

พฤติกรรมการกรองและการไล่เค็กฝุ่นออกจากตัวกรองเซรามิก

มานะ อมรกิจบำรุง¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาพฤติกรรมการกรองฝุ่นด้วยตัวกรองเซรามิก รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊สพัลส์ที่มีต่อการกำจัดเค็กฝุ่น ข้อมูลการทดลองได้จากการใช้ตัวกรองฝุ่นรูปแท่งทรงกระบอกทำจากเซรามิกที่มีพื้นที่ผิวการกรองเท่ากับ 0.051 m^2 โดยให้แก๊สปนฝุ่นไหลผ่านจากด้านนอกสู่ด้านใน ส่วนในการทำความสะอาดใช้อากาศอัดฉีดพ่นสวนทางกับทางเดินของแก๊สสกปรก การศึกษาพฤติกรรมของตัวกรองในระหว่างการกรองและการทำความสะอาด ดำเนินการที่ความเร็วในการกรองเท่ากับ 0.05 เมตร/วินาที ความดันของแก๊สพัลส์เท่ากับ 100, 300 และ 500 kPa และระยะเวลาการพัลส์เท่ากับ 200 และ 300 ms จากผลการทดลองพบว่า ความดันลดของชั้นฝุ่นบนตัวกรองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการก่อกำเนิดเค็กเนื้อแน่นบนผิวตัวกรอง และต่อมาอัตราการเพิ่มของความดันลดจะช้าลง เนื่องจากการก่อกำเนิดชั้นฝุ่นแบบหลวมๆ และในที่สุดแล้วอัตราการเพิ่มของความดันลดจะมีค่าคงที่ ส่วนประสิทธิภาพการไล่เค็กฝุ่นออกนั้นจะเพิ่มขึ้นตามความดันของแก๊สพัลส์ และแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันของแก๊สพัลส์ที่ใช้สูงกว่า 300 kPa นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการพัลส์แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการไล่เค็กฝุ่นออกจากผิวตัวกรอง

คำสำคัญ: ตัวกรองเซรามิก / การกรอง / การไล่เค็กฝุ่น / การทำความสะอาดแก๊สอุณหภูมิสูง

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะพลังงานและวัสดุ

Filtration Behavior and Dust Cake Detachment from Ceramic Filter Element

Mana Amornkitbamrung ¹

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This research work presents an experimental study of filtration behavior of dust by ceramic filter and also studies the effect of pulse gas pressure on the dust cake detachment. The experimental data are obtained using a ceramic candle filter with an area of 0.051 m² through which the dust-laden gas flows from the outside inwards. In the cleaning period, compressed air is injected opposite to the filtration direction. The behavior of filtration and cleaning is studied by using a velocity of 0.05 m/s, pulse gas pressure of 100, 300 and 500 kPa and pulse duration of 200 and 300 ms. The experimental results show that pressure drop of dust on the element increases quickly at the beginning because of the formation of a dense dust layer on the filter surface and then slow down due to the formation of a coarse layer. Finally, the rate of pressure drop is constant. Cleaning efficiency of captured dust cake increases with increasing pulse gas pressure and almost unchanged when pressure of pulse gas is higher than 300 kPa. Furthermore, it is found that pulse duration does not affect the cleaning efficiency of captured dust from ceramic filter surface.

Keywords : Ceramic Filter / Filtration / Cake Detachment / Hot Gas Cleaning

¹ Assistant Professor, Division of Thermal Technology, School of Energy and Materials.

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมกระบวนการและอุตสาหกรรมเคมีรวมถึงในกระบวนการเผา (incineration) ความจำเป็นต้องทำความสะอาดแก๊สได้เพิ่มสูงขึ้น [1], [2] ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อบังคับของกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของอนุภาคฝุ่น แก๊สกรด สารประกอบของโลหะหนัก ไฮโดรเจนคลอไรด์และสารอินทรีย์คลอไรด์ เช่น ไดออกซินและฟูราน ความสามารถในการทำความสะอาดแก๊สกระบวนการที่อุณหภูมิสูง ทำให้การกำจัดส่วนประกอบที่เป็นแก๊สมลพิษด้วยเทคนิคการสครับแบบแห้ง สามารถกระทำไปพร้อมกันได้เลย ข้อดีเพิ่มเติมที่อาจเป็นไปได้ อีกประการหนึ่งจะเกี่ยวข้องกับการก่อกำเนิดขึ้นใหม่ของสารอินทรีย์คลอไรด์ เช่น ไดออกซิน ซึ่งปัจจุบันเชื่อกันว่าถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยธาตุมูลของอนุภาคในแก๊สที่ได้จากการเผาเมื่อแก๊สเหล่านี้ถูกทำให้เย็นตัวลง ดังนั้นการกำจัดอนุภาคที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว จะช่วยขัดขวางการปล่อยสารประกอบที่เป็นพิษเหล่านี้เข้าสู่บรรยากาศ

โดยทั่วไป การจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต รวมถึงในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงงานเผาขยะ โรงงานผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน จะดำเนินการโดยการลดอุณหภูมิก่อนแล้วส่งไปยังเครื่องจับเก็บฝุ่นแบบใช้กันทั่วไป วิธีการดังกล่าวเป็นการสูญเสียปริมาณความร้อนจากแก๊สร้อนโดยเปล่าประโยชน์เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณสำรองลดลงเรื่อยๆ การใช้พลังงานที่มีอยู่จำกัดอย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยชะลอปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต การจับเก็บฝุ่นจากแก๊สร้อนโดยไม่ต้องทำการลดอุณหภูมิก่อน นับเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของกระบวนการให้สูงขึ้น อุปกรณ์จับเก็บฝุ่นหลักๆ ที่นิยมใช้กันไม่ว่าจะเป็น ไชโคลน เครื่องกรองฝุ่นแบบถุงกรอง และเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตนั้น ไม่สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ/หรือมีข้อจำกัดในแง่วัสดุ เมื่อนำไปใช้จับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงและมีฤทธิ์กัดกร่อน การพัฒนาอุปกรณ์จับเก็บฝุ่นแนวใหม่ที่สามารถจับเก็บฝุ่นจากแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง (โดยไม่ต้องทำแก๊สนั้นให้เย็นก่อน) กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ข้อได้เปรียบของการจับเก็บฝุ่นที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงก็คือ (1) สามารถเก็บพลังงานความร้อนจากกระแสแก๊สกลับคืน (ก่อนใช้งานหรือก่อนปล่อยทิ้ง) (2) ป้องกันอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ใบพัด กังหันแก๊ส และอุปกรณ์ปลายทางอื่นๆ จากการกัดเซาะและกัดกร่อน อันเนื่องมาจากอนุภาคฝุ่นและ/หรือแก๊สที่มีฤทธิ์กัดกร่อนที่ปะปนอยู่ในกระแสแก๊ส และ (3) มีข้อได้เปรียบในแง่ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็กลงเมื่อเดินเครื่องที่ความดันสูง

ในบรรดาวิธีการทำความสะอาดแก๊สแบบต่างๆ ที่มีอยู่นั้น การกรองด้วยตัวกรองเซรามิกถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีก้าวหน้าล่าสุดสำหรับการกรองอนุภาคฝุ่นออกจากแก๊สร้อน ทั้งนี้เนื่องจากตัวกรองชนิดดังกล่าวมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทนต่อความร้อนและสารเคมี โดยเฉพาะไอน้ำและไอของสารแอลคาไล จากประสบการณ์ในอดีตถึงปัจจุบันได้แสดงให้เห็นแล้วว่า เทคโนโลยีนี้สามารถบรรลุประสิทธิภาพการจับเก็บ (collection efficiency) ที่สูง อีกทั้งอุณหภูมิและความดันลดในระบบยังต่ำอีกด้วย ในระหว่างวัฏจักรการกรอง ฝุ่นจะถูกจับอยู่ที่ผิวด้านนอกจนกระทั่งถึงเวลา

หรือค่าความดันลดที่กำหนดไว้ จึงทำความสะอาด (โดยทั่วไป 2-3 ครั้ง/ชั่วโมง) โดยปกติกระทำแบบออนไลน์ โดยพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงในลักษณะพัลส์ เพื่อไล่นุภาคที่เกาะอยู่ที่ผิวของตัวกรองออกไปโดยไม่ต้องหยุดการกรอง เค้กที่หลุดออกมาจะตกลงสู่ถังรองรับทางด้านล่างของหน่วยกรอง จากนั้นวัฏจักรการกรองก็กลับมาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ปัจจุบัน การไล่นุภาคฝุ่นที่สะสมอยู่ออกจากผิวตัวกรองให้ได้มีประสิทธิภาพ ยังเป็นประเด็นสำคัญอันหนึ่งที่จะต้องหาทางแก้ไขเพื่อการเดินเครื่องในแบบต่อเนื่อง

บทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเค้กฝุ่นและการไล่นุภาคฝุ่นออกจากตัวกรองเซรามิก โดยทำการศึกษาโครงสร้างของชั้นฝุ่นบนตัวกรองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีการวัดความดันลดอันเนื่องมาจากการสะสมตัวของฝุ่น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของความดันแก๊สพัลส์และระยะเวลาการพัลส์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดอีกด้วย

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีผู้ศึกษาการทำความสะอาดตัวกรองด้วยวิธีการฉีดพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงในลักษณะพัลส์ ผลของสมบัติเฉพาะตัวของฝุ่น อุณหภูมิ และองค์ประกอบทางเคมีที่มีต่อความแข็งแรงและการยึดติดของเค้กฝุ่นที่กรองได้หลายแนวทางด้วยกัน

Giernoth และ Renz [3] พบว่ากระบวนการทำความสะอาดไม่เพียงขึ้นอยู่กับสภาพการซึมผ่านของเค้กฝุ่น (dust cake permeability) แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วในการกรอง (filtration velocity) และความหนาของชั้นฝุ่นอีกด้วย การเพิ่มช่วงรอบ (cycle duration) หรือเวลาระหว่างการทำความสะอาดด้วยการฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ และการเพิ่มความเร็วในการกรองจะส่งผลให้ชั้นฝุ่นมีความหนามากขึ้นและลดสภาพการซึมผ่านลง ความเร็วในการกรองที่สูงจะทำให้เกิดชั้นฝุ่นตึกค้างที่มีลักษณะเนื้อแน่น เนื่องจากอนุภาคจะหลุดลอดเข้าไปในตัวกลางและเกิดการอัดตัวกันแน่นของเค้ก นอกจากนี้ยังพบว่าสภาพการซึมผ่านของเค้กฝุ่นไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

Berbner และ Löffler [4] ได้ใช้ชุดทดสอบที่ประกอบด้วยตัวกรองเซรามิก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำความสะอาดด้วยการฉีดพ่นแก๊สพัลส์ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดจะเพิ่มขึ้นตามความดันของถังเก็บแก๊สพัลส์ ซึ่ง Berbner และ Pilz [5] ก็ได้รายงานผลการค้นพบที่คล้ายกันนี้ที่สภาวะอุณหภูมิสูง

Berbner และ Löffler [6] พบว่าเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกไล่ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาของเค้กฝุ่นจะเป็นการเพิ่มความดันสูงสุดภายในแท่งตัวกรอง อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูง (850°C) ข้อได้เปรียบของเค้กฝุ่นที่หนาจะถูกปลดทอนลงด้วยแรงเกาะติดของฝุ่น (cohesive force) ที่เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

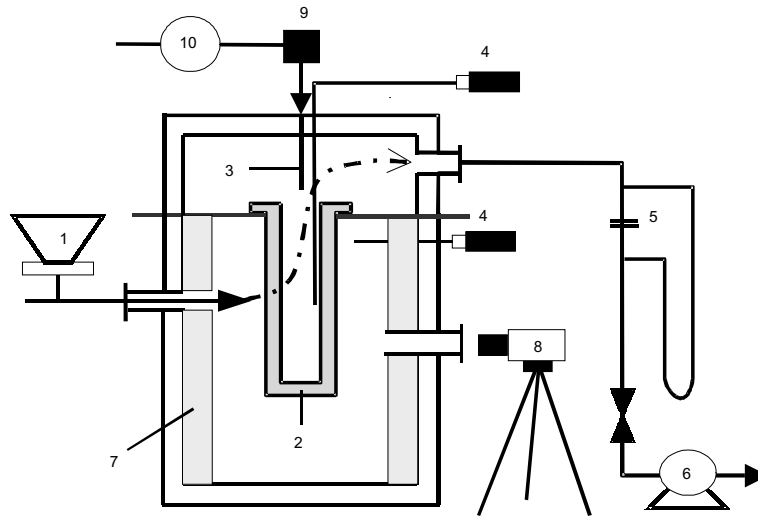
Kanaoka และ Amornkitbamrung [7] ได้ทำการศึกษาผลของสภาพการซึมผ่านของตัวกรอง (filter permeability) ที่มีต่อพฤติกรรมการไล่เค้กฝุ่นออกจากผิวของตัวกรองเซรามิก จากผลการทดลองพบว่า pressure trace หลังฉีดพ่นด้วยแก๊สพัลส์ มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพการซึมผ่านของตัวกรอง ในกรณีของตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านสูง กระบวนการทำความสะอาดเกือบจะเกิดขึ้นทันทีภายหลังจากฉีดพ่นด้วยแก๊สพัลส์ สำหรับตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านต่ำ แก๊สสะอาดจะถูกเก็บสะสมไว้ก่อนกระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้น

Smith *et al.* [8] ได้ทำการศึกษาเพื่อวัดความแข็งแรงเฉือน (shear strength) ของอนุภาคผง $MgSO_4$, $CaSO_4$ และของผสมของอนุภาคผงทั้ง 2 ชนิดทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อนที่ $750^{\circ}C$ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงเฉือนจะมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนและตัวอย่างที่มีส่วนประกอบของ $MgSO_4$ โดยเรียงลำดับได้ดังนี้

$$S_{MgSO_4} \approx S_{Mg_2Ca(SO_4)_3} \gg S_{CaSO_4}$$

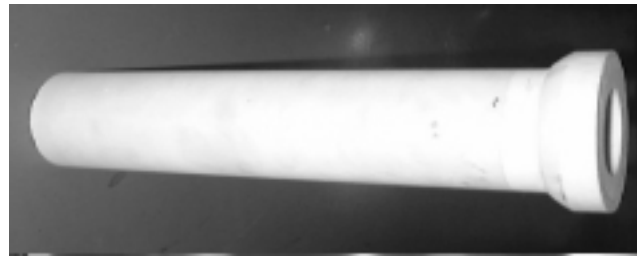
3. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ ตัวกรองเซรามิกรูปแท่งทรงกระบอกปลายปิด จำนวน 1 แท่ง (ขนาด 40 มม. ID x 60 มม. OD x 300 มม.) ดังแสดงในรูปที่ 2 ถูกติดตั้งในแนวตั้งที่ตำแหน่งใจกลางของภาชนะบรรจุ (ขนาด 300 มม. ID x 700 มม.) ระบบทำความสะอาดประกอบด้วยถังเก็บแก๊สอัดขนาด 6 ลิตร วาล์วโซเลนอยด์ และน็อชเชิล (ขนาด 9 มม. ID x 450 มม.) น็อชเชิลถูกติดตั้งในตำแหน่งศูนย์กลาง ห่างจากปลายเปิดของตัวกรอง 10 มิลลิเมตร อนุภาคเถ้าลอยถูกป้อนด้วยเครื่องป้อนแบบตั้งโต๊ะ (table feeder) และถูกทำให้กระจายตัวออกจากกันด้วยอากาศอัด แล้วจึงผ่านเข้าไปยังส่วนทดสอบ และถูกจับเก็บอยู่บนผิวของตัวกรอง จนกระทั่งความดันลดเนื่องจากการสะสมตัวของเค้กฝุ่นถึงค่าที่กำหนดไว้ที่ 3600 Pa หลังจากนั้นหยุดป้อนฝุ่นเถ้าลอยแล้วทำความสะอาดตัวกรอง โดยฉีดพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงในลักษณะพัลส์เข้าทางด้านผิวสะอาดของตัวกรอง ในที่นี้ตัวกรองเซรามิกจะถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังนี้: ความเร็วในการกรอง 0.05 เมตร/วินาที อัตราการป้อนฝุ่น 1 กรัม/นาที และความดันที่ใช้ทำความสะอาดตัวกรอง 100, 300 และ 500 kPa นอกจากนี้จะทำการศึกษาผลของระยะเวลาการพัลส์ที่ 200 และ 300 ms ในระหว่างการจับเก็บฝุ่น จะทำการวัดความดันที่ผิวด้านนอกและด้านในของตัวกรอง การทดลองทุกการทดลอง ทำที่อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับร้อยละ 60 โดยประมาณ ตารางที่ 1 ได้สรุปสมบัติของตัวกรองและฝุ่นเถ้าลอยที่นำมาทดสอบ ส่วนเงื่อนไขการทดลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 2



1. เครื่องป้อนฝุ่น 2. ตัวกรองเซรามิก 3. หัวฉีดพ่นย้อนแบบพัลส์ 4. เครื่องรับรู้ความดัน 5. แผ่นช่องและแมนอมิเตอร์
6. เครื่องเป่าลม 7. ตัวให้ความร้อน 8. กล้องความเร็วสูง 9. วาล์วโซลินอยด์ 10. ถังเก็บแก๊สอัด

รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 ภาพถ่ายตัวกรองเซรามิก

ตารางที่ 1 สมบัติของตัวกรองเซรามิกและอนุภาคฝุ่นที่นำมาทดสอบ*

ตัวกรอง	
ขนาดของแท่งตัวกรอง (ID × OD × L)	∅40 mm × ∅60 mm × 300 mm
วัสดุ	MgO+SiO ₂ +Al ₂ O ₃
ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน (μm)	10
ความพรุน (-)	0.42 (supporting layer, 10 mm thick)
	0.50 (thin outer layer, 500 μm thick)
ความหนาแน่น (kg/m ³)	—
สภาพการซึมผ่าน (m ²)	1.03 × 10 ⁻¹¹
อนุภาคฝุ่น	
วัสดุ	Fly ash
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	1.7
พื้นผิวจำเพาะ (m ² /m ³)	3.53 × 10 ⁶
ความหนาแน่นจริง (kg/m ³)	2000

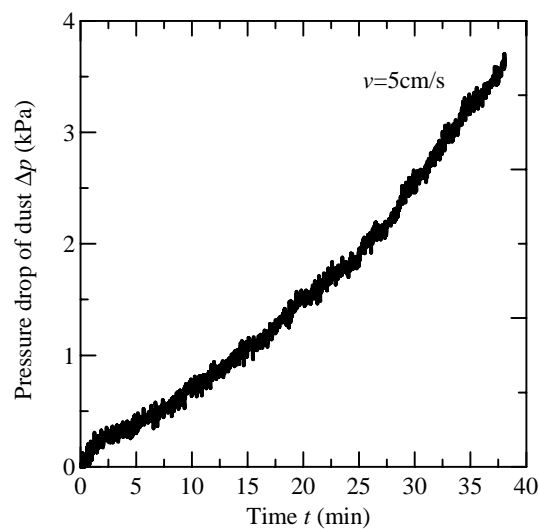
* ข้อมูลสมบัติของตัวกรองเซรามิกได้จากบริษัทผู้ผลิต ส่วนข้อมูลสมบัติของอนุภาคฝุ่นได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลอง

อัตราการป้อนฝุ่น (g/min)	1
ความเร็วในการกรอง (m/s)	0.05
อุณหภูมิ (°C)	20
ความดันของแก๊สพัลส์ (kPa)	100, 300, 500
ระยะเวลาการพัลส์ (ms)	200, 300 (off-line)

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การสะสมของชั้นฝุ่นบนผิวตัวกรอง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับเวลาที่ใช้ในการกรอง

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดเนื่องจากการสะสมตัวของฝุ่นกับเวลา จากรูปจะพบว่า ความดันลดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการกรอง และอัตราการเพิ่มของความดันลดจะช้าลงเมื่อปริมาณฝุ่น (dust load) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการป้อนฝุ่นมีค่าคงที่ ความดันลดควรเพิ่มขึ้นตามเวลาในลักษณะเส้นตรง ถ้าอนุภาคฝุ่นที่จับบนผิวตัวกรองก่อกำเนิดเป็นชั้นฝุ่นที่มีความสม่ำเสมอ แต่จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงว่าการก่อกำเนิดของชั้นฝุ่นบนผิวตัวกรองเซรามิกมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ

อย่างไรก็ดี สำหรับชั้นฝุ่นที่มีความหนาน้อยๆ อาจสมมุติได้ว่าฝุ่นที่เกาะตัวอยู่มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นสมการ Kozeny-Carman ต่อไปนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาความพรุนของชั้นฝุ่นได้

$$\Delta p = 5 \frac{(1-\varepsilon)^2 S_v^2 \mu v \Delta L}{\varepsilon^3} = \frac{\mu}{\kappa} v \Delta L \quad (1)$$

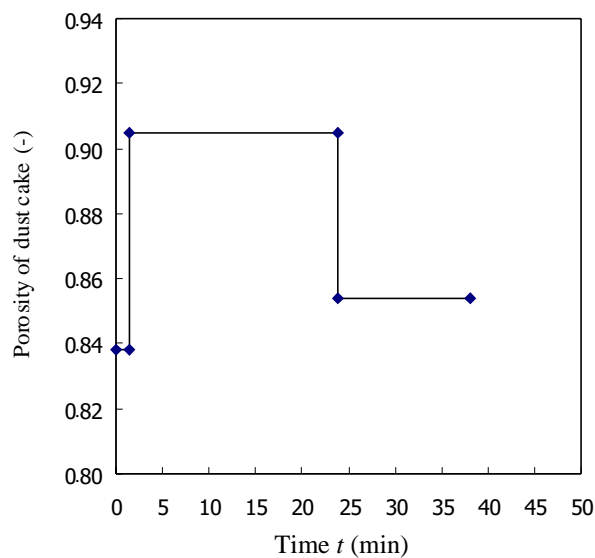
ความหนาของชั้นฝุ่น ΔL สามารถประเมินได้จากมวลของฝุ่นที่เกาะอยู่บนแท่งตัวกรองตั้งสมการ

$$\Delta L = \frac{\Delta m}{\rho_p(1-\varepsilon)} = \frac{Cv\Delta t}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2)$$

ดังนั้น ความพรุน ε ของชั้นฝุ่นที่มีความหนาน้อยๆ สามารถประมาณได้จากสมการ

$$\Delta p = 5 \frac{(1-\varepsilon) S_v^2 \mu v \Delta m}{\varepsilon^3 \rho_p} \quad (3)$$

ในสมการ (3) ค่า Δp และ Δm ได้จากการทดลอง ดังนั้น ε เป็นตัวไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังกล่าว



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของชั้นฝุ่นที่คำนวณได้กับเวลาที่ใช้ในการกรอง

รูปที่ 4 แสดงค่า ε ที่คำนวณได้กับเวลาที่ใช้ในการกรอง จากรูปจะกล่าวได้ว่า ในขั้นแรกเริ่มของการกรอง แคล์ฝุ่นที่ก่อกำเนิดขึ้นจะมีลักษณะบางและเนื้อแน่น และชั้นต่อมาชั้นแคล์ฝุ่นที่ก่อกำเนิดขึ้นจะมีลักษณะหลวมๆ และในที่สุดจะเกิดชั้นฝุ่นที่มีลักษณะสม่ำเสมอ โดยมีค่าความพรุนอยู่ระหว่างค่าในขั้นแรกกับขั้นที่สอง

การทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองที่ทำไว้ก่อนหน้านี้ [7] กล่าวคือ ตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านสูง เวลาที่ใช้ในการกรองจะยาวนาน ซึ่งก็หมายความว่าในระหว่างการกรอง เราไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดตัวกรองบ่อยๆ ดังนั้นจะสามารถลดปริมาณอากาศอัดที่ต้องใช้ในการไล่เค้กฝุ่น รวมถึงช่วยลดโอกาสที่ตัวกรองจะเสียหายลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ความเร็วในการกรองที่สูงได้กับตัวกรองที่มีสภาพการซึมผ่านสูง ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและลดขนาดของระบบกำจัดฝุ่นลง

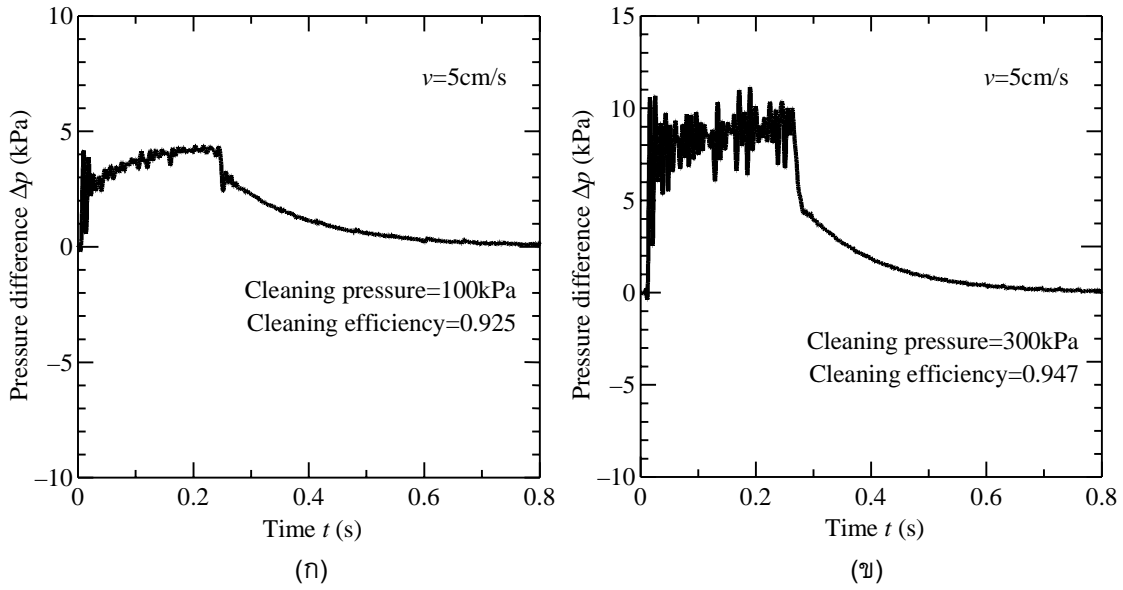
4.2 ผลของความดันแก๊สพัลส์และระยะเวลาการพัลส์

เพื่อควบคุมความดันลดของตัวกรองให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จำเป็นที่จะต้องทำการไล่เค้กฝุ่นออกจากผิวตัวกรองเป็นระยะๆ โดยการฉีดพ่นแก๊สสะอาดความดันสูงสวนทางกับทางเดินของแก๊สสกปรก ในทางทฤษฎี เค้กฝุ่นจะหลุดออกจากผิวตัวกรองก็ต่อเมื่อความดันที่ป้อนเข้าต้องสูงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเค้กฝุ่นกับผิวตัวกรอง หรือเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวภายในเค้กฝุ่น จากผลการทดลองที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า การไล่ฝุ่นจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าความดันแก๊สพัลส์มีค่ามาก ประสิทธิภาพการทำความสะอาดจะเพิ่มขึ้นตามความดันของแก๊สในถังเก็บ ความดันในถังเก็บที่สูงขึ้น จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านผนังตัวกรองและชั้นเค้กฝุ่นจะเพิ่มสูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความดันของแก๊สพัลส์สูงกว่า 300 kPa ประสิทธิภาพการทำความสะอาดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาการพัลส์แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่นออกจากผิวตัวกรอง ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการทำความสะอาด ระยะเวลาการพัลส์ที่ยาวนานขึ้น ไม่ได้ช่วยเพิ่มความดันภายในถังตัวกรอง อาจกล่าวได้ว่าความดันแก๊สพัลส์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้คือ 300 kPa (การใช้ความดันแก๊สพัลส์ที่สูงเกินไป อาจทำให้ตัวกรองเสียหายได้) ในที่นี้ ประสิทธิภาพการทำความสะอาดนิยามไว้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\eta = \frac{\Delta p_d - \Delta p_a}{\Delta p_d - \Delta p_o} \quad (4)$$

ตารางที่ 3 สรุปประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวกรองที่เงื่อนไขต่าง ๆ (คำนวณโดยใช้สมการ (4))

Pulse duration (ms)	ประสิทธิภาพการทำความสะอาด		
	$p_c=100$ kPa	$p_c=300$ kPa	$p_c=500$ kPa
200	0.925	0.947	0.956
300	0.930	0.952	0.961



รูปที่ 5 ความดันภายในตัวกรองหลังจากฉีดพ่นด้วยแก๊สสะอาดความดันสูง
(ก) $p_c = 100 \text{ kPa}$ และ (ข) $p_c = 300 \text{ kPa}$

รูปที่ 5 แสดง pressure trace หลังฉีดพ่นด้วยแก๊สฟัลส์ความดัน 100 kPa (รูป (ก)) และ 300 kPa (รูป (ข)) จากการเปรียบเทียบรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่า pressure trace มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในกรณี $p_c = 300 \text{ kPa}$ กระบวนการทำความสะอาดเกือบจะเกิดขึ้นทันทีที่ภายหลังฉีดพ่นด้วยแก๊สฟัลส์ ส่วนกรณี $p_c = 100 \text{ kPa}$ แก๊สสะอาดจะถูกเก็บสะสมไว้ก่อนที่กระบวนการทำความสะอาดจะเกิดขึ้น รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายของตัวกรองหลังจากทำความสะอาดด้วยแก๊สฟัลส์ความดัน 100 และ 300 kPa จะเห็นได้ว่า สำหรับการทำความสะอาดด้วยแก๊สฟัลส์ความดัน 300 kPa ปริมาณฝุ่นตกค้างบนผิวตัวกรองมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทำความสะอาดด้วยแก๊สฟัลส์ความดัน 100 kPa



ส่วนบน

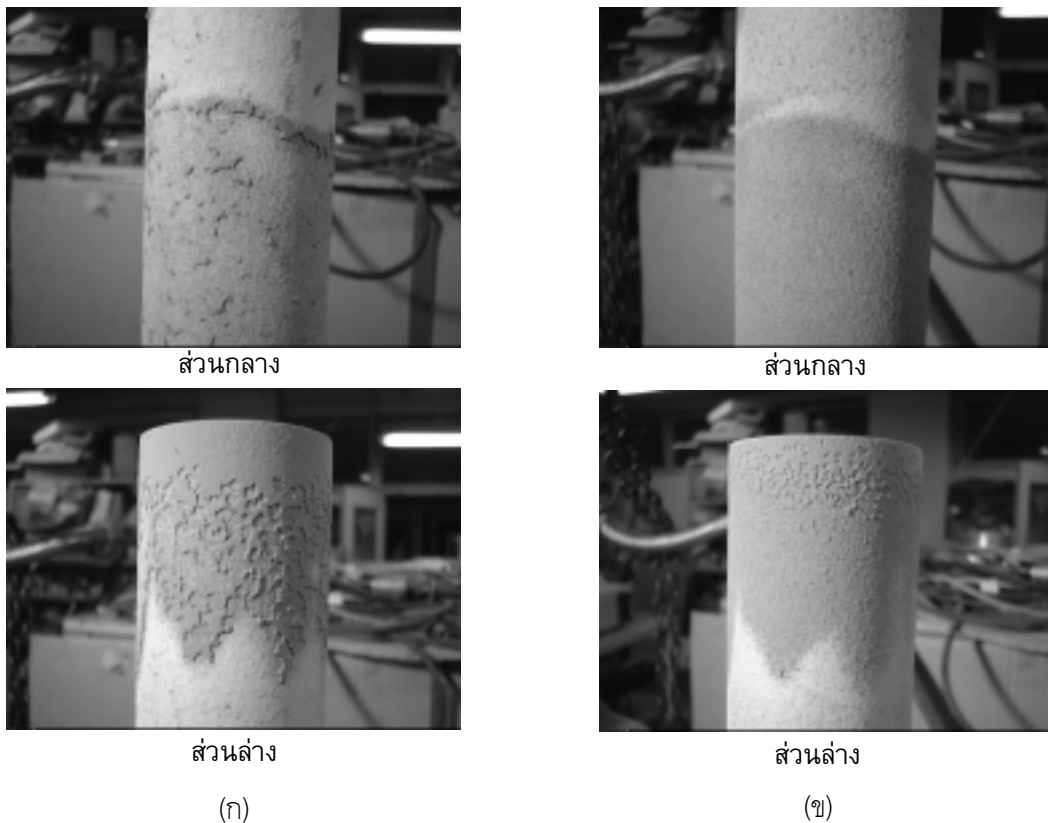
(ก)



ส่วนบน

(ข)

รูปที่ 6 ภาพถ่ายตัวกรองหลังทำความสะอาดด้วยแก๊สฟัลส์ความดันต่างๆ กัน
(ก) $p_c = 100 \text{ kPa}$ และ (ข) $p_c = 300 \text{ kPa}$



รูปที่ 6 (ต่อ) ภาพถ่ายตัวกรองหลังทำความสะอาดด้วยแก๊สพัสส์ความดันต่างๆ กัน
(ก) $p_c = 100$ kPa และ (ข) $p_c = 300$ kPa

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกิดเค้กฝุ่นและการไล่เค้กฝุ่นออกจากตัวกรองเซรามิก โดยได้ทำการศึกษาโครงสร้างของชั้นฝุ่นที่สะสมบนตัวกรองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ด้วยวิธีการวัดความดันลดอันเนื่องมาจากการสะสมตัวของฝุ่น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของความดันแก๊สพัสส์และระยะเวลาการพัสส์ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดอีกด้วย จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าความดันลดของชั้นฝุ่นบนตัวกรองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการก่อกำเนิดเค้กเนื้อแน่น และเกิดชั้นฝุ่นหลวมๆ ในช่วงถัดมา และในช่วงสุดท้ายจะเกิดชั้นเค้กฝุ่นที่มีลักษณะสม่ำเสมอ โดยมีค่าความพรุนอยู่ระหว่างค่าในช่วงแรกกับช่วงที่สอง สำหรับประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่นออกนั้น พบว่าจะเพิ่มขึ้นตามความดันของแก๊สพัสส์ และแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความดันของแก๊สพัสส์ที่ใช้สูงกว่า 300 kPa นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาการพัสส์แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการไล่เค้กฝุ่นออกจากผิวตัวกรอง

6. สัญลักษณ์

C	ความเข้มข้นของฝุ่น	(kg/m^3)
L	ความหนาของชั้นฝุ่น	(m)
m	ปริมาณฝุ่นต่อหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกรอง	(kg/m^2)
K	สภาพการซึมผ่าน	(m^2)
p	ความดัน	(Pa)
Δp	ความดันลด	(Pa)
S_v	พื้นที่ผิวจำเพาะ	(m^2/m^3)
t	เวลา	(s)
v	ความเร็วในการกรอง	(m/s)
ε	ความพรุน	(—)
η	ประสิทธิภาพการทำความสะอาด	(—)
μ	ความหนืดของแก๊ส	($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
ρ	ความหนาแน่น	(kg/m^3)
ตัวห้อย		
a	หลังทำความสะอาด	
d	ก่อนทำความสะอาด (มีปริมาณฝุ่น)	
p	อนุภาคฝุ่น	
o	ภาวะเริ่มต้น	

7. 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. Giernoth, B. and Renz, U., 1996, “Investigation in Hot Gas Filtration with Ceramic Filter Elements,” *Proceedings of the Third International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures*, Vol. 1, pp. 233-245.
4. Berbner, S. and Löffler, F., 1993, “Pulse Jet Cleaning of Rigid Filter Elements at High Temperatures,” *Proceedings of the Second International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures*, pp. 225-237.

5. Berbner, S. and Pilz, T., 1996, "Characterization of the Filtration and Regeneration Behaviour of Rigid Ceramic Barrier Filters at High Temperatures," *Powder Technology*, Vol. 86, No. 1, pp. 103-111.

6. Berbner, S. and Löffler, F., 1994, "Influence of High Temperatures on Particle Adhesion," *Powder Technology*, Vol. 78, No. 3, pp. 273-280.

7. Kanaoka, C. and Amornkitbamrung, M., 2001, "Effect of Filter Permeability on the Release of Captured Dust from a Rigid Ceramic Filter Surface," *Powder Technology*, Vol. 118, No. 1-2, pp. 113-120.

8. Smith, D. H., Haddad, G. J., and Ferer, M., 1997, "Shear Strengths of Heated and Unheated Mixtures of $MgSO_4$ and $CaSO_4$ Powders. Model Pressurized Fluidized Bed Combustion Filter Cakes," *Energy and Fuels*, Vol. 11, No. 5, pp. 1006-1011.