชั้นฝุ่นบนผิวแผ่นกรองมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องตามงานวิจัยของมานะ อมรกิจบำรุง [16] เมื่อนำข้อมูลการทดลองไปหาค่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นภายใต้สภาวะการกรองแบบเป็นงวด ที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa

สำหรับการทดสอบแผ่นกรองเซรามิกได้ทำการบันทึกภาพแผ่นกรองเซรามิกในขั้นตอนต่างๆ คือ 1. บันทึกภาพแผ่นกรองก่อนทำการทดสอบ โดยที่แผ่นกรองยังคงสะอาดอยู่ 2. ขณะทำการทดสอบผิวหน้าแผ่นกรองด้านกรองจะมีฝุ่นเกาะ ซึ่งความหนาของชั้นฝุ่นจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการกรอง และ 3. ทำการบันทึกภาพแผ่นกรองภายหลังจากทำความสะอาด ทั้งนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบลักษณะของแผ่นกรองเมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆ

รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงแผ่นกรองเซรามิกก่อนการทดสอบการกรองฝุ่น รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นการก่อตัวของชั้นฝุ่นบนผิวหน้าแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในระหว่างการทดลอง และรูปที่ 4.13 แผ่นกรองเซรามิกหลังจากการพัลส์ทำความสะอาด

รูปที่ 4.11 แผ่นกรองเซรามิกก่อนทำการทดสอบการกรอง

รูปที่ 4.12 แผ่นกรองเซรามิกที่อยู่ในระหว่างทดสอบการกรอง

รูปที่ 4.13 แผ่นกรองเซรามิกหลังจากทำความสะอาดแล้ว

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิต ณ ปัจจุบัน

ความเร็วในการกรอง	ความดันลดที่กำหนดไว้ก่อนไล่เค้กฝุ่น (Pa)		
(cm/s)	500	700	900
3	98.5	97.5	97.3
5	-	-	93.8
7	-	-	86.6

สำหรับผลการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดแผ่นกรองเซรามิก ดังตารางที่ 4.5 พบว่าการกรองที่ความเร็วต่ำและการสะสมความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกอันเนื่องมาจากการก่อตัวของชั้นฝุ่นที่น้อยมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่สูงกว่าการกรองที่ความเร็วสูงและการสะสมความดันที่มากกว่า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

หลังจากการผลิตและได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของแผ่นกรองเซรามิก ได้แก่ การแจกแจงของขนาดรูพรุน ปริมาตรความพรุนและความแข็งแรงเชิงกล คุณสมบัติในการกรองฝุ่นและประสิทธิภาพในการกรองฝุ่น รวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับแผ่นกรองเซรามิกที่ได้ผลิตขึ้นในระยะแรก มีข้อสรุปดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

5.1.1.1 การแจกแจงขนาดรูพรุนและความแข็งแรงเชิงกล

การแจกแจงขนาดรูพรุนและปริมาตรความพรุนของแผ่นกรองเซรามิกทำการตรวจวัดโดยวิธี Mercury Porosimetry และค่าความแข็งแรงตรวจวัดตามวิธี ASTM C-773 พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 700°C มีค่าความพรุน 62.92% ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.35 μm และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.20 ± 0.05 MPa สำหรับแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C มีค่าความพรุน 73.72% ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.96 μm มีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 0.38 ± 0.08 MPa ส่วนแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1,250°C มีค่าความพรุน 23.46% ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 27.06 μm และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 ± 0.32 MPa

5.1.1.2 การคัดเลือกแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสมในการกรอง

จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นกรองเซรามิก พบว่าแผ่นกรองเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 1,250°C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 27.06 μm มีค่าความพรุน 23.46% และค่าความแข็งแรงเชิงกลเท่ากับ 3.05 ± 0.32 MPa เป็นตัวกรองเซรามิกที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูงพอสามารถประกอบเข้ากับชุดทดลอง และทนต่อแรงดันในการทำความสะอาดได้ ส่วนการเผาแผ่นกรองเซรามิกที่ 700°C และ 900°C แม้จะมีคุณสมบัติของความพรุนที่มากกว่าแต่ก็ไม่สามารถใช้เป็นตัวกรองได้เนื่องจากความแข็งแรงเชิงกลที่น้อย แผ่นกรองเกิดการแตกเสียหายจนไม่สามารถประกอบเข้ากับชุดทดลองได้

5.1.2 คุณสมบัติแผ่นกรองในการการกรองฝุ่น

5.1.2.1 สภาพให้อากาศซึมผ่านได้ของแผ่นกรองเซรามิก

จากการทดลองและการคำนวณพบว่า ค่าสภาพให้อากาศซึมผ่านได้ของแผ่นกรองเซรามิกที่ส่วนผสมดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60 และอุณหภูมิการเผา 1,250ºC มีค่าเท่ากับ 9.69 $\times 10^{-11}$ m^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะแรก [35] โดยมีค่าเท่ากับ $1.11 \times 10^{-11} m^2$ ที่ความเร็วการกรองเท่ากัน ค่าความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะนี้จะมีค่าน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามสมการ Kozeny-Carman จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะนี้น้อยกว่า และมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า

5.1.2.2 ประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นอันเนื่องมาจากผลของความเร็วในการกรองและผลของความดันลดของชั้นฝุ่น

แผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะนี้ มีปัญหาเรื่องขนาดรูพรุน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำทำให้ขนาดรูพรุนโตเกินไป และทำให้ฝุ่นผ่านแผ่นกรองไปได้ในปริมาณมาก เมื่อเข้าสู่วัฏจักรการกรองที่ 3 ในขั้นตอนการทดสอบการกรองฝุ่นแบบต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพในการกรองภายใต้สภาวะการกรองแบบต่อเนื่องได้ ส่วนการทดลองภายใต้การกรองแบบสภาวะเป็นงวด พบว่าที่ความเร็วในการกรอง 3, 5 และ 7 cm/s มีประสิทธิภาพการกรองเกือบเท่ากันคือ ประมาณ 98% ส่วนผลของความดันลดของชั้นฝุ่นในการทดลองนี้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากเหตุผลของแผ่นกรองเซรามิกที่มีขนาดรูพรุนโตเกินไป เมื่อความเร็วการกรองมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฝุ่นหลุดรอดผ่านออกมาทางด้านหน้าแผ่นกรอง

5.1.3 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด

สำหรับประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้น ที่ความดันทำความสะอาด 300 kPa มีค่าเท่ากับ 98% ซึ่งมีค่าเท่ากันกับประสิทธิภาพการทำความสะอาดของแผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตในระยะแรก [35] ที่ความดันทำความสะอาดเดียวกัน และจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดแผ่นกรองที่ผลิตในระยะนี้มีค่าสูงมาก โดยเงื่อนไขของการทดลองคือการกำหนดความดันลดคร่อมแผ่นกรองเซรามิกก่อนการทำความสะอาดไว้ 3 ค่า คือ 500, 700 และ 900 Pa ผลจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดมีค่าเท่ากัน จึงอาจจะกล่าวได้ว่าความดันที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นกรองเซรามิกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้ คือ 300 kPa

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยผลิตแผ่นกรองเซรามิกโดยใช้ฟองน้ำเป็น โครงสร้างสำหรับให้ดินรีดดูดอากาศ ชื่อทางการค้าว่า PBA จากบริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด ผสมกับน้ำที่สัดส่วนการผสมดิน PBA : น้ำ เท่ากับ 40 : 60 โดยน้ำหนักยึดเกาะเพื่อทำการขึ้นรูปเป็นแผ่น แล้วนำไปเผาให้ดินสุกตัวที่อุณหภูมิ 1,250°C สามารถใช้กรองฝุ่นได้ในระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นจึงยังไม่มีความเหมาะสมที่นำไปใช้งานแต่สามารถใช้เป็นชั้นรองรับสำหรับการผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีการเคลือบผิวด้านนอกด้วยชั้นผิวที่มีรูพรุนขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี อนึ่งแนวทางการพัฒนาเพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักๆ ได้แก่

5.2.1 การเคลือบผิวแผ่นกรองเซรามิก

แผ่นกรองเซรามิกที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้มีรูพรุนโตเกินไป ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้ฟองน้ำเป็นโครงสร้าง ทำให้ใช้งานได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานซึ่งจะส่งผลต่อการทำความสะอาด และการเปลี่ยนตัวกรองบ่อยๆ ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบสูงขึ้น และที่สำคัญที่สุดคือ แผ่นกรองเซรามิกมีลักษณะชั้นเดียว ไม่มีชั้นผิวไว้คอยป้องกันการเล็ดลอดของอนุภาคฝุ่นเข้าไปในชั้นโครงสร้างทำให้แผ่นกรองเกิดการอุดตันได้ง่าย แนวทางการแก้ไขปัญหาคือ การผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีลักษณะเป็นแบบ 2 หรือ 3 ชั้นคือ มีชั้นโครงสร้างหรือชั้นรองรับที่มีรูขนาดใหญ่ซึ่งได้จากการวิจัยในครั้งนี้ และมีการเคลือบ (Coating) ชั้นผิวแผ่นกรองให้มีรูขนาดเล็กเพื่อป้องกันการเล็ดลอดของอนุภาคฝุ่นเข้าไปในชั้นโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้กระบวนการกรองเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของตัวกรองเท่านั้น (Surface Filtration)

5.2.2 การขึ้นรูปตัวกรองเซรามิกเป็นแท่ง

เนื่องจากรูปร่างของตัวกรองเซรามิกส่วนใหญ่ที่ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ทำการขึ้นรูปแบบแท่งซึ่งง่ายต่อการติดตั้งและประหยัดค่าใช้จ่ายในแง่ของพื้นที่ผิวการกรอง ดังนั้นงานวิจัยในขั้นต่อไปเมื่อได้ผลิตแผ่นกรองเซรามิกที่มีความเหมาะสมแล้ว ซึ่งได้จากการนำแผ่นกรองเซรามิกที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปทำการเคลือบผิวด้านนอกด้วยชั้นผิวที่มีรูพรุนขนาดเล็ก และทำการทดสอบแผ่นกรองหลังจากนั้นควรทำการออกแบบขึ้นรูปแผ่นกรองเซรามิกเป็นรูปแท่งที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

5.2.3 การผลิตตัวกรองเซรามิกในระดับอุตสาหกรรม

การผลิตตัวกรองเซรามิกในงานวิจัย เป็นการผลิตและทดสอบแผ่นกรองเซรามิกขนาดเล็ก ดังนั้นสำหรับขั้นตอนการวิจัยต่อไปคือ ควรหาแนวทางในการผลิตตัวกรองขนาดใหญ่เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมจริง โดยสามารถผลิตได้คราวละมากๆ เพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

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, No.1, 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, No.1, pp. 55-62.

7. เจริญพงษ์ สุขสวัสดิ์, โฆษิต พุกะทรัพย์ และยงค์ บำรุงวงศ์ดี, 2536, **เครื่องขึ้นรูปเซรามิก**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 64-72.

8. ชัชวาล สุขมั่น, 2543, **การผลิตและพัฒนาชั้นรองรับเยื่อแผ่นอะลูมินาชนิดไมโครฟิลเตรชัน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-77.

9. ปฏิมา เทพยายน, 2540, **การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดไมโครฟิลเตรชันโดยใช้อะลูมินา**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 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, No.3, 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, No.1-2, pp.113-120.

13. Giernoth, B. and Renz,U., 1996, “Investigation in Hot Gas Filtration with Ceramic Filter Elements”, **Proceedings of the 3rd 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, “พฤติกรรมการกรองและการไล่เค้กฝุ่นออกจากตัวกรองเซรามิก”, **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**, 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, No.1-3, 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, No.3, 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. Dittler, A. and Kasper, G., 2002, “Measurement of Local Frequencies of Filter Regeneration and their Effect on Successive Operating Cycles”, **Proceedings of the 5th International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures**, September 17-20, Morgantown, West Virginia, USA.

21. Hemmer, G. and Kasper, G., 2002, “Predicting the Operating Behavior of Ceramic Filters from Thermo-Mechanical Ash Properties”, **Proceedings of the 5th International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures,** September 17-20, Morgantown, West Virginia, USA.

22. Pastila, P., Curzio, L.E., Nikkilä, P.A. and Mäntylä, T., 2002, “Microstructure and Fracture of Some SiC-based Clay Bonded Hot Gas Filter Materials After Exposure to Thermal Cycling and/or High Temperature Water Vapour”, **Proceedings of the 5th International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures**, September 17-20, Morgantown, West Virginia, USA.

23. Yamamoto, N., Fujii, M., Kumagai, K. and Yanagisawa, Y., 2004, “Time Course Shift in Particle Penetration Characteristics Through Capillary Pore Membrane filters”, **Aerosol Science**, Vol. 35, No. 6, pp. 731-741.

24. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ชิคาโอะ คานาโอกะ และจุฑามาศ เกตุทัต, 2544, **มลภาวะอากาศ**, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ ฯ, หน้า 172-222.

25. ทรงวุฒิ ศรีสว่าง, 2540, **การกำจัดเถ้าลอยด้วยเครื่องสครับเบอร์แบบหมุนวน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 33-42.

26. Seville, J.P.K.(Ed.), 1997, **Gas Cleaning in Demanding Applications**, Blackie Academic & Professional, London, pp. 96-97.

27. Richard, L.L., 1992, “Primer on Engineering Ceramic”, **Advance Material & Process**, Vol. 6, No. 10, pp. 1-31.

28. McCabe, W.L., Smith, J.C.and Harriott, P., 1993, **Unit Operations of Chemical Engineering**, 5 th ed., McGraw - Hill, New York, 1130p.

29. Terrance, A., 1997, **Particle Size Measurement**, Vol. 1, 5th ed., J.J.Press, London, pp. 300-410.

30. Reed, J.S., 1989, **Introduction to the Principles of Ceramic Processing**, John Wiley & Sons, New York, pp. 74-111.

31. Lee, E., 1992, **Ceramic Microstructure**, Chapman & Hall, New Jersey, pp.1-65.

32. Mchale, E., 1992, **Ceramic Powder and Processing**, John Wiley & Sons, New York, pp. 120-121.

33. Venkataraman, K., Choate, W.T., Torre, E.R. and Husung Hanu R.Batch, R.D., 1988, “Characterization Studies of Ceramic Membranes, A Novel Technique Using a Coulter Porometer”, **Journal of Membrane Science**, Vol. 39, No.3, pp. 259-271.

34. **เอกสารการทดสอบความแข็งแกร่งเชิงกลของวัสดุ**, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

35. ภาสกร ทองนิ่ม, 2546, **การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของตัวกรองเซรามิกเพื่อจับเก็บฝุ่นขนาดเล็ก**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีหน้า 1-112.

36. **เอกสารบรรยายบอร์ด FGD**, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

37. Mitchell , C S., 1997, “Hot Gas Particulate Filtration”, **IEA Coal Research**, Vol. 95, p. 54.

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองและการทำความสะอาด

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิก

การทดลองกระทำโดยป้อนฝุ่นที่มีความเข้มข้นเข้าสู่ระบบเท่ากับ 4.3 g /m^3 ความเร็วในการกรอง 3 cm/s ภายในชุดทดลองซึ่งมีพื้นที่ทางเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm น้ำหนักกระดาษกรองก่อนกรองเท่ากับ 0.8563 g หลังจากทำการกรองเป็นเวลา 57 นาที น้ำหนักกระดาษกรองเพิ่มขึ้นเป็น 0.8817 g หาประสิทธิภาพการกรองของแผ่นกรองเซรามิกทำได้ดังนี้

หาอัตราการกรองได้จากสมการที่ 3.7

$$= \pi r^2 \times V$$
$$= \pi\ (0.10/2)^2 \times 0.03$$
$$= 2.3562\times10^{-4}\ m^3/s$$

หาผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองก่อนและหลังการกรอง จากสมการที่ 3.8

$$\Delta W = 0.8817-0.8563 = 0.0254\ g$$

หาความเข้มข้นฝุ่นออกจากระบบจากสมการที่ 3.6

$$C_{out} = 0.0254\ /(2.3562\times10^{-4}\times57\times60)$$
$$= 0.0315\ g/m^3$$

หาประสิทธิภาพการกรองจากสมการที่ 3.5 ได้

ประสิทธิภาพการกรอง $= \{(4.3 - 0.0315)/4.3\} \times100$

$= 99.27\ \%$

ตัวอย่างการคำนวณการคำนวณประสิทธิภาพการทำความสะอาด

ก่อนการกรองความดันลดเริ่มต้นคร่อมแผ่นกรองเซรามิกมีค่าเท่ากับ 67.3947 Pa เมื่อทำการกรองเป็นระยะเวลาช่วงหนึ่งความดันลดเพิ่มขึ้นถึง 510.12 Pa จึงได้ทำความสะอาดด้วยอากาศอัดความดันทำความสะอาดเท่ากับ 300 kPa ความดันคร่อมแผ่นกรองเซรามิกลดลงเหลือ 82.1097 Pa หาประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่เกิดขึ้น ทำได้โดยใช้สมการที่ 3.9 ได้ค่า

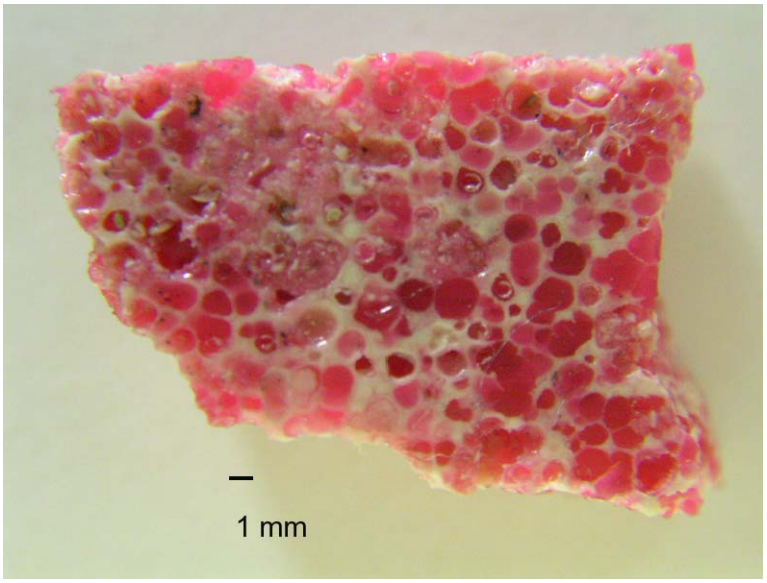
$$\eta = (510.12 - 82.1097)/(510.12 - 67.3947\ ) = 0.9667$$
$$= 96.67\ \%$$

ภาคผนวก ข

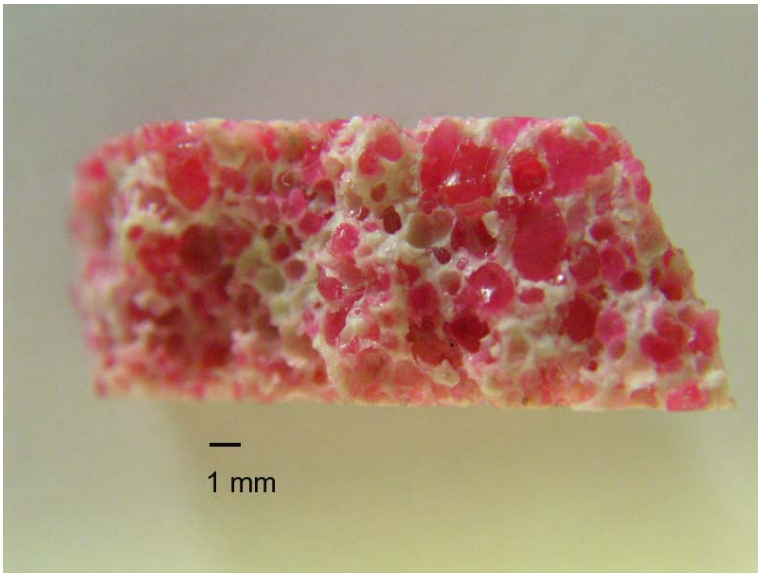
การทดสอบรูพรุนเปิดด้วยเรซิน

เนื่องจากรูพรุนซึ่งเกิดจากโครงสร้างของฟองน้ำในแผ่นกรองเซรามิก มีขนาดไม่สม่ำเสมอซึ่งอาจจะเป็นรูพรุนเปิดที่ต่อถึงกันหรือไม่ต่อถึงกันก็ได้ จึงทำการทดสอบโดยการอัดเรซินเหลวลงบนพื้นผิวหน้าแผ่นกรองเซรามิก และหลังจากรอให้เรซินแข็งตัวจึงทำการผ่าแผ่นกรองเซรามิกเพื่อดูลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างของฟองน้ำ ผลที่ได้ปรากฏว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของรูพรุนเปิดที่ต่อถึงกันซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณคือ 1 mm ดังรูปข้างล่าง

รูปที่ ข.1 แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน



รูปที่ ข.2 แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 900ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน



รูปที่ ข.3 แผ่นกรองเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,250ºC อัดเรซินเพื่อทดสอบรูพรุนเปิดต่อถึงกัน

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
แห่งประเทศไทย

วว.

คำขอบริการที่ ทว. 36/48 **ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ (ฝทว.)** ที่ ทป. 72/48

วันที่ 3 มิถุนายน 2548

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การทดสอบ/วิเคราะห์ :– แผ่นกรองเซรามิกผงที่อุณหภูมิ 700 °C, 900 °C และ 1250 °C

วิธีทดสอบ/วิเคราะห์ :– Flexural strength, FE-SEM และ Pore size distribution

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์ :–

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่างแผ่นกรองเซรามิกผงที่อุณหภูมิ 700°C, 900°C และ 1250°C แสดงดังตาราง

แผ่นกรองเซรามิกผงที่อุณหภูมิ	ค่าเฉลี่ย Flexural strength (MPa)	FE-SEM	Pore size
700°C	0.20 ± 0.05	หน้า 2	หน้า 5-12
900°C	0.38 ± 0.08	หน้า 3	หน้า 13-20
1250°C	3.05 ± 0.32	หน้า 4	หน้า 21-28

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์

(นางสาววาสนา ฉ้อวงศ์)

(นางปณิดา ทวีอาวร)

(นายนรศ สมสนุก)

ผู้รับรอง

(นายสุนทร ภูมิดัชชี)

ตำแหน่ง ผู้จัดการ

รักษาการในตำแหน่ง

ผู้อำนวยการฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ

ผู้ตรวจสอบ

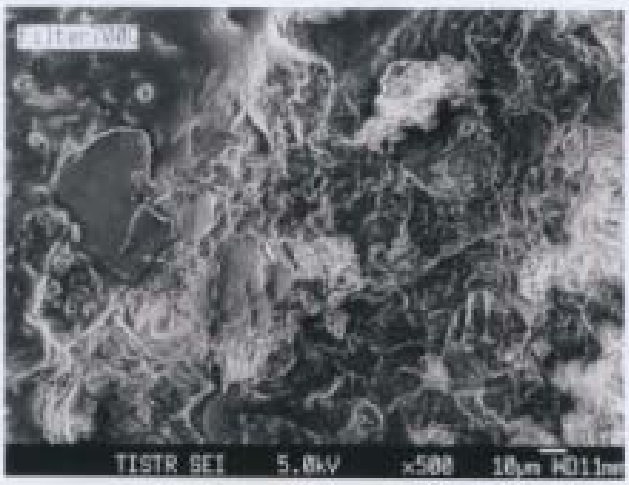
(นางสาวศิริพร อาษาธีรพิทยา)

FM-MTD-GEN 02-01 แก้ไขครั้งที่ 0

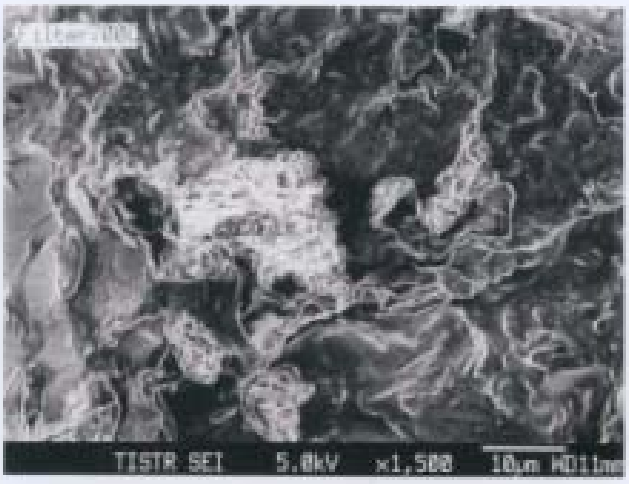
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ/วิเคราะห์เท่านั้น

ห้ามนำผลการทดสอบ/วิเคราะห์ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.

ก)



ข)

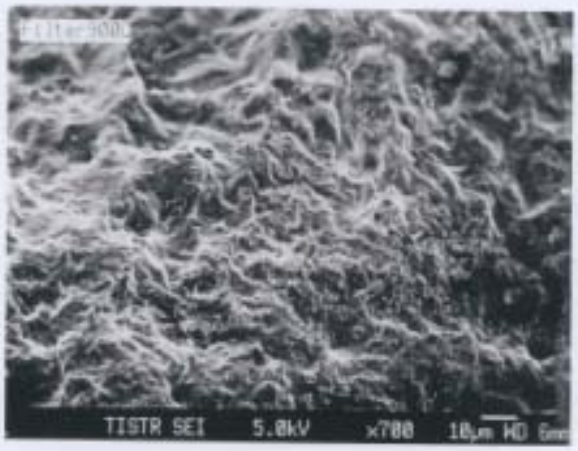


ภาพถ่าย FE-SEM ของตัวอย่างแผ่นกรองเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 700 °C (เคลือบ[illegible])

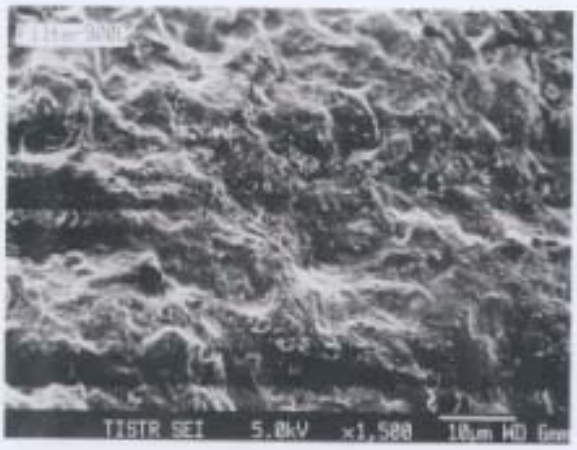
ก) 500 เท่า

ข) 1500 เท่า

ก)



ข)

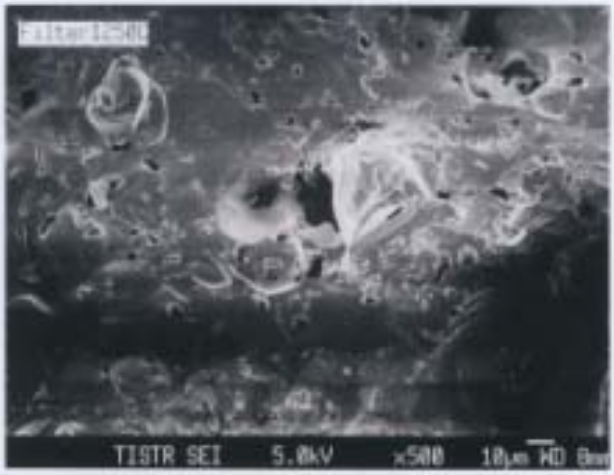


ภาพถ่าย FE-SEM ของตัวอย่างแผ่นกรองเซรามิกผาที่อุณหภูมิ 900 °C (เคลือบแวชิน) ที่กำลังขยาย

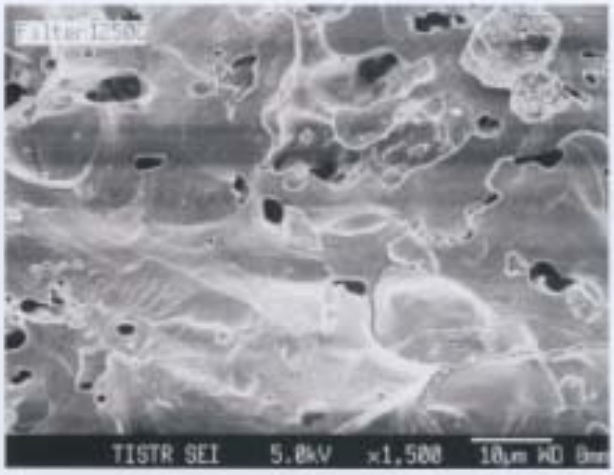
ก) 700 เท่า

ข) 1500 เท่า

ก)



ข)



ภาพถ่าย FE-SEM ของตัวอย่างแผ่นกรองเซรามิกผาที่อุณหภูมิ 1250 °C (เคลือบเรซิน) ที่กำลังขยาย

ก) 500 เท่า

ข) 1500 เท่า

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury	13.5335 [g/cc]	Empty Cell Weight	33.7506 [g]
Cell+Hg Weight	84.6886 [g]	Cell+Hg+Sample Weight	80.7802 [g]
Temperature	25.00 [°C]		

High Pressure

Data File Name	S553002H.PRM
Analysis Date	05/30/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1456 [mV/cc]
Auto-Oil Fill Time	5 [sec]
Run Mode	Fixed Speed
Motor Speed	20

Low Pressure

Data File Name	S5530041.PRM
Analysis Date	05/30/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1636 [mV/cc]
Evacuation Rate	5
Fine Evac. Until	1.0000 [min.]
Coarse Evac. Until	5.0000 [min.]

277 Points Acquired 161 Pts in Intrusion Range 116 Pts in Extrusion Range

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002R_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	zomzri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

274 Points Used 159 Intrusion Pts Used 115 Extrusion Pts Used

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.602 PSIA to 32914.199 PSIA
Pore Diameter Range : 133.164352 µm to 0.006481 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/d(log D))	Median
Volume	2.279E-01 cc/g at a diameter of 9.976E-02 µm	1.375E+03 cc/(µm-g) at a diameter of 1.253E-01 µm	1.554E-01 cc/g at a diameter of 3.539E-01 µm
Surface Area	1.988E+00 m²/g at a diameter of 9.976E-02 µm	8.063E-02 m²/(µm-g) at a diameter of 6.563E-03 µm	6.231E+00 m²/g at a diameter of 3.017E-02 µm
Pore Number Fraction	3.674E-03 at a diameter of 6.481E-03 µm	5.814E-02 at a diameter of 6.481E-03 µm	5.081E-01 at a diameter of 1.279E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.3108 cc/g	Bulk (Particle) Density	[illegible] g/cc
Total Surface Area	12.4616 m²/g	Apparent Density	[illegible] g/cc

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Porosity Summary

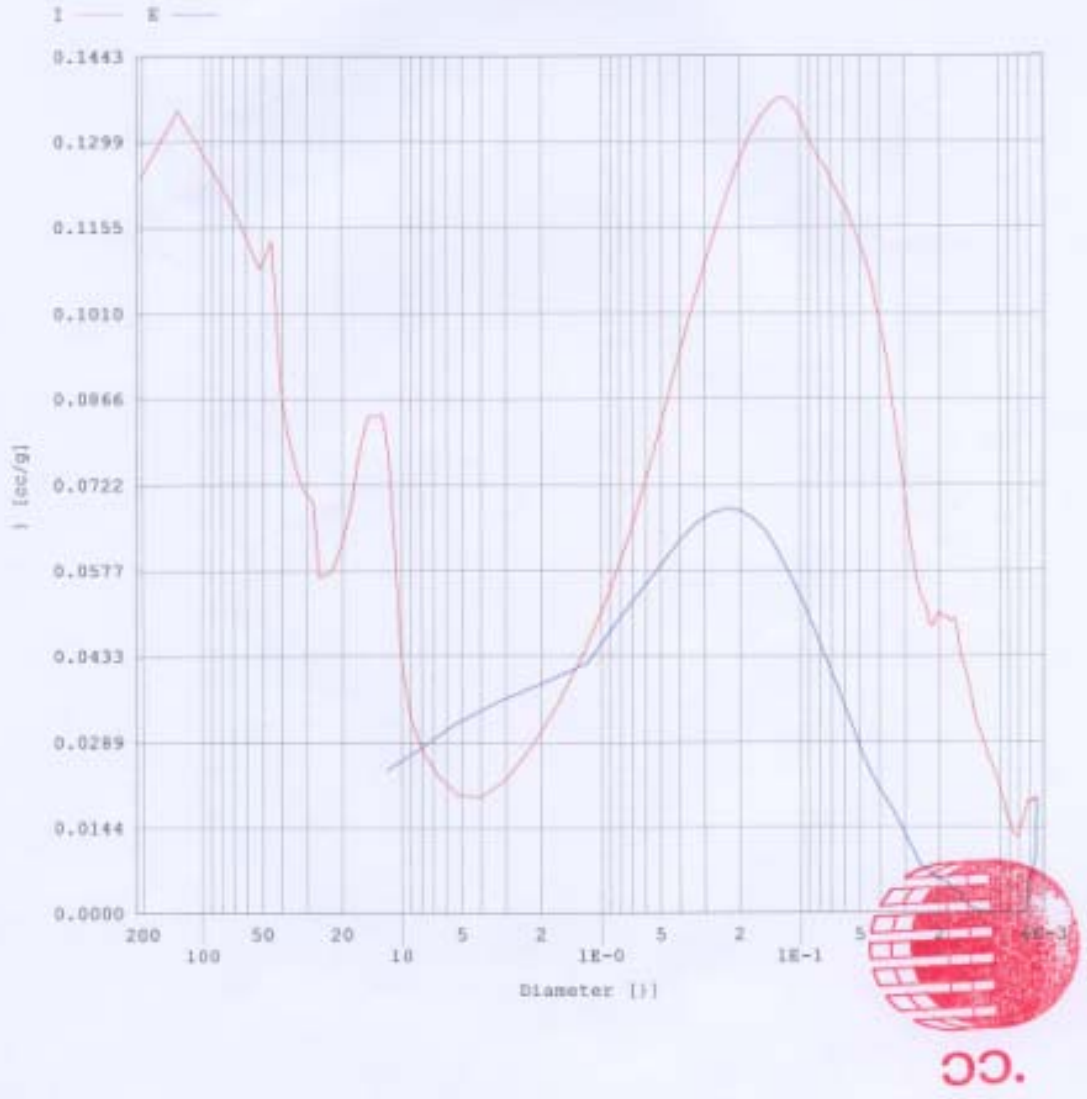
Sample (bulk) volume =	0.3295	[cc]
Interparticle filling pressure limit =	50.0000	[PSIA]
Interparticle filling poresize limit =	4266.4438	[nm]
Intruded volume (interparticle) =	0.0928	[cc]
Total interparticle porosity =	28.1600	[%]
Intruded volume (intraparticle) =	0.1145	[cc]
Total intraparticle porosity =	34.7548	[%]
Total intruded volume =	0.2073	[cc]
Total porosity =	62.9148	[%]
He density =	2.0000	[g/cc]
Theoretical porosity =	16.4950	[%]

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	JO/5/49		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somari	Mercury volume normalized by sample weight.	

-dV/dlogD vs. Pore Size



Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	YISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
1.602	1.332E+02	0.0000	0.0000	17.50	2.399E-04	1.352E-01
2.217	9.621E+01	0.0202	0.0202	22.85	4.527E-04	1.272E-01
2.848	7.491E+01	0.0310	0.0108	25.72	7.250E-04	1.205E-01
3.488	6.117E+01	0.0381	0.0072	27.61	1.040E-03	1.142E-01
4.135	5.159E+01	0.0433	0.0052	28.99	1.389E-03	1.085E-01
4.743	4.498E+01	0.0554	0.0122	32.22	1.910E-03	1.132E-01
5.331	4.002E+01	0.0590	0.0036	33.17	1.229E-03	8.637E-02
5.925	3.600E+01	0.0621	0.0031	33.99	1.129E-03	7.820E-02
6.493	3.286E+01	0.0644	0.0023	34.59	1.128E-03	7.312E-02
7.065	3.020E+01	0.0663	0.0019	35.10	1.174E-03	7.066E-02
7.640	2.792E+01	0.0680	0.0018	35.56	1.254E-03	6.946E-02
8.189	2.605E+01	0.0697	0.0016	35.99	9.876E-04	5.664E-02
8.709	2.449E+01	0.0711	0.0014	36.37	1.028E-03	5.697E-02
9.232	2.311E+01	0.0722	0.0011	36.66	1.072E-03	5.741E-02
9.758	2.186E+01	0.0735	0.0013	37.01	1.142E-03	5.855E-02
10.288	2.074E+01	0.0748	0.0013	37.35	1.238E-03	6.074E-02
10.850	1.966E+01	0.0763	0.0015	37.74	1.352E-03	6.328E-02
11.447	1.864E+01	0.0780	0.0017	38.20	1.491E-03	6.648E-02
12.046	1.771E+01	0.0796	0.0016	38.63	1.651E-03	6.994E-02
12.680	1.682E+01	0.0811	0.0016	39.04	1.873E-03	7.515E-02
13.315	1.602E+01	0.0827	0.0016	39.47	2.072E-03	7.880E-02
13.955	1.529E+01	0.0844	0.0016	39.90	2.267E-03	8.188E-02
14.628	1.458E+01	0.0862	0.0018	40.38	2.443E-03	8.377E-02
15.335	1.391E+01	0.0881	0.0019	40.87	2.574E-03	8.379E-02
16.044	1.330E+01	0.0900	0.0020	41.40	2.712E-03	8.364E-02
16.755	1.273E+01	0.0918	0.0018	41.87	2.871E-03	8.415E-02
17.467	1.221E+01	0.0934	0.0016	42.31	2.948E-03	8.205E-02
18.181	1.173E+01	0.0949	0.0015	42.69	2.941E-03	7.762E-02
18.862	1.131E+01	0.0961	0.0012	43.01	2.813E-03	7.058E-02
19.510	1.093E+01	0.0971	0.0010	43.28	2.628E-03	6.313E-02
20.121	1.060E+01	0.0981	0.0010	43.55	2.354E-03	5.461E-02
20.816	1.025E+01	0.0989	0.0008	43.76	2.081E-03	4.668E-02
21.845	9.765E+00	0.0996	0.0006	43.93	1.827E-03	3.914E-02
23.807	8.961E+00	0.1000	0.0004	44.05	1.655E-03	3.250E-02
27.250	7.828E+00	0.1005	0.0005	44.19	1.607E-03	2.714E-02
32.524	6.559E+00	0.1011	0.0005	44.33	1.636E-03	2.317E-02
40.727	5.238E+00	0.1018	0.0007	44.51	1.576E-03	1.984E-02
52.957	4.028E+00	0.1027	0.0009	44.75	1.627E-03	1.962E-02
70.561	3.023E+00	0.1040	0.0014	45.11	1.972E-03	2.247E-02
96.265	2.216E+00	0.1061	0.0021	45.67	3.223E-03	2.830E-02
131.069	1.628E+00	0.1097	0.0036	46.62	5.626E-03	3.659E-02
176.974	1.205E+00	0.1147	0.0050	47.96	1.013E-02	4.483E-02
235.003	9.077E-01	0.1210	0.0062	49.62	1.797E-02	5.423E-02
306.404	6.962E-01	0.1281	0.0072	51.52	3.097E-02	6.668E-02
391.328	5.451E-01	0.1362	0.0080	53.65	5.087E-02	8.104E-02

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somari	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
489.873	4.355E-01	0.1449	0.0087	55.96	7.944E-02	9.010E-02
602.738	3.539E-01	0.1541	0.0092	58.40	1.156E-01	1.012E-01
728.776	2.927E-01	0.1636	0.0096	60.94	1.590E-01	1.106E-01
867.488	2.459E-01	0.1736	0.0100	63.58	2.094E-01	1.184E-01
1017.625	2.096E-01	0.1836	0.0100	66.23	2.666E-01	1.252E-01
1177.264	1.812E-01	0.1933	0.0098	68.83	3.275E-01	1.302E-01
1345.344	1.586E-01	0.2020	0.0086	71.11	3.904E-01	1.339E-01
1520.530	1.403E-01	0.2095	0.0075	73.12	4.530E-01	1.362E-01
1702.152	1.253E-01	0.2162	0.0067	74.90	5.132E-01	1.375E-01
1888.664	1.129E-01	0.2224	0.0062	76.54	5.651E-01	1.367E-01
2079.317	1.026E-01	0.2279	0.0055	77.99	6.081E-01	1.347E-01
2273.364	9.384E-02	0.2329	0.0050	79.32	6.411E-01	1.315E-01
2470.055	8.636E-02	0.2375	0.0046	80.54	6.756E-01	1.289E-01
2669.541	7.991E-02	0.2419	0.0044	81.70	7.130E-01	1.270E-01
2871.321	7.429E-02	0.2458	0.0039	82.74	7.525E-01	1.254E-01
3075.746	6.936E-02	0.2494	0.0036	83.70	7.876E-01	1.231E-01
3282.466	6.499E-02	0.2528	0.0034	84.60	8.256E-01	1.213E-01
3489.236	6.114E-02	0.2560	0.0032	85.45	8.635E-01	1.196E-01
3698.001	5.769E-02	0.2590	0.0030	86.25	9.016E-01	1.182E-01
3907.965	5.459E-02	0.2619	0.0029	87.01	9.310E-01	1.158E-01
4119.824	5.178E-02	0.2644	0.0026	87.69	9.650E-01	1.140E-01
4333.380	4.923E-02	0.2669	0.0024	88.34	9.961E-01	1.119E-01
4549.680	4.689E-02	0.2692	0.0023	88.96	1.028E+00	1.101E-01
4767.577	4.474E-02	0.2715	0.0023	89.57	1.054E+00	1.077E-01
4987.370	4.277E-02	0.2735	0.0020	90.10	1.072E+00	1.048E-01
5209.508	4.095E-02	0.2755	0.0020	90.62	1.083E+00	1.013E-01
5433.961	3.926E-02	0.2773	0.0018	91.11	1.100E+00	9.848E-02
5659.921	3.769E-02	0.2790	0.0017	91.57	1.111E+00	9.545E-02
5890.342	3.622E-02	0.2807	0.0016	92.00	1.113E+00	9.184E-02
6122.261	3.484E-02	0.2821	0.0015	92.40	1.099E+00	8.711E-02
6356.374	3.356E-02	0.2835	0.0013	92.75	1.091E+00	8.308E-02
6592.283	3.236E-02	0.2847	0.0013	93.09	1.079E+00	7.928E-02
6830.488	3.123E-02	0.2859	0.0012	93.41	1.068E+00	7.575E-02
7070.040	3.017E-02	0.2870	0.0011	93.69	1.042E+00	7.146E-02
7312.036	2.917E-02	0.2879	0.0009	93.92	1.013E+00	6.721E-02
7556.279	2.823E-02	0.2887	0.0008	94.14	9.867E-01	6.334E-02
7802.267	2.734E-02	0.2896	0.0009	94.37	9.721E-01	6.051E-02
8049.753	2.650E-02	0.2904	0.0008	94.59	9.569E-01	5.794E-02
8299.634	2.570E-02	0.2911	0.0007	94.77	9.382E-01	5.530E-02
8550.860	2.495E-02	0.2917	0.0006	94.93	9.277E-01	5.322E-02
8804.583	2.423E-02	0.2923	0.0006	95.09	9.406E-01	5.381E-02
9060.102	2.355E-02	0.2929	0.0006	95.25	9.541E-01	5.448E-02
9317.467	2.289E-02	0.2935	0.0006	95.42	9.459E-01	5.398E-02
9576.329	2.228E-02	0.2941	0.0006	95.58	9.389E-01	5.353E-02
9837.087	2.169E-02	0.2947	0.0006	95.73	9.622E-01	5.492E-02

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002H_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somasri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
10100.140	2.112E-02	0.2953	0.0006	95.68	1.004E+00	4.919E-02
10365.088	2.058E-02	0.2959	0.0006	96.04	1.053E+00	5.035E-02
10631.834	2.006E-02	0.2963	0.0005	96.16	1.086E+00	5.066E-02
10900.475	1.957E-02	0.2968	0.0005	96.28	1.099E+00	4.998E-02
11170.662	1.910E-02	0.2973	0.0005	96.43	1.126E+00	4.990E-02
11443.095	1.864E-02	0.2979	0.0006	96.59	1.155E+00	4.995E-02
11717.226	1.821E-02	0.2985	0.0006	96.74	1.174E+00	4.959E-02
11993.400	1.779E-02	0.2991	0.0005	96.89	1.189E+00	4.910E-02
12278.309	1.737E-02	0.2995	0.0005	97.01	1.230E+00	4.948E-02
12565.412	1.698E-02	0.3000	0.0005	97.14	1.267E+00	4.968E-02
12854.412	1.660E-02	0.3005	0.0005	97.27	1.280E+00	4.899E-02
13151.294	1.622E-02	0.3010	0.0005	97.39	1.253E+00	4.682E-02
13456.709	1.585E-02	0.3014	0.0005	97.51	1.216E+00	4.441E-02
13771.054	1.549E-02	0.3019	0.0005	97.64	1.197E+00	4.270E-02
14087.646	1.514E-02	0.3023	0.0004	97.75	1.202E+00	4.185E-02
14406.434	1.481E-02	0.3027	0.0004	97.87	1.198E+00	4.073E-02
14727.267	1.448E-02	0.3031	0.0003	97.95	1.184E+00	3.938E-02
15049.946	1.417E-02	0.3034	0.0003	98.03	1.165E+00	3.794E-02
15374.622	1.387E-02	0.3037	0.0003	98.11	1.147E+00	3.660E-02
15694.407	1.359E-02	0.3040	0.0003	98.20	1.123E+00	3.514E-02
16023.074	1.331E-02	0.3043	0.0003	98.28	1.095E+00	3.361E-02
16354.282	1.304E-02	0.3046	0.0003	98.36	1.064E+00	3.200E-02
16681.252	1.279E-02	0.3049	0.0003	98.44	1.063E+00	3.130E-02
17003.383	1.255E-02	0.3052	0.0003	98.51	1.067E+00	3.078E-02
17320.674	1.232E-02	0.3054	0.0002	98.57	1.061E+00	3.004E-02
17640.158	1.209E-02	0.3056	0.0002	98.63	1.050E+00	2.921E-02
17961.789	1.188E-02	0.3058	0.0002	98.68	1.032E+00	2.824E-02
18284.967	1.167E-02	0.3060	0.0002	98.74	1.020E+00	2.745E-02
18610.092	1.146E-02	0.3062	0.0002	98.79	1.004E+00	2.655E-02
18937.561	1.126E-02	0.3064	0.0002	98.84	9.914E-01	2.577E-02
19266.727	1.107E-02	0.3066	0.0002	98.90	9.931E-01	2.541E-02
19591.352	1.089E-02	0.3068	0.0002	98.94	9.939E-01	2.501E-02
19917.223	1.071E-02	0.3070	0.0002	98.99	9.837E-01	2.430E-02
20244.990	1.054E-02	0.3071	0.0002	99.03	9.714E-01	2.358E-02
20574.904	1.037E-02	0.3073	0.0002	99.08	9.678E-01	2.312E-02
20906.516	1.020E-02	0.3075	0.0002	99.12	9.522E-01	2.237E-02
21239.523	1.004E-02	0.3076	0.0002	99.17	9.233E-01	2.134E-02
21574.428	9.888E-03	0.3078	0.0001	99.20	9.013E-01	2.049E-02
21911.625	9.736E-03	0.3079	0.0001	99.23	8.769E-01	1.962E-02
22250.072	9.587E-03	0.3080	0.0001	99.27	8.628E-01	1.901E-02
22590.164	9.443E-03	0.3081	0.0001	99.30	8.472E-01	1.838E-02
22931.805	9.302E-03	0.3082	0.0001	99.33	8.038E-01	1.738E-02
23274.842	9.165E-03	0.3083	0.0001	99.35	7.708E-01	1.667E-02
23619.824	9.031E-03	0.3084	0.0001	99.38	7.632E-01	1.650E-02
23966.352	8.901E-03	0.3085	0.0001	99.41	7.546E-01	1.631E-02

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 700C	**File Name**	S553002N_Merged
Sample Weight	0.5503 grams	**Bulk Sample Volume**	0.3295 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
24313.830	8.774E-03	0.3086	0.0001	99.43	7.160E-01	1.446E-02
24663.002	8.649E-03	0.3087	0.0001	99.45	6.898E-01	1.373E-02
25013.125	8.528E-03	0.3088	0.0001	99.47	6.769E-01	1.327E-02
25364.145	8.410E-03	0.3089	0.0001	99.50	6.781E-01	1.313E-02
25717.312	8.295E-03	0.3090	0.0001	99.52	6.790E-01	1.299E-02
26071.727	8.182E-03	0.3090	0.0001	99.53	6.797E-01	1.286E-02
26426.787	8.072E-03	0.3091	0.0001	99.55	6.799E-01	1.272E-02
26783.195	7.965E-03	0.3091	0.0001	99.56	7.306E-01	1.354E-02
27139.855	7.860E-03	0.3092	0.0001	99.59	7.835E-01	1.437E-02
27496.611	7.758E-03	0.3093	0.0001	99.61	8.389E-01	1.522E-02
27853.469	7.659E-03	0.3094	0.0001	99.63	8.792E-01	1.575E-02
28211.029	7.562E-03	0.3095	0.0001	99.65	9.213E-01	1.625E-02
28568.779	7.467E-03	0.3096	0.0001	99.68	9.650E-01	1.676E-02
28926.539	7.375E-03	0.3097	0.0001	99.71	1.049E+00	1.797E-02
29283.549	7.285E-03	0.3098	0.0001	99.75	1.094E+00	1.849E-02
29638.211	7.198E-03	0.3099	0.0001	99.77	1.130E+00	1.884E-02
29992.221	7.113E-03	0.3100	0.0001	99.79	1.154E+00	1.897E-02
30344.486	7.030E-03	0.3101	0.0001	99.81	1.169E+00	1.859E-02
30701.695	6.948E-03	0.3102	0.0001	99.85	1.169E+00	1.874E-02
31063.992	6.867E-03	0.3103	0.0001	99.87	1.205E+00	1.916E-02
31419.959	6.789E-03	0.3104	0.0001	99.90	1.202E+00	1.882E-02
31775.080	6.714E-03	0.3105	0.0001	99.92	1.220E+00	1.878E-02
32131.854	6.639E-03	0.3105	0.0001	99.93	1.268E+00	1.933E-02
32502.006	6.563E-03	0.3106	0.0001	99.96	1.323E+00	1.990E-02
32914.199	6.481E-03	0.3108	0.0001	100.00	1.300E+00	1.921E-02

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury	13.5335 [g/cc]	Empty Cell Weight	33.7495 [g]
Cell+Hg Weight	84.1999 [g]	Cell+Hg+Sample Weight	80.8265 [g]
Temperature	25.00 [°C]		

High Pressure

Data File Name	S553003H.PRM
Analysis Date	05/30/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1456 [mV/cc]
Auto-Oil Fill Time	5 [sec]
Run Mode	Fixed Speed
Motor Speed	20

Low Pressure

Data File Name	S5530061.PRM
Analysis Date	05/30/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1636 [mV/cc]
Evacuation Rate	5
Fine Evac. Until	1.0000 [min.]
Coarse Evac. Until	5.0000 [min.]

274 Points Acquired 158 Pts in Intrusion Range 116 Pts in Extrusion Range

cc.

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

272 Points Used 157 Intrusion Pts Used 115 Extrusion Pts Used

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.000 PSIA to 32711.115 PSIA
Pore Diameter Range : 213.232651 µm to 0.006521 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/d(log D))	Median
Volume	2.946E-01 cc/g at a diameter of 1.619E-01 µm	1.521E+03 cc/(µm-g) at a diameter of 1.443E-01 µm	1.979E-01 cc/g at a diameter of 9.588E-01 µm
Surface Area	1.304E+00 m²/g at a diameter of 1.619E-01 µm	5.050E-02 m²/(µm-g) at a diameter of 6.521E-03 µm	4.889E+00 m²/g at a diameter of 4.325E-02 µm
Pore Number Fraction	3.678E-03 at a diameter of 6.521E-03 µm	3.651E-02 at a diameter of 6.521E-03 µm	5.068E-01 at a diameter of 1.512E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.3957 cc/g	Bulk (Particle) Density	[illegible] g/cc
Total Surface Area	9.7771 m²/g	Apparent Density	[illegible] g/cc

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Porosity Summary

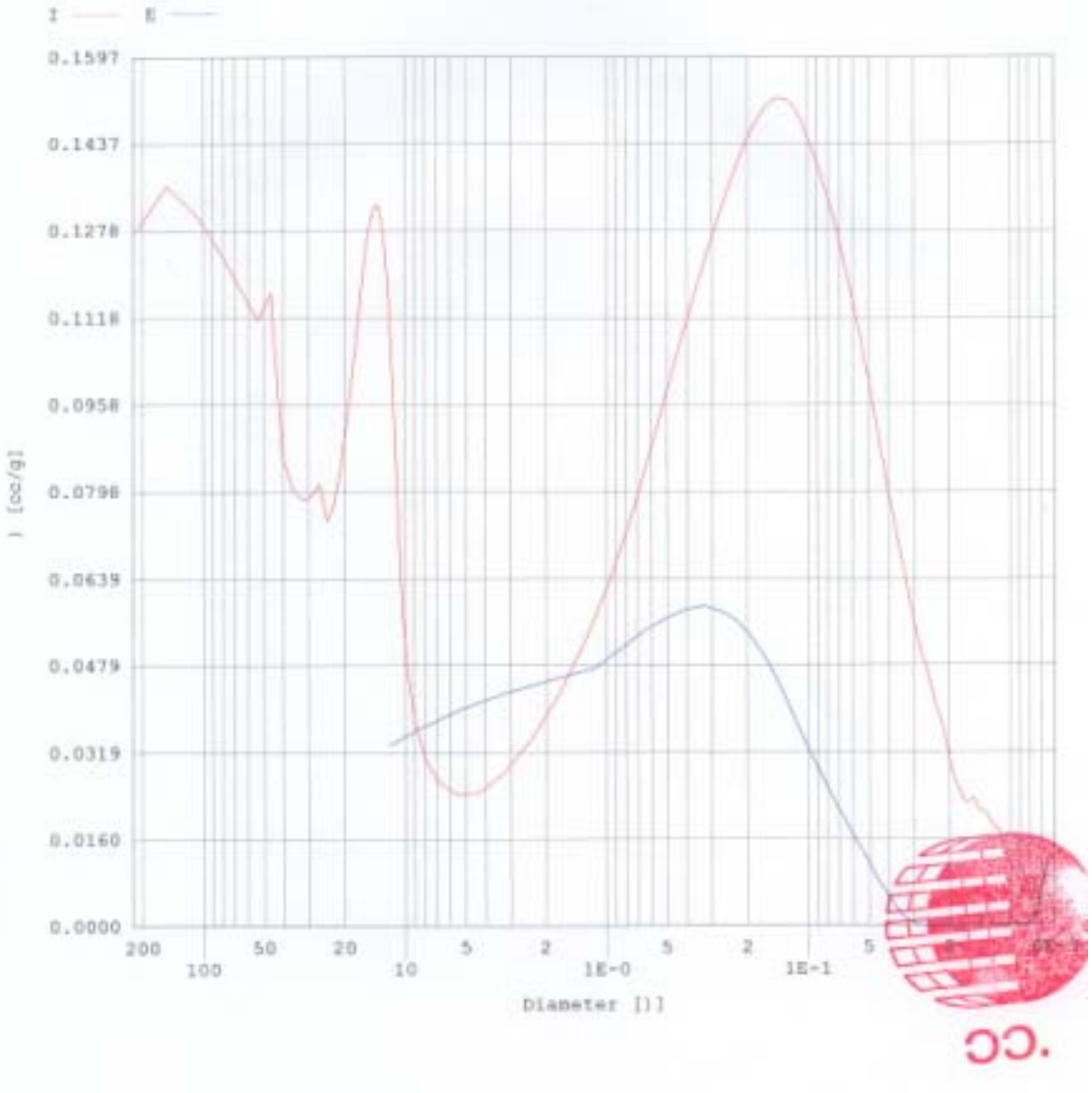
Sample (bulk) volume =	0.2891	[cc]
Interparticle filling pressure limit =	50.0000	[PSIA]
Interparticle filling poresize limit =	4266.4438	[nm]
Intruded volume (interparticle) =	0.0962	[cc]
Total interparticle porosity =	33.2802	[%]
Intruded volume (intraparticle) =	0.1169	[cc]
Total intraparticle porosity =	40.4439	[%]
Total intruded volume =	0.2131	[cc]
Total porosity =	73.7241	[%]
He density =	2.0000	[g/cc]
Theoretical porosity =	6.8504	[%]

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

-dV/dlogD vs. Pore Size



Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
1.000	2.132E+02	0.0000	0.0000	0.00	1.673E-04	1.278E-01
1.403	1.520E+02	0.0571	0.0571	14.43	2.250E-04	1.358E-01
2.006	1.063E+02	0.0778	0.0207	19.65	4.097E-04	1.302E-01
2.646	8.062E+01	0.0893	0.0116	22.57	6.925E-04	1.231E-01
3.303	6.458E+01	0.0968	0.0075	24.47	1.036E-03	1.168E-01
3.974	5.369E+01	0.1026	0.0057	25.92	1.429E-03	1.113E-01
4.612	4.625E+01	0.1145	0.0119	28.92	2.014E-03	1.163E-01
5.290	4.033E+01	0.1198	0.0054	30.29	1.230E-03	8.614E-02
5.973	3.571E+01	0.1234	0.0035	31.17	1.170E-03	8.004E-02
6.661	3.202E+01	0.1262	0.0028	31.89	1.224E-03	7.841E-02
7.355	2.900E+01	0.1286	0.0025	32.51	1.341E-03	7.912E-02
8.054	2.649E+01	0.1308	0.0022	33.05	1.498E-03	8.132E-02
8.756	2.436E+01	0.1328	0.0020	33.57	1.342E-03	7.459E-02
9.463	2.254E+01	0.1351	0.0022	34.13	1.440E-03	7.723E-02
10.172	2.097E+01	0.1375	0.0025	34.75	1.645E-03	8.364E-02
10.885	1.960E+01	0.1401	0.0025	35.39	1.916E-03	9.173E-02
11.601	1.839E+01	0.1427	0.0026	36.06	2.239E-03	1.004E-01
12.321	1.731E+01	0.1456	0.0029	36.78	2.612E-03	1.094E-01
13.009	1.640E+01	0.1484	0.0028	37.50	3.016E-03	1.181E-01
13.667	1.561E+01	0.1513	0.0029	38.24	3.381E-03	1.247E-01
14.294	1.492E+01	0.1542	0.0029	38.97	3.702E-03	1.294E-01
14.922	1.430E+01	0.1571	0.0028	39.69	3.974E-03	1.320E-01
15.552	1.372E+01	0.1598	0.0028	40.39	4.192E-03	1.325E-01
16.183	1.318E+01	0.1625	0.0026	41.06	4.319E-03	1.299E-01
16.815	1.269E+01	0.1648	0.0023	41.64	4.379E-03	1.256E-01
17.447	1.223E+01	0.1669	0.0021	42.16	4.307E-03	1.181E-01
18.078	1.180E+01	0.1686	0.0018	42.61	4.091E-03	1.073E-01
18.709	1.140E+01	0.1701	0.0015	42.99	3.791E-03	9.531E-02
19.338	1.103E+01	0.1713	0.0012	43.28	3.419E-03	8.265E-02
19.999	1.067E+01	0.1723	0.0011	43.55	2.992E-03	6.976E-02
20.650	1.033E+01	0.1731	0.0008	43.74	2.575E-03	5.806E-02
21.817	9.778E+00	0.1738	0.0007	43.92	2.195E-03	4.716E-02
23.665	9.014E+00	0.1745	0.0007	44.11	1.923E-03	3.797E-02
26.744	7.977E+00	0.1753	0.0008	44.30	1.754E-03	3.079E-02
31.352	6.804E+00	0.1761	0.0008	44.49	1.710E-03	2.646E-02
38.888	5.486E+00	0.1769	0.0009	44.71	1.733E-03	2.412E-02
50.050	4.262E+00	0.1781	0.0012	45.00	1.909E-03	2.451E-02
66.836	3.192E+00	0.1798	0.0017	45.43	2.595E-03	2.842E-02
90.789	2.350E+00	0.1826	0.0028	46.14	3.962E-03	3.439E-02
123.710	1.724E+00	0.1871	0.0045	47.29	6.663E-03	4.248E-02
166.994	1.277E+00	0.1932	0.0061	48.83	1.164E-02	5.229E-02
222.479	9.586E-01	0.2006	0.0073	50.68	2.052E-02	[illegible]
290.537	7.342E-01	0.2090	0.0084	52.81	3.511E-02	[illegible]
372.018	5.734E-01	0.2183	0.0093	55.16	5.755E-02	[illegible]
467.320	4.565E-01	0.2285	0.0102	57.74	8.877E-02	[illegible]

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
577.042	3.697E-01	0.2394	0.0109	60.49	1.281E-01	1.157E-01
699.936	3.048E-01	0.2508	0.0114	63.38	1.756E-01	1.257E-01
835.504	2.553E-01	0.2624	0.0116	66.31	2.314E-01	1.343E-01
982.498	2.171E-01	0.2741	0.0117	69.27	2.940E-01	1.413E-01
1139.472	1.872E-01	0.2850	0.0109	72.02	3.617E-01	1.469E-01
1305.078	1.635E-01	0.2946	0.0096	74.45	4.301E-01	1.504E-01
1478.717	1.443E-01	0.3031	0.0085	76.60	4.971E-01	1.521E-01
1658.593	1.286E-01	0.3108	0.0076	78.53	5.582E-01	1.519E-01
1843.658	1.157E-01	0.3177	0.0069	80.27	6.114E-01	1.502E-01
2033.064	1.049E-01	0.3240	0.0063	81.86	6.520E-01	1.467E-01
2226.412	9.581E-02	0.3295	0.0056	83.27	6.863E-01	1.426E-01
2421.955	8.808E-02	0.3346	0.0050	84.54	7.203E-01	1.389E-01
2620.392	8.141E-02	0.3392	0.0046	85.70	7.520E-01	1.348E-01
2821.275	7.561E-02	0.3434	0.0043	86.78	7.824E-01	1.309E-01
3024.752	7.053E-02	0.3473	0.0038	87.75	8.080E-01	1.265E-01
3230.923	6.603E-02	0.3508	0.0036	88.65	8.285E-01	1.218E-01
3437.094	6.206E-02	0.3541	0.0033	89.48	8.488E-01	1.175E-01
3644.762	5.853E-02	0.3569	0.0028	90.20	8.646E-01	1.131E-01
3854.177	5.535E-02	0.3596	0.0027	90.87	8.762E-01	1.085E-01
4065.537	5.247E-02	0.3620	0.0024	91.47	8.837E-01	1.040E-01
4278.994	4.985E-02	0.3641	0.0021	92.02	8.889E-01	9.961E-02
4494.396	4.746E-02	0.3661	0.0020	92.52	8.886E-01	9.502E-02
4712.242	4.527E-02	0.3680	0.0018	92.98	8.850E-01	9.054E-02
4932.186	4.325E-02	0.3696	0.0017	93.40	8.871E-01	8.687E-02
5155.022	4.138E-02	0.3712	0.0016	93.81	8.819E-01	8.283E-02
5379.355	3.966E-02	0.3727	0.0015	94.17	8.773E-01	7.900E-02
5605.385	3.806E-02	0.3740	0.0013	94.51	8.731E-01	7.547E-02
5835.506	3.656E-02	0.3753	0.0013	94.83	8.698E-01	7.230E-02
6067.823	3.516E-02	0.3765	0.0012	95.13	8.651E-01	6.921E-02
6302.036	3.385E-02	0.3776	0.0011	95.41	8.606E-01	6.631E-02
6538.345	3.263E-02	0.3785	0.0010	95.65	8.514E-01	6.328E-02
6776.948	3.148E-02	0.3794	0.0009	95.88	8.370E-01	5.996E-02
7017.199	3.040E-02	0.3803	0.0009	96.10	8.272E-01	5.723E-02
7259.296	2.939E-02	0.3811	0.0008	96.31	8.142E-01	5.449E-02
7503.189	2.843E-02	0.3819	0.0008	96.50	8.006E-01	5.195E-02
7748.479	2.753E-02	0.3826	0.0007	96.67	7.915E-01	4.984E-02
7996.164	2.668E-02	0.3831	0.0006	96.82	7.949E-01	4.863E-02
8245.994	2.587E-02	0.3837	0.0006	96.97	7.933E-01	4.710E-02
8497.371	2.510E-02	0.3843	0.0006	97.11	7.829E-01	4.515E-02
8750.795	2.438E-02	0.3848	0.0006	97.25	7.730E-01	4.332E-02
9005.914	2.369E-02	0.3854	0.0005	97.38	7.617E-01	4.149E-02
9263.329	2.303E-02	0.3859	0.0006	97.53	7.492E-01	[illegible]
9522.141	2.240E-02	0.3864	0.0005	97.65	7.538E-01	[illegible]
9782.749	2.181E-02	0.3869	0.0004	97.76	7.439E-01	[illegible]
10045.853	2.123E-02	0.3873	0.0004	97.86	7.336E-01	[illegible]

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S5530038_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er] [cc/g]
10310.900	2.069E-02	0.3876	0.0004	97.95	7.132E-01	3.363E-02
10577.846	2.017E-02	0.3880	0.0003	98.04	6.977E-01	3.154E-02
10847.035	1.967E-02	0.3883	0.0003	98.13	6.498E-01	2.911E-02
11117.723	1.919E-02	0.3886	0.0003	98.20	6.322E-01	2.773E-02
11390.854	1.873E-02	0.3889	0.0003	98.26	6.226E-01	2.674E-02
11665.233	1.829E-02	0.3891	0.0002	98.32	6.101E-01	2.567E-02
11948.395	1.785E-02	0.3893	0.0002	98.37	5.994E-01	2.467E-02
12233.104	1.744E-02	0.3895	0.0002	98.42	5.959E-01	2.399E-02
12526.193	1.703E-02	0.3898	0.0003	98.49	5.850E-01	2.309E-02
12827.517	1.663E-02	0.3900	0.0003	98.56	5.865E-01	2.266E-02
13137.572	1.624E-02	0.3903	0.0002	98.62	5.970E-01	2.256E-02
13456.510	1.585E-02	0.3905	0.0002	98.68	6.174E-01	2.278E-02
13777.543	1.548E-02	0.3907	0.0002	98.73	6.464E-01	2.326E-02
14106.707	1.512E-02	0.3909	0.0002	98.79	6.670E-01	2.338E-02
14445.054	1.477E-02	0.3912	0.0002	98.85	6.568E-01	2.243E-02
14785.444	1.443E-02	0.3914	0.0002	98.91	6.465E-01	2.153E-02
15135.267	1.409E-02	0.3917	0.0002	98.97	6.486E-01	2.108E-02
15480.949	1.378E-02	0.3919	0.0002	99.03	6.644E-01	2.111E-02
15828.078	1.348E-02	0.3921	0.0002	99.09	6.732E-01	2.090E-02
16171.213	1.319E-02	0.3923	0.0001	99.12	6.764E-01	2.053E-02
16510.408	1.292E-02	0.3924	0.0001	99.16	6.732E-01	1.997E-02
16845.211	1.266E-02	0.3926	0.0002	99.20	6.681E-01	1.946E-02
17174.775	1.242E-02	0.3927	0.0002	99.25	6.638E-01	1.901E-02
17506.486	1.219E-02	0.3929	0.0002	99.29	6.479E-01	1.826E-02
17833.807	1.196E-02	0.3931	0.0001	99.32	6.448E-01	1.785E-02
18155.836	1.175E-02	0.3932	0.0001	99.35	6.632E-01	1.800E-02
18480.061	1.154E-02	0.3933	0.0001	99.39	6.716E-01	1.787E-02
18799.248	1.135E-02	0.3935	0.0001	99.43	6.599E-01	1.722E-02
19120.031	1.116E-02	0.3936	0.0001	99.46	6.257E-01	1.603E-02
19443.656	1.097E-02	0.3937	0.0001	99.49	5.983E-01	1.505E-02
19768.682	1.079E-02	0.3938	0.0001	99.52	5.872E-01	1.452E-02
20095.352	1.062E-02	0.3939	0.0001	99.55	5.836E-01	1.419E-02
20423.021	1.045E-02	0.3940	0.0001	99.57	5.470E-01	1.305E-02
20752.836	1.028E-02	0.3941	0.0001	99.58	5.166E-01	1.215E-02
21084.994	1.012E-02	0.3941	0.0001	99.60	4.957E-01	1.148E-02
21418.451	9.960E-03	0.3942	0.0001	99.62	4.846E-01	1.110E-02
21754.303	9.806E-03	0.3943	0.0001	99.64	4.724E-01	1.071E-02
22091.652	9.656E-03	0.3943	0.0000	99.65	4.717E-01	1.058E-02
22430.648	9.510E-03	0.3944	0.0001	99.66	4.711E-01	1.041E-02
22771.338	9.368E-03	0.3945	0.0001	99.68	4.834E-01	1.051E-02
23113.227	9.229E-03	0.3945	0.0001	99.70	4.962E-01	1.061E-02
23456.562	9.094E-03	0.3946	0.0001	99.72	4.816E-01	1.013E-02
23801.496	8.963E-03	0.3947	0.0001	99.74	4.657E-01	[illegible]
24148.125	8.834E-03	0.3948	0.0001	99.76	4.781E-01	[illegible]
24496.350	8.708E-03	0.3948	0.0001	99.77	4.757E-01	[illegible]

Report date: 05/30/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 900C	**File Name**	S553003H_Merged
Sample Weight	0.5386 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2891 cc
Sample Description	30/5/40		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
24844.625	8.586E-03	0.3949	0.0001	99.79	4.727E-01	9.292E-03
25193.500	8.467E-03	0.3949	0.0000	99.80	4.378E-01	8.470E-03
25545.568	8.351E-03	0.3950	0.0000	99.81	4.007E-01	7.637E-03
25898.533	8.237E-03	0.3950	0.0000	99.82	3.613E-01	6.797E-03
26252.898	8.126E-03	0.3951	0.0000	99.83	3.367E-01	6.244E-03
26608.307	8.017E-03	0.3951	0.0000	99.84	3.107E-01	5.687E-03
26964.467	7.911E-03	0.3951	0.0000	99.84	2.828E-01	5.121E-03
27321.873	7.808E-03	0.3951	0.0000	99.85	2.716E-01	4.854E-03
27679.930	7.707E-03	0.3952	0.0000	99.86	2.783E-01	4.940E-03
28039.082	7.608E-03	0.3952	0.0000	99.86	2.854E-01	5.031E-03
28398.387	7.512E-03	0.3952	0.0000	99.87	2.730E-01	4.760E-03
28758.088	7.418E-03	0.3952	0.0000	99.87	2.599E-01	4.488E-03
29118.689	7.326E-03	0.3952	0.0000	99.88	2.864E-01	4.894E-03
29476.395	7.237E-03	0.3953	0.0000	99.89	3.004E-01	5.064E-03
29833.201	7.150E-03	0.3953	0.0000	99.90	3.316E-01	5.530E-03
30188.863	7.066E-03	0.3953	0.0000	99.90	4.014E-01	6.648E-03
30542.779	6.984E-03	0.3954	0.0000	99.91	4.216E-01	6.877E-03
30902.080	6.903E-03	0.3954	0.0000	99.92	5.625E-01	9.141E-03
31258.352	6.824E-03	0.3954	0.0000	99.92	6.074E-01	9.674E-03
31611.030	6.748E-03	0.3955	0.0000	99.94	6.314E-01	9.890E-03
31964.559	6.674E-03	0.3955	0.0001	99.95	6.583E-01	[illegible]
32319.963	6.600E-03	0.3956	0.0000	99.96	7.295E-01	[illegible]
32711.115	6.521E-03	0.3957	0.0001	100.00	8.233E-01	[illegible]

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S5531018_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury	13.5335 [g/cc]	Empty Cell Weight	33.7683 [g]
Cell+Hg Weight	84.7665 [g]	Cell+Hg+Sample Weight	81.5277 [g]
Temperature	25.00 [°C]		

High Pressure

Data File Name	S5531018.PRM
Analysis Date	05/31/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1456 [mV/cc]
Auto-Oil Fill Time	5 [sec]
Run Mode	Fixed Speed
Motor Speed	20

Low Pressure

Data File Name	S5531021.PRM
Analysis Date	05/31/2005
# of repeat cycles	0
Penetrometer Constant .	1636 [mV/cc]
Evacuation Rate	5
Fine Evac. Until	1.0000 [min.]
Coarse Evac. Until	5.0000 [min.]

266 Points Acquired 155 Pts in Intrusion Range 111 Pts in Extrusion Range

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S553101B_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Standard Report

262 Points Used 152 Intrusion Pts Used 110 Extrusion Pts Used

Intrusion Statistics

Pressure Range : 1.371 PSIA to 32400.281 PSIA
Pore Diameter Range : 155.560318 µm to 0.006584 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (dV/d(log D))	Median
Volume	6.616E-02 cc/g at a diameter of 9.230E-01 µm	7.256E+02 cc/(µm-g) at a diameter of 1.804E+01 µm	3.925E-02 cc/g at a diameter of 2.706E+01 µm
Surface Area	1.478E-02 m²/g at a diameter of 9.230E-01 µm	3.512E-04 m²/(µm-g) at a diameter of 5.740E-02 µm	1.701E-01 m²/g at a diameter of 1.140E-01 µm
Pore Number Fraction	9.898E-04 at a diameter of 7.415E-02 µm	2.376E-04 at a diameter of 7.415E-02 µm	5.352E-01 at a diameter of 6.917E-02 µm

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.0785 cc/g	Bulk (Particle) Density	2.[illegible] g/cc
Total Surface Area	0.3402 m²/g	Apparent Density	2.[illegible] g/cc

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1350C	**File Name**	S5531101H_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TIS?R		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Porosity Summary

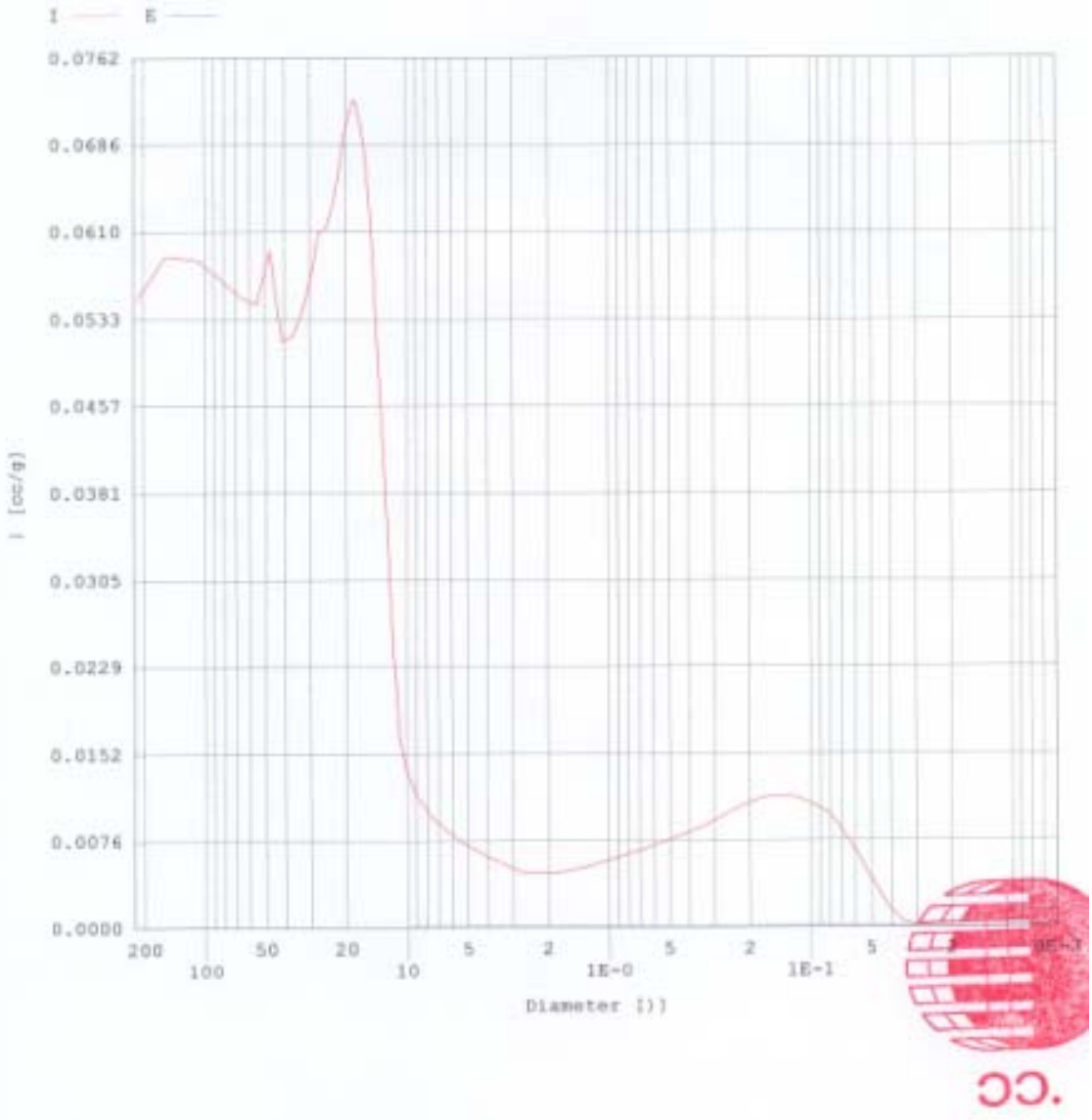
Sample (bulk) volume =	0.2902	[cc]
Interparticle filling pressure limit =	50.0000	[PSIA]
Interparticle filling poresize limit =	4266.4438	[nm]
Intruded volume (interparticle) =	0.0577	[cc]
Total interparticle porosity =	19.8856	[%]
Intruded volume (intraparticle) =	0.0104	[cc]
Total intraparticle porosity =	3.5752	[%]
Total intruded volume =	0.0681	[cc]
Total porosity =	23.4608	[%]

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S553101H_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

-dV/dlogD vs. Pore Size



Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S553101R_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er] [cc/g]
1.371	1.556E+02	0.0000	0.0000	20.58	9.218E-05	5.883E-02
1.956	1.091E+02	0.0094	0.0094	30.05	1.674E-04	5.850E-02
2.580	8.267E+01	0.0148	0.0054	35.54	2.858E-04	5.682E-02
3.223	6.619E+01	0.0187	0.0039	39.46	4.323E-04	5.525E-02
3.878	5.501E+01	0.0217	0.0031	42.55	6.052E-04	5.468E-02
4.502	4.738E+01	0.0270	0.0052	47.85	8.648E-04	5.930E-02
5.166	4.129E+01	0.0303	0.0034	51.25	6.411E-04	5.139E-02
5.838	3.654E+01	0.0326	0.0023	53.57	6.652E-04	5.185E-02
6.514	3.275E+01	0.0346	0.0020	55.55	7.468E-04	5.392E-02
7.195	2.965E+01	0.0367	0.0021	57.70	8.620E-04	5.698E-02
7.882	2.706E+01	0.0387	0.0020	59.73	1.008E-03	6.094E-02
8.573	2.488E+01	0.0409	0.0022	61.95	1.051E-03	6.131E-02
9.269	2.302E+01	0.0431	0.0022	64.20	1.160E-03	6.340E-02
9.935	2.147E+01	0.0452	0.0020	66.27	1.312E-03	6.638E-02
10.573	2.018E+01	0.0472	0.0020	68.29	1.479E-03	6.966E-02
11.214	1.902E+01	0.0492	0.0021	70.39	1.621E-03	7.152E-02
11.825	1.804E+01	0.0512	0.0020	72.37	1.753E-03	7.256E-02
12.439	1.715E+01	0.0529	0.0017	74.14	1.826E-03	7.115E-02
13.056	1.634E+01	0.0545	0.0016	75.75	1.872E-03	6.884E-02
13.661	1.564E+01	0.0560	0.0015	77.24	1.887E-03	6.564E-02
14.197	1.503E+01	0.0572	0.0012	78.46	1.860E-03	6.175E-02
14.754	1.446E+01	0.0583	0.0010	79.51	1.777E-03	5.664E-02
15.312	1.393E+01	0.0590	0.0007	80.24	1.666E-03	5.118E-02
15.872	1.344E+01	0.0596	0.0006	80.88	1.552E-03	4.600E-02
16.466	1.296E+01	0.0601	0.0005	81.40	1.436E-03	4.111E-02
17.093	1.248E+01	0.0606	0.0005	81.91	1.272E-03	3.506E-02
17.719	1.204E+01	0.0610	0.0004	82.31	1.099E-03	2.910E-02
18.379	1.161E+01	0.0614	0.0004	82.71	9.295E-04	2.374E-02
19.036	1.121E+01	0.0618	0.0003	83.06	8.133E-04	2.000E-02
19.646	1.086E+01	0.0621	0.0003	83.37	6.950E-04	1.661E-02
20.972	1.017E+01	0.0624	0.0003	83.67	6.162E-04	1.396E-02
23.811	8.959E+00	0.0626	0.0002	83.89	5.812E-04	1.146E-02
28.929	7.374E+00	0.0629	0.0003	84.17	6.227E-04	9.507E-03
38.023	5.610E+00	0.0633	0.0004	84.58	7.224E-04	7.679E-03
53.287	4.003E+00	0.0637	0.0004	85.03	8.916E-04	6.193E-03
77.916	2.738E+00	0.0643	0.0006	85.60	9.397E-04	4.856E-03
114.653	1.861E+00	0.0649	0.0006	86.21	1.154E-03	4.701E-03
164.397	1.293E+00	0.0655	0.0006	86.81	1.873E-03	5.301E-03
229.546	9.293E-01	0.0662	0.0007	87.50	2.942E-03	6.035E-03
310.047	6.880E-01	0.0669	0.0008	88.30	4.306E-03	6.774E-03
406.945	5.242E-01	0.0678	0.0009	89.20	6.274E-03	7.838E-03
520.160	4.101E-01	0.0688	0.0010	90.17	8.732E-03	8.534E-03
649.142	3.286E-01	0.0698	0.0010	91.19	1.205E-02	8.980E-03
793.591	2.688E-01	0.0708	0.0010	92.19	1.653E-02	9.036E-03
952.012	2.241E-01	0.0717	0.0009	93.11	2.175E-02	9.054E-03

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S553101H_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
1122.208	1.901E-01	0.0725	0.0008	93.94	2.748E-02	1.110E-02
1301.834	1.639E-01	0.0732	0.0007	94.67	3.311E-02	1.139E-02
1487.798	1.434E-01	0.0739	0.0007	95.36	3.834E-02	1.148E-02
1677.403	1.272E-01	0.0746	0.0007	96.04	4.287E-02	1.146E-02
1872.049	1.140E-01	0.0752	0.0006	96.65	4.669E-02	1.129E-02
2068.989	1.031E-01	0.0757	0.0005	97.19	4.987E-02	1.097E-02
2268.175	9.405E-02	0.0762	0.0004	97.62	5.306E-02	1.064E-02
2469.257	8.639E-02	0.0765	0.0004	98.00	5.591E-02	1.028E-02
2672.285	7.983E-02	0.0769	0.0004	98.35	5.778E-02	9.823E-03
2877.059	7.415E-02	0.0772	0.0003	98.66	5.763E-02	9.126E-03
3084.028	6.917E-02	0.0774	0.0002	98.90	5.636E-02	8.340E-03
3293.194	6.478E-02	0.0776	0.0002	99.13	5.447E-02	7.559E-03
3503.606	6.089E-02	0.0778	0.0002	99.32	5.262E-02	6.845E-03
3716.214	5.740E-02	0.0780	0.0002	99.50	5.040E-02	6.148E-03
3932.065	5.425E-02	0.0781	0.0001	99.63	4.620E-02	5.289E-03
4149.713	5.141E-02	0.0782	0.0001	99.73	4.175E-02	4.503E-03
4370.104	4.881E-02	0.0783	0.0001	99.81	3.797E-02	3.859E-03
4592.991	4.645E-02	0.0784	0.0001	99.87	3.346E-02	3.226E-03
4818.721	4.427E-02	0.0784	0.0000	99.92	2.893E-02	2.661E-03
5046.647	4.227E-02	0.0784	0.0000	99.96	2.321E-02	2.036E-03
5276.918	4.043E-02	0.0785	0.0000	99.95	1.869E-02	1.562E-03
5508.537	3.873E-02	0.0785	0.0000	99.97	1.494E-02	1.190E-03
5742.051	3.715E-02	0.0785	0.0000	99.98	1.138E-02	8.667E-04
5977.611	3.569E-02	0.0785	0.0000	100.00	8.149E-03	5.979E-04
6214.568	3.433E-02	0.0785	0.0000	100.00	5.458E-03	3.888E-04
6453.871	3.305E-02	0.0785	0.0000	100.00	4.694E-03	3.165E-04
6694.670	3.186E-02	0.0785	0.0000	100.00	3.779E-03	2.415E-04
6937.515	3.075E-02	0.0785	0.0000	100.00	2.696E-03	1.637E-04
7182.656	2.970E-02	0.0785	0.0000	100.00	1.440E-03	8.317E-05
7428.942	2.872E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
7677.227	2.779E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
7927.008	2.691E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
8179.184	2.608E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
8432.806	2.530E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
8688.425	2.455E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
8945.940	2.385E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
9205.199	2.317E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
9466.457	2.253E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
9729.509	2.193E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
9993.859	2.135E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
10260.505	2.079E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
10528.896	2.026E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
10799.185	1.975E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
11071.319	1.927E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
11345.748	1.880E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	S5531018_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalised by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
11621.875	1.836E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
11900.296	1.793E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
12180.462	1.751E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
12462.625	1.712E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
12746.585	1.674E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
13032.591	1.637E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
13320.491	1.601E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
13610.488	1.567E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
13908.868	1.534E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
14215.929	1.501E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
14531.572	1.468E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
14856.447	1.436E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
15183.368	1.405E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
15512.084	1.375E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
15842.397	1.347E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
16175.104	1.319E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
16509.857	1.292E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
16846.561	1.266E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
17184.707	1.241E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
17518.762	1.218E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
17848.027	1.195E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
18172.154	1.174E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
18491.039	1.154E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
18811.924	1.134E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
19134.900	1.115E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
19460.221	1.096E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
19787.094	1.078E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
20115.961	1.060E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
20446.623	1.043E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
20779.580	1.027E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
21113.785	1.010E-02	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
21448.889	9.946E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
21786.287	9.792E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
22125.283	9.642E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
22465.623	9.495E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
22807.514	9.353E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
23150.799	9.214E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
23495.883	9.079E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
23842.658	8.947E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
24190.887	8.818E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
24540.861	8.693E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
24892.279	8.570E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
25246.242	8.450E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
25601.102	8.333E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
25955.768	8.219E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00

Report date: 05/31/2005

Quantachrome Instruments
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report
Version 4.03

Sample ID	Ceramic 1250C	**File Name**	5553101H_Merged
Sample Weight	0.6887 grams	**Bulk Sample Volume**	0.2902 cc
Sample Description	31/5/48		
Comments	TISTR		
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm²	**Hg Contact Angle**	(I)140.00°,(E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	**Moving Point Avg.**	11 (Scan Mode)
Operator	somsri	Mercury volume normalized by sample weight.	

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(Diameter) [cc/(µm-g)]	er) [cc/g]
26308.586	8.108E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
26662.945	8.001E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
27018.006	7.896E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
27374.018	7.793E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
27730.773	7.693E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
28088.131	7.595E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
28446.438	7.499E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
28805.242	7.406E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
29164.043	7.315E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
29523.049	7.226E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
29883.549	7.138E-03	0.0785	0.0000	100.00	0.000E+00	0.000E+00
30246.193	7.053E-03	0.0785	0.0000	100.00	8.030E-06	1.391E-07
30607.543	6.970E-03	0.0785	0.0000	100.00	1.656E-05	2.815E-07
30967.543	6.889E-03	0.0785	0.0000	100.00	2.563E-05	4.279E-07
31329.764	6.809E-03	0.0785	0.0000	100.00	2.885E-05	4.[illegible]
31690.162	6.731E-03	0.0785	0.0000	100.00	3.281E-05	[illegible]
32047.551	6.656E-03	0.0785	0.0000	100.00	3.775E-05	[illegible]
32400.281	6.584E-03	0.0785	0.0000	100.00	4.411E-05	[illegible]