



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การแยกอนุภาคฝุ่นด้วย Colloidal Gas Aphrons (CGA)

โดย ดร. สมนึก จารุติลกกุล และ คณะ

เดือนปีที่สำเร็จโครงการ มิถุนายน 2548

สัญญาเลขที่ MRG4680154

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การแยกฝุ่นด้วย Colloid Gas Aphrons (CGA)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดร. สมนึก จารุติลกกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. รศ. ดร. วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำเนงานวิจัย และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลือทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

รหัสโครงการ: MRG4680154

ชื่อโครงการ: การแยกฝุ่นด้วย Colloid Gas Aphrons (CGA)

ชื่อนักวิจัย: ดร. สมนึก จารุติลกกุล และ รศ.ดร. วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

E-mail address: somnuk.jar@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 1 ก.ค. 2546 – 30 มิ.ย. 2547

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ฟองแก๊สแอฟรอนในการแยกฝุ่นออกจากอากาศ โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดได้แก่ ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ชนิดของฝุ่น ความเข้มข้นของฝุ่น ขนาดของอนุภาคฝุ่น อัตราการไหลของอากาศ และ อัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอน ในการทดลองได้ทำการแยกฝุ่นด้วยการป้อนฟองแก๊สแอฟรอน และ อากาศที่มีฝุ่นปนเปื้อนเข้าไปในคอลัมน์แบบไหลตามกัน จากการศึกษาพบว่า สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X100) ให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงสุด ดังนั้นกลไกการแยกน่าจะเป็นการชนแล้วยึดติดกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับฟองแก๊สแอฟรอน ส่วนการทดลองผลของสภาวะการดำเนินการพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศลดลง อัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอนเพิ่มขึ้น และ ความเข้มข้นของฝุ่นลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแม้ว่าจะต่ำกว่าความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่บ้างเล็กน้อย ในส่วนชนิดของฝุ่นพบว่าลักษณะรูปร่างของฝุ่นมีอิทธิพลมากกว่าคุณลักษณะของพื้นผิวในเชิงความสามารถในการเปียกน้ำ

คำหลัก: การกำจัดฝุ่น, ฟองแก๊สแอฟรอน, ซีเถ้าลอย, สารลดแรงตึงผิว

Project Code: MRG4680154

Project Title: Dust collection by using Colloid Gas Aphrons

Investigators: Dr. Somnuk Jarudilokkul and Assos. Prof. Virote Boonamnuyvittaya
King Mongkut's University of Technology Thonburi

E-mail address: somnuk.jar@kmutt.ac.th

Project period: 1st July 2003 – 30 th June 2004

Abstract

Separation by using colloidal gas aphrons (CGA) is a high potential technique for dust removal. In this study, the effect of surfactant type, dust type and concentration, air flow rate and CGA flow rate on collection efficiency was investigated. The separation was performed as co-current operation in the separation column. The dust concentration at inlet and out let of the separation column was determined in order to determine the collection efficiency. It was found that the type of surfactant did not affect on the collection efficiency. CGA could separate dust particle from air by physical force. The collection efficiency increased with increasing of CGA flow rate whereas it decreased with increasing of airflow rate and dust concentration. The collection efficiency of large particle size was higher than small particle size. The shape of particle was more influence on the efficiency than wetting ability of dust particle.

Keywords: Dust collection; Gas Aphrons; Fly ash; Surfactant

Executive summary

การเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศมากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้การแยกอนุภาคหลายรูปแบบเช่น การกำจัดด้วยแรงเหวี่ยง การกำจัดด้วยการกรอง และ การกำจัดด้วยแรงโน้มถ่วง เป็นต้น ในแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ความสามารถในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กและค่าความดันลดที่สูงเป็นจุดด้อยของการแยกด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น วิธีการกำจัดด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจเพราะฟองแก๊สแอฟรอนเป็นฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมากประกอบด้วยชั้นของสารลดแรงตึงผิวถึง 2 ชั้นจึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กได้ นอกจากการดำเนินการแยกในคอลัมน์แบบไหลตามกันก็น่าจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องความดันลด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการกำจัดฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนได้แก่ ชนิดของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของฝุ่น อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบจาก ชนิดของฝุ่น และ ขนาดของฝุ่น การทดลองกระทำโดยการป้อนฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์แบบไหลตามกัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจึงทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าและทางออกเพื่อวิเคราะห์ภาพประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น

ผลจากการศึกษาพบว่า สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Triton X100) ให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกและลบ จึงคาดว่ากลไกการแยกน่าจะเป็นการชนแล้วยึดติดกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับฟองแก๊สแอฟรอน ส่วนการทดลองผลของสภาวะการดำเนินการพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศลดลง อัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอนเพิ่มขึ้น และ ความเข้มข้นของฝุ่นลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแม้ว่าจะต่ำกว่าความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 10 ไมโครเมตร บ้างเล็กน้อย ในส่วนชนิดของฝุ่นพบว่า ลักษณะรูปร่างของฝุ่นมีอิทธิพลมากกว่าคุณลักษณะของพื้นผิวในเชิงความสามารถในการเปียกน้ำ กล่าวคือ ลักษณะรูปร่างที่กลมจะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะฟองแก๊สแอฟรอนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมซึ่งอาจทำให้ฟองแก๊สแอฟรอนแตกได้ง่าย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่วิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีกำลังพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สิ่งที่มาพร้อมกับความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและไม่อาจจะมองข้ามได้ก็คือปัญหามลภาวะต่างๆ ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหามลภาวะทางอากาศที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เช่น การเผาไหม้ การหลอมโลหะ การขุดเจาะ การกลึงและการขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดความรำคาญเดือดร้อนแก่ชุมชนใกล้เคียง รวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพและความเสียหายกับสภาพแวดล้อมด้วย การควบคุมที่ดีที่สุดคือการป้องกันไม่ให้เกิดฝุ่น แต่เมื่อเกิดมีฝุ่นขึ้นมาแล้วก็จำเป็นต้องหาวิธีกำจัดให้น้อยลง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการแยกฝุ่นมีอยู่มากมาย เช่น เครื่องดักจับฝุ่นแบบไซโคลน ห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง เครื่องกรอง เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก หรือเครื่องแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งเครื่องดักจับฝุ่นแต่ละประเภทมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซที่ต้องการแยก วัตถุประสงค์และความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น เครื่องดักจับฝุ่นแบบห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงและเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลนจะให้ประสิทธิภาพต่ำในการแยกฝุ่นที่มีขนาดเล็ก เครื่องแยกฝุ่นชนิดเปียกจะมีปัญหาเกี่ยวกับตะกอนเปียกและใช้พลังงานสูงในการกระจายผิวหน้าของของเหลวให้สัมผัสกับฝุ่น หรือเครื่องแยกฝุ่นแบบเครื่องกรองจะมีปัญหาเกี่ยวกับความดันและถูกกรองตัน จึงได้มีการนำเทคนิคการแยกสารโดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอนมาประยุกต์ใช้ในการแยกฝุ่น เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถแยกสารที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ได้ รวมทั้งกำจัดได้ทั้งไอระเหยของก๊าซมลพิษ และอนุภาคฝุ่นไปพร้อมกันได้ มีพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองก๊าซและสารที่ต้องการแยกสูง ลดปัญหาการอุดตันของตัวกลางและการหลุดกลับไปยังกระแสก๊าซของฝุ่นขนาดเล็ก แรงต้านทานต่ำ ใช้เนื้อที่น้อย สร้างประกอบง่าย และค่าใช้จ่ายการประกอบและการบำรุงรักษาต่ำ

จากการศึกษาของ Felix Sebba ทำให้พบว่าฟองแก๊สแอฟรอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ เนื่องจากฟองแก๊สแอฟรอนเป็นฟอง 2 ชั้นที่มีความเสถียร มีขนาดเล็กโดยขนาดของอนุภาคฟองแก๊สแอฟรอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25-100 ไมโครเมตร แก๊สแอฟรอนประกอบไปด้วยส่วนแก๊ส 65% และมีประจุตามสารลดแรงตึงผิวที่เติมเข้าไป จึงสามารถใช้แยกได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และสามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้ยังต้องควบ

คุมปริมาณฝุ่นที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมให้เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนดและเป็นไปตามมาตรฐาน EPA (Environmental Protection Agency) อีกด้วยเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสามารถในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นซึ่งได้แก่ ชนิดของสารลดแรงตึงผิว, ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน, ความเร็วของอากาศ, ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า, ขนาดของฝุ่นและชนิดของฝุ่น

1.2.2 ศึกษาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการ ดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่น ได้แก่ ความถี่, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหมักฝุ่นเริ่มต้น และหาสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น

1.3.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

- สารลดแรงตึงผิวชนิด Anionic (SDS), สารลดแรงตึงผิวชนิด Cationic (CTAB) และ สารลดแรงตึงผิวชนิด Non-ionic (Titron X-100)

1.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

- ความเร็วของอากาศที่ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ
- ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้าที่ $0.1 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$, $0.2 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$ และ $0.3 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$
- ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนที่ $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

1.3.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

- อนุภาคในช่วง 1.137 – 13.669 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 5.815 μm

- อนุภาคในช่วง 3.406 – 30.975 m ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 13.308 m
- อนุภาคในช่วง 6.763 – 78.842 m ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 22.567 m

1.3.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

- Hydrophilic (Fly ash, Wheat flour)
- Hydrophobic (PVC resin)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาเทคนิคใหม่ในการลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากฝุ่นได้

1.4.2 สามารถพัฒนาเทคนิคการดูดซับบนฟองแก๊สแอฟรอนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการ

อื่นๆได้

บทที่ 2

การดำเนินการทดลองการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) ของ GW. Instek รุ่น GFG-8015
- 2.1.2 เครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ของ Pro-amp รุ่น 0560345
- 2.1.3 ลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ของ Woofer รุ่น DC-S410
- 2.1.4 เพอร์ริสตัลติคปั๊มของ Masterflex รุ่น 7518
- 2.1.5 หัวเก็บตัวอย่าง (Nozzle)
- 2.1.6 อุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)
- 2.1.7 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ (Rotameter)
- 2.1.8 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 2.1.9 ขวดรูปชมพู่ (Flask) พร้อมจุกยาง
- 2.1.10 กระดาษกรองเบอร์ GF/F ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ของ Whatman
- 2.1.11 จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 2.1.12 ปีกเกอร์ขนาด 100 มล.
- 2.1.13 ปากคืบ
- 2.1.14 เตาอบ (Oven)
- 2.1.15 เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2.1.16 โทคูดความชื้น
- 2.1.17 เครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000
- 2.1.18 เครื่องวัด Zeta potential ของ Malvern รุ่น DST Ver. 4.00
- 2.1.19 เครื่องร่อนแยกขนาด Sieve shaker
- 2.1.20 เครื่องบด Ball mill

2.2 สารเคมี

- 2.2.1 Cetyltrimethyl Ammonium Bromide ($C_{19}H_{42}BrN$): CTAB
- 2.2.2 Sodium Dodecyl Sulfate (Na_2SiO_3): SDS
- 2.2.3 Triton X-100 ($C_{34}H_{62}O_{11}$)

2.2.4 ขี้เถ้าลอย (Fly ash)

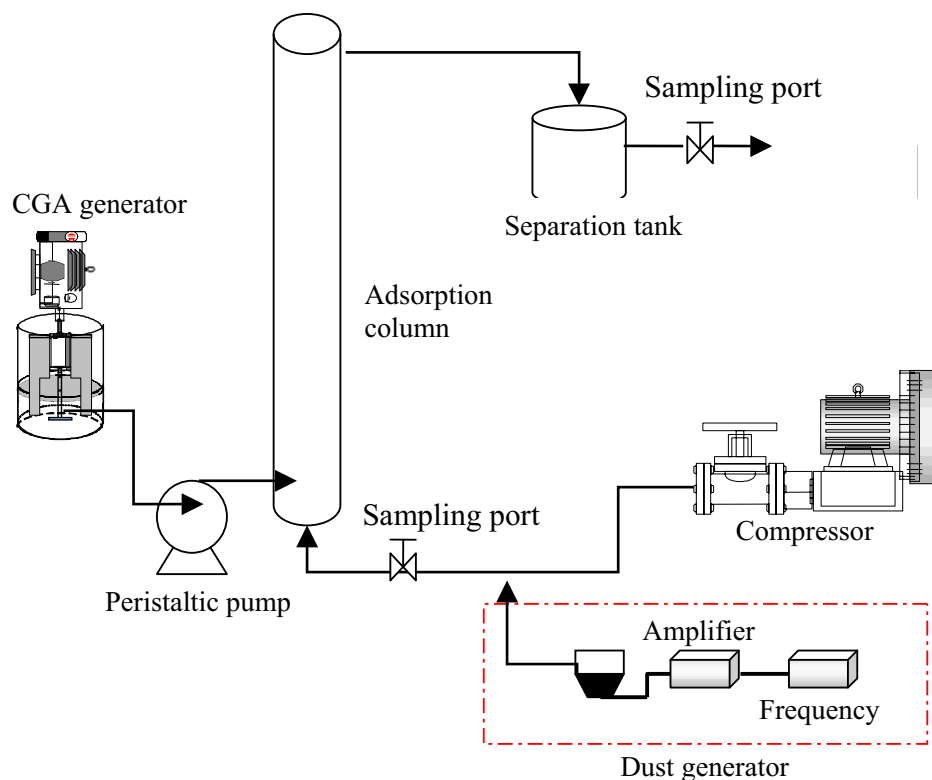
2.2.5 PVC resin ชนิด Emulsion

2.2.6 Wheat flour

2.2.7 Acetone ชนิด Reagent grade 0.001% residue

2.3 ชุดอุปกรณ์การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ชุดอุปกรณ์ในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ อุปกรณ์กำเนิดฝุ่น ออกแบบโดยใช้ลำโพงเป็นตัวกำเนิดฝุ่น เมื่อลำโพงสั่นจะทำให้ฝุ่นลอยฟุ้งขึ้นมาและถูกอากาศพาเข้าสู่คอลัมน์ วัสดุที่นำมาใช้ทำคอลัมน์จะเลือกใช้ท่ออะคริลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็นการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สแอฟรอนที่ถูกปั๊มเข้ามา โดยส่วนประกอบต่างๆของชุดอุปกรณ์การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนแสดงดังรูปที่ 2.1



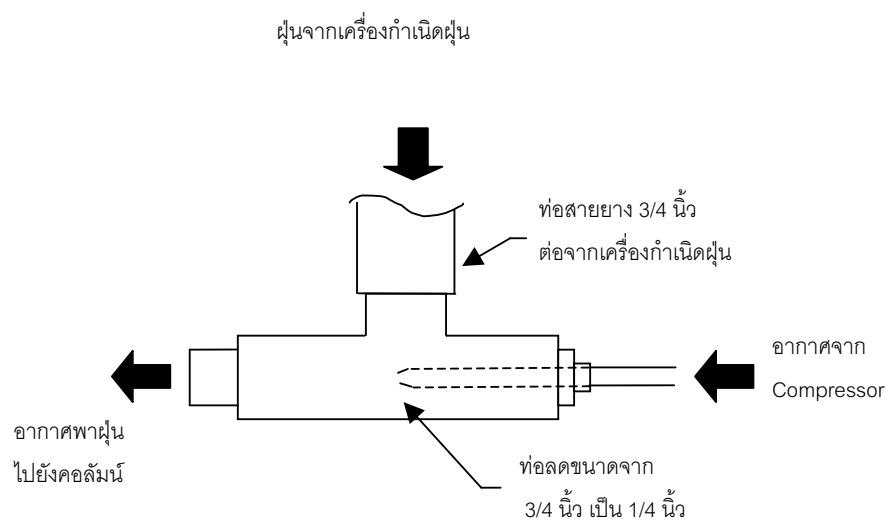
รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์สำหรับระบบการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

2.3.1 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น (Dust generator)

ในการผลิตเครื่องกำเนิดฝุ่นนี้ จะใช้อากาศจาก Compressor เป็นตัวพาฝุ่นเข้าสู่คอลัมน์ โดยเริ่มจากใช้ลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ต่อกับท่ออะคริลิกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม เพื่อเป็นตัวควบคุมการกระจายตัวของฝุ่น ต่อลำโพงเข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) และขยายความถี่ด้วยเครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ดังรูปที่ 2.2 ฝุ่นจะฟุ้งกระจายตัวตามการสั่นสะเทือนของลำโพงด้วยความถี่คงที่ เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ นิ้วที่ท่ออะคริลิก ที่ความสูง 15 ซม. ต่อท่อสายยางอีกด้านหนึ่งเข้ากับท่อสามทาง ซึ่งมีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ จาก $\frac{3}{4}$ นิ้ว เป็น $\frac{1}{4}$ นิ้ว เพื่อให้ลักษณะคล้ายกับ Venturi ฝุ่นที่ฟุ้งจากการสั่นของลำโพงจะถูกดูดเข้าสู่ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1\frac{1}{2}$ นิ้ว และนำฝุ่นเข้าสู่ส่วนล่างของคอลัมน์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น



รูปที่ 2.3 แสดงแบบและขนาดของท่อสามทางนำฝุ่นเข้าสู่คอลัมน์

2.3.2 ชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอน

ชุดผลิตฟองแก๊สแอฟรอนในการทดลองนี้สร้างตามแบบของ Felix Sebba คือเป็นแบบ Spinning disc โดยใช้ใบกวนด้วยความเร็วที่ 6000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอนแบบ Spinning disc

2.3.3 หอดักจับฝุ่น (Column)

คอลัมน์ดักจับฝุ่นถูกออกแบบให้สามารถถอดประกอบแยกเป็นส่วนๆ ได้ 5 ส่วนเพื่อศึกษาผลของความสูงที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น ทำจากท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 ซม. โดยแบ่งเป็นส่วนล่างคอลัมน์ ส่วนกลางคอลัมน์ซึ่งจะใช้ท่ออะคริลิกยาว 60 ซม. 2 ท่อนประกบกัน และส่วนยอดของคอลัมน์ยาว 100 ซม. ซึ่งจะต่อท่อสามทางให้ฟองแก๊สแอฟรอนไหลออกจากคอลัมน์ไปสู่ถังแยกขนาด 400 ลิตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 70 ซม. ความสูง 125 ซม. เพื่อแยกฟองแก๊สแอฟรอนและอากาศที่สะอาดออกจากกัน โดยกำหนดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างฝุ่น (Sampling port) ที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ ตามหลัก EPA วิธีที่ 1 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฝุ่นและประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นต่อไป

กระบวนการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจะเริ่มจากการป้อนฝุ่นเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ ผ่านตัวกระจายฝุ่น (Distributor) จากนั้นบีมฟองแก๊สแอฟรอนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ อากาศจะพาอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอนขึ้นไปสู่ยอดคอลัมน์พร้อมกัน โดยมีลักษณะการไหลอย่างต่อเนื่องแบบตามกัน (Co-current flow) ซึ่งทั้งแอฟรอนและอากาศจะไหลออกจากคอลัมน์ทางด้านบน ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงหอดักจับฝุ่นและถังแยกแอฟรอน

2.3.4 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น

การเก็บตัวอย่างฝุ่นจะอาศัยหลักการดูดอากาศจากแหล่งกำเนิดฝุ่นมาจำนวนหนึ่ง อนุภาคฝุ่นที่แขวนลอยมากับกระแสอากาศจะถูกกักเก็บไว้ในอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักและความเข้มข้นของฝุ่นได้ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ถูกดูดเข้ามา โดยขั้นแรกจะประกอบหัวเก็บตัวอย่าง (Nozzle) ที่ทำจากท่อสแตนเลสไม่มีตะเข็บ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ปลายฝุ่นเฉียงทำมุม 30 องศา ต่อเข้ากับอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder) ที่ทำหน้าที่ยึดกระดาดกรองสำหรับดักฝุ่นที่แขวนลอยกับอากาศ ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Rotameter) ที่อ่านสเกลในช่วง 240 – 2400 ลิตร/ชม. เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามหลัก Isokinetic จากนั้นต่อเข้ากับขวดรูปชมพู่ และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อดูดอากาศจากแหล่งกำเนิดฝุ่นเข้าสู่ Filter holder ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงหัวเก็บตัวอย่างฝุ่น (Nozzle) และอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)

2.4 วิธีการทดลอง

2.4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

- ผลของความถี่ของคลื่นเสียง, ความเร็วของอากาศและน้ำหนักร้อนเริ่มต้นที่มีต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

จัดชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นดังแสดงตามรูปที่ 2.1 โดยใช้คอลัมน์สูง 120 cm.

2.4.1.1 เติมฝุ่นขี้เถ้าลอย (Fly ash) ลงในชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น ที่น้ำหนัก 63 กรัม

2.4.1.2 ปรับความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s

2.4.1.3 เปิดเครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) โดยตั้งค่าความถี่เท่ากับ 16 Hz

2.4.1.4 เปิดเครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ด้วยค่าสูงสุด

2.4.1.5 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้เวลาในการเก็บตัวอย่างฝุ่น 2 นาที นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักฝุ่นและความเข้มข้นของฝุ่นพร้อมทั้งคำนวณค่า % Isokinetic

2.4.1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.4.1.1 – 2.4.1.5 แต่เปลี่ยนความถี่ที่ใช้จาก 16 Hz เป็น 18 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ

2.4.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.4.1.1 – 2.4.1.6 แต่เปลี่ยนความเร็วของอากาศจาก 6.0 m/s เป็น 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นจาก 63 กรัม เป็น 73 กรัมและ 83 กรัม ตามลำดับ

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่, อัตราการไหลของอากาศและ น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ใช้กับความเข้มข้นของฝุ่นที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ผลการ Calibrate ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้ากับตัวแปรต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

2.4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

2.4.2.1 เตรียมฟองแก๊สแอฟรอนโดยใช้สารลดแรงตึงผิว CTAB ความเข้มข้น 0.0264 mol/l กวนในเครื่องผลิตฟองแก๊สแอฟรอนด้วยความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2.4.2.2 ปรับความเร็วของอากาศเป็น 7.0 m/s เดินเครื่องอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นโดยกำหนดความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าคงที่ 0.2 g/m^3

2.4.2.3 เปิดเครื่องเพอร์ริสแตลติคปั๊ม ปั๊มฟองแก๊สแอฟรอนเข้าสู่หอดูดซับด้วยความเร็ว $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

2.4.2.4 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์เป็นเวลา 15 และ 30 นาที

2.4.2.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.4.2.1 – 2.4.2.4 แต่เปลี่ยนชนิดสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จาก CTAB เป็น SDS และ Triton X-100 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ตามลำดับ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นตามหัวข้อ 2.4.6.1 และหาความเสถียรของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดโดยวิเคราะห์ได้จากเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลวซึ่งมีปริมาตรของของเหลวเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรของเหลวเริ่มต้น (Half Life) ตามหัวข้อที่ 2.4.6.2

2.4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

2.4.3.1 ผลของความเร็วของอากาศ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 2.4.2 โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ได้จากการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนความเร็วของอากาศจาก 6.0 m/s เป็น 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคงที่ 0.2 g/m^3 และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 2.4.6.1

2.4.3.2 ผลของความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 2.4.2 โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ได้จากการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้าจาก 0.1 g/m^3 เป็น 0.2 g/m^3 และ 0.3 g/m^3 ตามลำดับ ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 2.4.6.1

2.4.3.3 ผลของความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 2.4.2 โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ได้จากการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนจาก $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ เป็น $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ตามลำดับ โดยเลือกใช้ความเร็วของอากาศและความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าที่ให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นสูงที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 2.4.6.1

2.4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

2.4.1.1 จัดชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นดังแสดงตามรูปที่ 2.1

2.4.1.2 เติมฝุ่นซีเถ้าลอย (Fly ash) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.81 μm ลงในชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น

2.4.1.3 ปรับความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s

2.4.1.4 เดินเครื่องอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นโดยกำหนดความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าคงที่ 0.1 g/m^3

2.4.1.5 เปิดเครื่องเพอร์ริสตัลติคปั๊ม ปั๊มฟองแก๊สแอฟรอนเข้าสู่หอดูดซับด้วยความเร็ว

$2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

2.4.1.6 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ที่เวลา 15 และ 30 นาที

2.4.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.4.1.1 – 2.4.1.6 แต่เปลี่ยนขนาดของอนุภาคฝุ่นเป็น 13.3 m และ 22.5 m ตามลำดับ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคฝุ่นที่มีต่อการดักจับฝุ่นตามหัวข้อ 2.4.6.1

2.4.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 2.4.4 แต่เปลี่ยนชนิดของฝุ่นจาก Fly ash เป็น PVC resin และ Wheat flour ตามลำดับ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 2.4.6.1

2.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.4.6.1 ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

วิเคราะห์ผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1[5]

$$\eta_o = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (2.1)$$

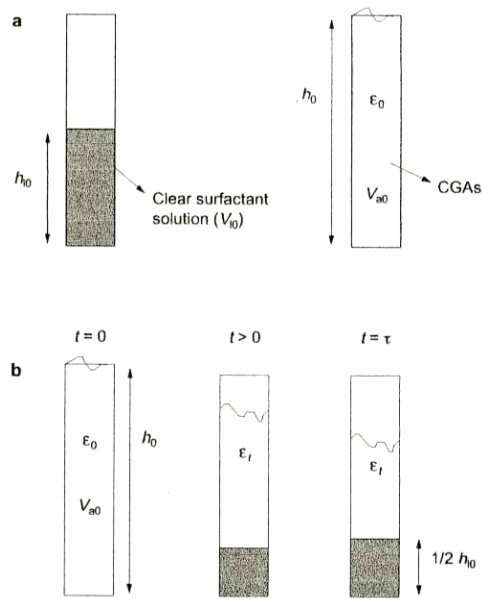
โดยที่ η_o = ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่น

C_i = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า (g/m^3)

C_o = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางออก (g/m^3)

2.4.3.6 การหาครึ่งชีวิตของฟองแก๊สแอฟรอน

ในการหาความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอนจากสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ในการทดลองตอนที่ 2.4.2 สามารถเตรียมการทดลองได้ดังนี้คือ เตรียมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100, CTAB และ SDS ความเข้มข้นเท่ากับ 25.6×10^{-3} mol จำนวน 1 ลิตร จากนั้นกวนสารละลายด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ 6000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที ป้อนฟองแก๊สแอฟรอนใส่กระบอกตวงขนาด 100 ml ตรวจสอบความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอน โดยจับเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลว โดยมีระดับความสูงของสารละลายเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความสูงเริ่มต้น (Half Life) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการหาค่าความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอน

2.4.7 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคฝุ่นที่ทางเข้า

2.4.7.1 ร่อนคัดขนาดอนุภาคฝุ่นที่ต้องการทดลองด้วยเครื่อง Sieve Shaker ให้มีขนาดต่างๆ กัน

2.4.7.2 ต่อก่อสายยางจากจุดเก็บตัวอย่างเข้าไปยังกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ซึ่งบรรจุน้ำ D.I ปริมาตร 800 ml.

2.4.7.3 นำฝุ่นที่ต้องการทดลองใส่ในเครื่องกำเนิดฝุ่น เปิดคอมเพรสเซอร์ที่ความเร็วลม 6.0 m/s เปิดอุปกรณ์เครื่องกำเนิดฝุ่น ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นเป็นเวลา 30 นาที อนุภาคฝุ่นจะถูกพาไปยังกระบอกตวงและถูกเก็บอยู่ในน้ำ D.I.

2.4.7.4 นำตัวอย่างฝุ่นที่เก็บได้ในน้ำไปวัดขนาด ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

2.4.7.5 หากยังไม่ได้ขนาดฝุ่นที่ต้องการ ให้ลดขนาดของอนุภาคฝุ่นด้วยเครื่องบด Ball mill จนกระทั่งได้ขนาดตามต้องการ

2.5 วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่น[5]

2.5.1 อบกระดาดษกรองเบอร์ GF/F ที่อุณหภูมิ 100 – 110 °C เป็นเวลา 2-3 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ส้ารวจความเรียบร้อยของกระดาดษกรองไม่ให้มีรอยแตกหรือชำรุด

2.5.2 ชั่งน้ำหนักกระดาดษกรองให้ได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง โดยในการชั่งไม่ควรให้กระดาดษกรองสัมผัสอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเกิน 50 % นานเกิน 2 นาที

2.5.3 ทดสอบหาปริมาณการรั่วของเครื่องมือเก็บตัวอย่างก่อนดำเนินการ โดยปิดจุกที่หัวเก็บตัวอย่าง ปิดปั้มดูดอากาศ ปริมาตรอากาศที่เก็บได้จะต้องน้อยกว่า 34.2 ลิตร/ชม. ถ้ามากกว่าแสดงว่าชุดเก็บตัวอย่างมีรอยรั่ว จะต้องทำการแก้ไขรอยรั่วเสียก่อน

2.5.4 ใช้ปากคีบคีบกระดาดษกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)

2.5.5 ทำการเก็บตัวอย่างโดยสอดหัวเก็บตัวอย่างเข้าไปในท่อที่จุดเก็บตัวอย่าง หันหัวเก็บตัวอย่างเข้าหากระแสนอากาศ โดยต้องปิดช่องด้านข้างไม่ให้มีรอยรั่วเพื่อป้องกันอากาศและฝุ่นจากภายนอกไหลเข้าไปด้านใน

2.5.6 เปิดปั้มสุญญากาศ เป็นเวลา 2 นาที พร้อมกับปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตาม Isokinetic

2.5.7 เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเสร็จแล้วให้นำหัวเก็บตัวอย่างออกมา ระวังฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่างหลุดออกมา ถอดชุด Filter holder ออก ใช้ปากคีบคีบกระดาดษกรองเก็บไว้ในจานเพาะเชื้อรวมทั้งชุดฝุ่นที่เกาะอยู่ภายใน Filter holder ลงไปด้วย

2.5.8 ล้างฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่างด้วยอะซีโตนจนได้อะซีโตนใสออกมา

2.5.9 นำกระดาดษกรองที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100-110 °C เป็นเวลา 2-3 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาดษกรองให้ได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง โดยน้ำหนักกระดาดษกรองหลังการเก็บตัวอย่างฝุ่นลบด้วยน้ำหนักกระดาดษกรองเริ่มต้นจะได้น้ำหนักของตัวอย่างฝุ่นที่เก็บได้

2.5.10 ระบายอะซีโตนที่ใช้ล้างฝุ่นในหัวเก็บตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักหาปริมาณฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่าง

2.5.11 คำนวณหา % Isokinetic ถ้าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 10\%$ จะยอมรับผลการเก็บตัวอย่างนี้ แต่ถ้าคลาดเคลื่อนมากกว่า $\pm 10\%$ จะต้องเริ่มทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นใหม่

2.5.12 ผลรวมของน้ำหนักฝุ่นที่เก็บได้จากข้อ 2.5.9 และข้อ 2.5.10 จะเป็นน้ำหนักฝุ่นทั้งหมดที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง

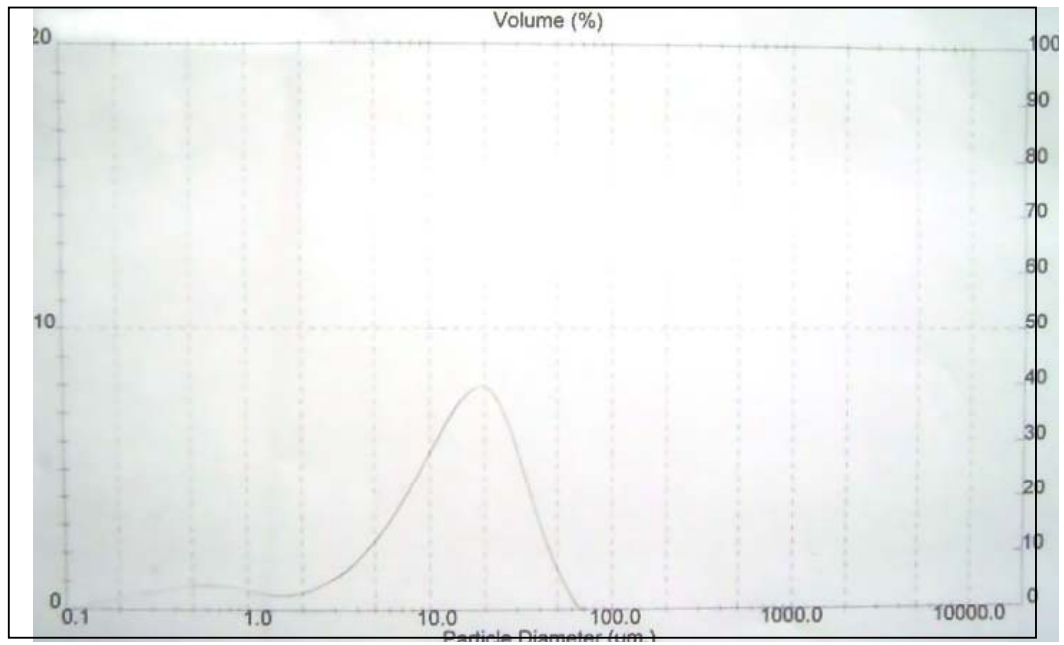
บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองในตอนที 2.4.1 – 2.4.3 จะใช้ Fly ash ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นตัวแทนของอนุภาคฝุ่นในอากาศ ซึ่งอนุภาคที่ใช้เป็นแบบ poly disperse โดยได้ทำการวัดขนาดอนุภาคฝุ่นและการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นด้วยเครื่อง particle size analysis พบว่าอนุภาคกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.12 – 52.68 μm และขนาดอนุภาคส่วนใหญ่คือ 15.97 μm ดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 โดยลักษณะอนุภาค fly ash มีลักษณะเป็นทรงกลม เมื่อถ่ายรูปด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 3.2 โดยทดลองเก็บตัวอย่างฝุ่นที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 20 นาที, 30 นาทีและ 40 นาทีตามลำดับ สร้างกราฟแสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เก็บได้ที่เวลาต่างๆกัน พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลา 0-30 นาทีและเมื่อดำเนินการทดลองต่อไปจนถึง 40 นาที พบว่าความเข้มข้นฝุ่นเริ่มลดลง ดังแสดงในกราฟที่ 3.3 เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบ Batch ซึ่งในระหว่างการทดลองไม่มีการเติมฝุ่นอีก ปริมาณฝุ่นจึงลดลงส่งผลให้ความเข้มข้นฝุ่นลดลงด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปของงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดลองจะดำเนินการทดลอง 30 นาทีต่อการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของฝุ่น (Fly ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

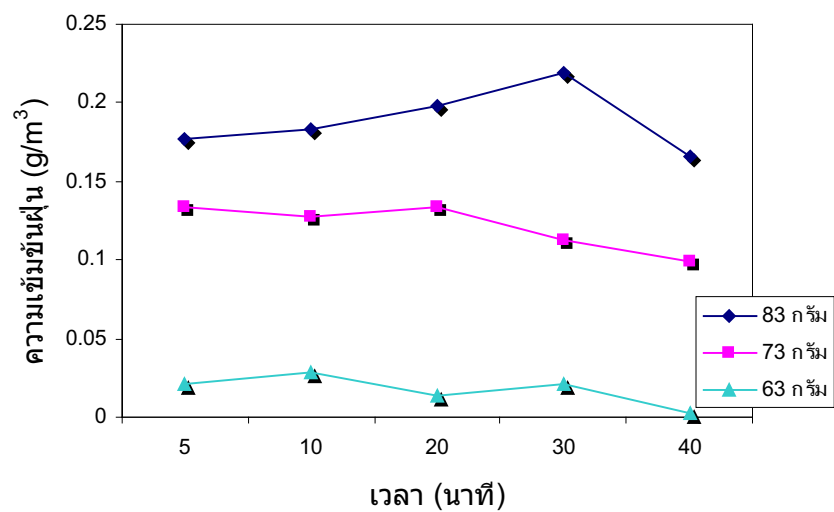
Range Lens: 45 mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler MS17	Obscuration: 16.0 %
Presentation: 20HD	(Particle R.I. = 1.5295, 0.1000)	Dispersant R.I. = 1.3300	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.227 %
Modifications: None			
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0132 %Vol	Density = 1.000 g / cub cm	Specific S.A. = 1.8837 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.64 um	D (v, 0.5) = 13.88 um	D (v, 0.9) = 32.36 um
D [4, 3] = 15.97 um	D [3, 2] = 3.19 um	Span = 2.214E+00	Uniformity = 6.698E-01
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.12	0.01
0.12	0.18	0.15	0.19
0.15	0.37	0.19	0.55
0.19	0.55	0.23	1.10
0.23	0.72	0.28	1.82
0.28	0.88	0.35	2.70
0.35	1.02	0.43	3.71
0.43	1.12	0.53	4.83
0.53	1.17	0.65	6.00
0.65	1.14	0.81	7.14
0.81	1.02	1.00	8.16
1.00	0.85	1.23	9.00
1.23	0.71	1.51	9.72
1.51	0.72	1.86	10.44
1.86	0.66	2.30	11.33
2.30	1.18	2.83	12.51
2.83	1.63	3.49	14.14
3.49	2.26	4.30	16.40
4.30	3.09	5.29	19.49
5.29	4.15	6.52	23.64
6.52	5.42	8.04	29.05
8.04	6.84	9.91	35.89
9.91	8.31	12.21	44.20
12.21	9.67	15.04	53.87
15.04	10.63	18.54	64.50
18.54	10.76	22.84	75.25
22.84	9.59	28.15	84.84
28.15	7.30	34.69	92.14
34.69	4.65	42.75	96.79
42.75	2.42	52.68	99.22
52.68	0.78	64.92	99.99
64.92	0.00	80.00	100.00



รูปที่ 34.1 แสดงกราฟการกระจายตัวของอนุภาค Fly ash



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะอนุภาค Fly ash ด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 3.3 แสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s ความถี่ 16 Hz และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม

3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

การทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นฝุ่นสามารถแบ่งได้ 3 ตัวแปร คือ ความถี่ของคลื่นเสียง, ความเร็วของอากาศ และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น การทดลองในตอนนี้จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทั้ง 3 ตัวแปรเพื่อนำมาใช้ในการ Calibrate ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าเบื้องต้นสำหรับการทดลองขั้นต่อไป โดยความถี่ของคลื่นเสียงที่ใช้เท่ากับ 16 Hz, 18 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มหรือลดความถี่ต่างจากช่วงนี้ พบว่าลำโพงไม่สามารถสั่นสะเทือนจนส่งให้ฝุ่นฟุ้งได้ ความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นคือ 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.2 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าได้ดังนี้

- ผลของความถี่ของคลื่นเสียง จากตารางที่ 3.2 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นที่เก็บได้กับความถี่และความเร็วของอากาศที่เปลี่ยนไปที่น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นคงที่ 73 กรัม ดังกราฟที่ 3.4 พบว่าเมื่อความถี่ของคลื่นเสียงเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นฝุ่นที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศที่พาฝุ่นเข้าคอลัมน์ เนื่องจากอัตราการสั่นของลำโพงจากการเปลี่ยนแปลงความถี่คลื่นเสียงมีผลต่อการฟุ้งของฝุ่นน้อยมาก ดังนั้นความถี่ของคลื่นเสียงจึงไม่มีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า

- ผลของความเร็วของอากาศ จากกราฟที่ 3.5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศมากขึ้น จะส่งผลให้ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้ามากขึ้นไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจะส่งผลให้ลมดูดที่ท่อสามทางพาฝุ่นเข้าคอลัมน์ได้มากขึ้น ความเข้มข้นฝุ่นจึงเพิ่มขึ้น

- ผลของน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น จากตารางที่ 3.2 พบว่าเมื่อน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเข้มข้นฝุ่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มน้ำหนักฝุ่นหรือปริมาณฝุ่นเริ่มต้น ทำให้สัดส่วนของฝุ่นที่ถูกสั่นจนฟุ้งขึ้นมาและถูกพาเข้าคอลัมน์มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่น้อยกว่า ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าจึงมากขึ้น

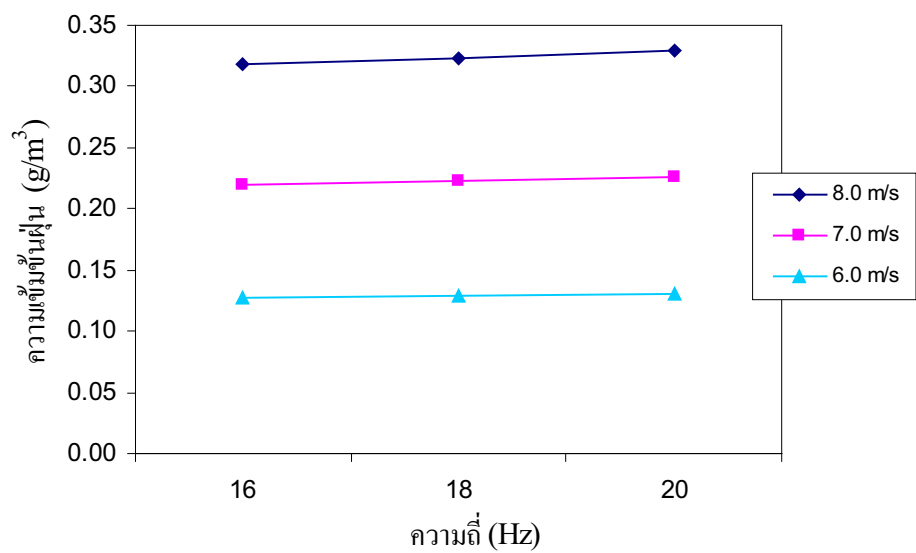
ตารางที่ 3.3 แสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เปลี่ยนไปเมื่อน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเปลี่ยนไป ที่ความถี่คงที่ 20 Hz และสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 3.6 โดยพบว่าความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าจะมีค่าอยู่ในช่วง $0.02 \pm 0.002 \text{ g/m}^3$ ถึง $0.4 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$ และจากผลการทดลองที่สรุปได้ว่า ความถี่ของคลื่นเสียงไม่มีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นทางเข้า ดังนั้นในการปรับค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าสำหรับการทดลองตอนต่อไปจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเท่านั้น โดยในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าที่ $0.1 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$, $0.2 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$ และ $0.3 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ความถี่, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่น เริ่มต้นที่ค่าต่างๆ

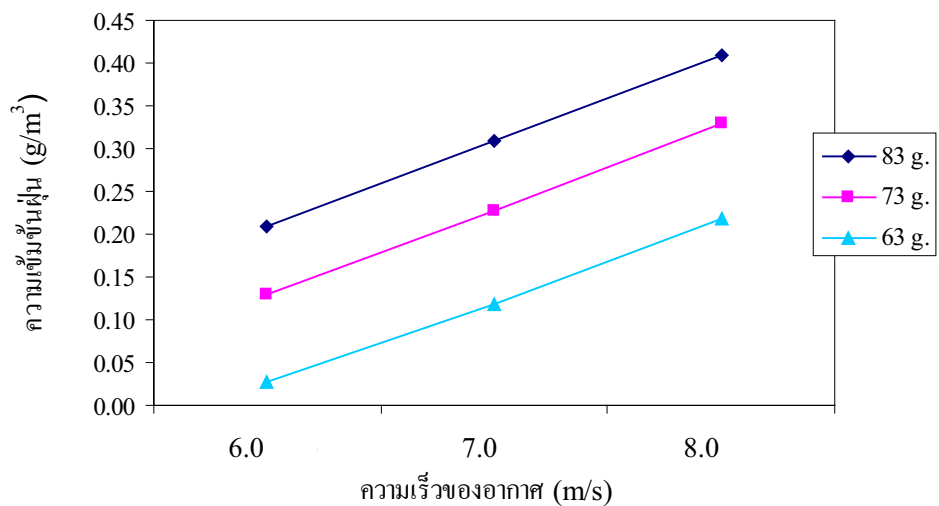
น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเร็วของอากาศ (m/s)	ความถี่ (Hz)		
		16	18	20
63	6.0	0.0212	0.0229	0.0282
	7.0	0.1000	0.1150	0.1183
	8.0	0.2082	0.2128	0.2173
73	6.0	0.1271	0.1288	0.1306
	7.0	0.2200	0.2233	0.2267
	8.0	0.3184	0.3230	0.3291
83	6.0	0.1941	0.2029	0.2082
	7.0	0.3050	0.3067	0.3100
	8.0	0.3888	0.4056	0.4102

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ได้จากการ Calibrate เบื้องต้น เพื่อใช้ในการ ทดลองต่อไป ที่ความถี่คงที่ 20 Hz

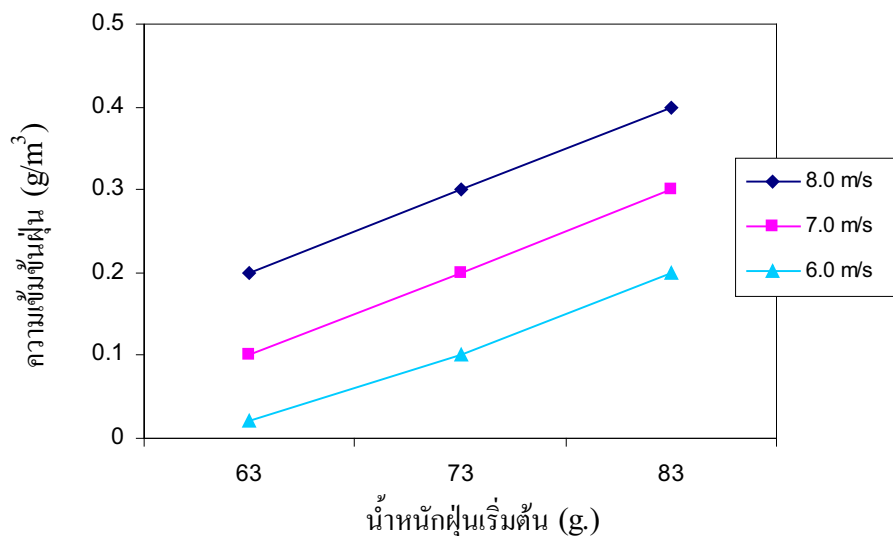
ความเร็วของอากาศ (m/s)	น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น (กรัม)		
	63	73	83
6.0	0.020 ± 0.002	0.10 ± 0.02	0.20 ± 0.02
7.0	0.10 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.30 ± 0.02
8.0	0.20 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.40 ± 0.02



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มข้นฝุ่น ที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 73 กรัม



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศและความเข้มข้นฝุ่น ที่น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ความถี่ 20 Hz.

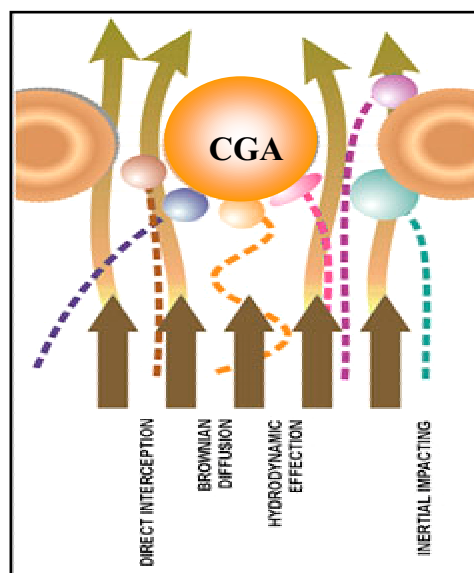


รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ที่ความถี่คงที่ 20 Hz

3.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น ด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

การทดลองในตอนนี้จะศึกษาถึงชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการผลิตฟองแก๊สแอฟรอนที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้มี 3 ชนิด คือแรงตึงผิวชนิด Anionic (SDS) สารลดแรงตึงผิวชนิด Cationic (CTAB) และสารลดแรงตึงผิวชนิด Non-ionic (Triton X-100) ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol ทำการทดลองที่ความถี่คงที่ 20 Hz ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.2 g/m^3 และความเร็วของแอฟรอนเท่ากับ $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อชนิดของสารลดแรงตึงผิวเปลี่ยนไป ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นค่อนข้างใกล้เคียงกันคือประมาณ 76.32%, 74.41% และ 74.94% สำหรับ Triton X-100, CTAB และ SDS ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 71 - 78% แสดงว่ากลไกการจับอนุภาคฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนไม่ได้ขึ้นอยู่กับกลไกแบบผลของไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic effect) เป็นหลักเพียงอย่างเดียว โดยอาจมีกลไกแบบอื่นที่มีอิทธิพลมากกว่าผลของไฟฟ้าสถิตย์ร่วมด้วย ได้แก่ กลไกการสกัดโดยตรง (Direct interception) ระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอน และกลไก Inertia impacting [12] ระหว่างฝุ่นและของเหลว, กลไกการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และอิทธิพลของไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic effect) ซึ่งสามารถนำมาอธิบายลักษณะของกลไกต่างๆ ได้ดังนี้ [18]

- กลไกแบบ Direct interception มีลักษณะคือ อนุภาคฝุ่นจะเคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศ เมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอน อนุภาคฝุ่นจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของฟองแก๊สแอฟรอนและถูกพาออกจากคอลัมน์พร้อมฟองแก๊สแอฟรอน โดยจะเกิดการจับได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอนุภาคฝุ่นต้องอยู่ภายในช่วงรัศมีของฟองแก๊สแอฟรอน
- กลไกแบบ Inertial impacting มีลักษณะคือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นจะไม่เท่ากับ ความหนาแน่นของฟองแก๊สแอฟรอน โดยจะมากกว่าฟองแก๊สแอฟรอน และไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศซึ่งอนุภาคอาจพุ่งไปติดที่ด้านอีกด้านหนึ่งของฟองแก๊สได้ ซึ่งเมื่อฝุ่นมีขนาดใหญ่เมื่อรวมตัวกับฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดการจับตัวกัน ทำให้อนุภาคฝุ่นจะมีน้ำหนักมากขึ้นส่วนฟองแก๊สแอฟรอนจะแตกออกและตกลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์พร้อมกัน
- กลไก Brownian diffusion กลไกแบบนี้จะเกิดกับฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ ไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศและมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ random ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากนี้ อาจถูกอากาศพาออกไปจากคอลัมน์ก่อนที่จะมีการสัมผัสกับฟองแก๊สแอฟรอนได้อย่างเต็มที่ ขณะที่ภายในคอลัมน์เกิด Channeling effect จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นขนาดเล็กมีค่าลดลง
- กลไกแบบ Hydrodynamic effect โดยกลไกลักษณะการจับแบบนี้จะเกิดกับอนุภาคที่มีลักษณะการไหลไม่แน่นอน ไม่ไหลไปตามกระแสอากาศ อาจเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของฟองแก๊ส และอนุภาคไม่เป็นทรงกลม



รูปที่ 3.7 แสดงกลไกการจับฝุ่นฟองแก๊สแอฟรอน

เมื่อศึกษาถึงความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอนแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเสถียรได้จากเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลวซึ่งมีปริมาตรของของเหลวเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรของเหลวเริ่มต้น (Half Life) ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol เท่ากันพบว่า สารลดแรงตึงผิวชนิด SDS มีความเสถียรมากที่สุด คือมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.50 นาที รองลงมาคือ Titron X-100 และ CTAB ที่มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.07 และ 2.00 นาทีตามลำดับดังตารางที่ 3.6 และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 20x ภายในระยะเวลาไม่เกิน 3 นาทีหลังจากการกวนดังรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า ขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนที่ใช้สารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด มีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือประมาณ 75-90 μm และเมื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด พบว่า CTAB ที่มีประจุเป็นบวกมีเสถียรภาพต่ำที่สุด

แต่จากผลการทดลองที่แสดงว่าชนิดของสารลดแรงตึงผิวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน โดยอิทธิพลของกลไกการชนระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอนมีมากกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Non-ionic หรือ Titron X-100 มาใช้ผลิตฟองแก๊สแอฟรอนเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ในตอนต่อไป

ตารางที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS, Titron X-100 และ CTAB เปรียบเทียบกัน

ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	Titron X-100			CTAB			SDS		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
15	0.1898	0.0429	77.42	0.2571	0.0735	71.43	0.1959	0.0429	78.13
30	0.1837	0.0496	73.00	0.1531	0.0367	76.00	0.1714	0.0490	71.43
เฉลี่ย			75.21			73.71			74.78

ครั้งที่ 2

เวลา (นาที่)	Titron X-100			CTAB			SDS		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
15	0.1800	0.0398	77.89	0.2267	0.0593	73.84	0.1988	0.0482	75.76
30	0.2154	0.0496	76.97	0.2200	0.0602	72.62	0.1918	0.0490	74.46
เฉลี่ย			77.43			75.11			75.11

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS, Titron X-100 และ CTAB เปรียบเทียบกัน

ครั้งที่	Titron X-100	CTAB	SDS
1	75.21	73.71	74.78
2	77.43	75.11	75.11
เฉลี่ย	76.32	74.41	74.94

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าครึ่งชีวิต (Half life) ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด

ครั้งที่	Half life (min)		
	SDS	Titron X-100	CTAB
1	3.30	3.11	2.16
2	3.40	3.09	1.97
3	3.79	3.02	1.86
เฉลี่ย	3.50	3.07	2.00