

รายงานวิจัยแบบสมบูรณ์
เรื่อง

การแยกอนุภาคฝุ่นด้วยฟองก๊าซแอฟฟรอน

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันพะพานิชกุล และคณะฯ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน
ประจำปีงบประมาณ 2547

คำชี้แจงผลการประเมินรายงานความก้าวหน้า 6 เดือน

ชื่อโครงการ การแยกอนุภาคฝุ่นด้วยฟองก๊าซแอมโฟรอน

คำชี้แจง

ตามที่ผู้ประเมินได้เสนอแนะให้ผู้วิจัยเพิ่มเติมคำอธิบายผลการทดลองนั้น ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการเพิ่มเติมคำอธิบายผลการทดลองแล้วใน ว่างรายงานฉบับสมบูรณ์



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

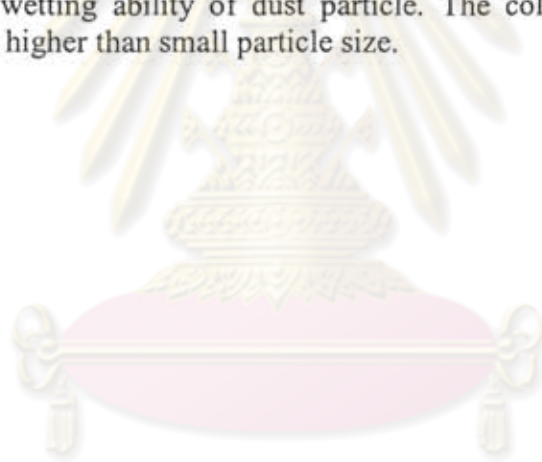
บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ได้มีการนำหอดูดจับมาใช้ในกระบวนการแยกสารทางวิศวกรรมเคมีอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและให้ประโยชน์มากมาย เทคนิคการแยกสารด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งถูกนำมาใช้ เนื่องจากสามารถแยกได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นในการดูดซับสารที่อยู่ในรูปของเหลว ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้จะประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคฝุ่นออกจากกระแสก๊าซ ซึ่งถือเป็นมลภาวะทางอากาศ ภายในหอดูดจับ โดยมีฟองแก๊สแอฟรอนเป็นตัวกลางในการดักจับฝุ่น โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น ได้แก่ ชนิดของสารลดแรงตึงผิว, ความเร็วของอากาศ, ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน, ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า, ชนิดและขนาดของฝุ่นที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ จากผลการทดลองพบว่าชนิดของสารลดแรงตึงผิวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น โดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอน ดังนั้นกลไกการแยกน่าจะเป็นการชนแล้วยึดติดกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับผิวฟองแก๊สแอฟรอน ส่วนผลการทดลองผลของสภาวะการดำเนินการพบว่า ประสิทธิภาพการดักจับจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศลดลงและความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าลดลง ส่วนชนิดของฝุ่นพบว่าลักษณะรูปร่างของฝุ่นมีอิทธิพลมากกว่าคุณลักษณะของพื้นผิวในเชิงความสามารถในการเปียกน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร จะมีประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อเทียบกับความสามารถในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่กว่าเล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

Separation column are being widely used in separation process for its advantage and simplicity, separation technique by using colloidal gas aphon is a high potential technique for dust removal. In the past, colloidal gas aphon have been used to separate the compounds in liquid phase, so this paper reported into dust collection in present air pollutants in separation column and using colloidal gas aphon as the medium to separate dust. In this study, the effect of surfactant type, dust concentration, air flow rate, CGA flow rate, dust type and size on collection efficiency was investigated. Moreover, the mechanism of collection was also determined. 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. It was found that the type of surfactant did not affect on the collection efficiency. CGA could separate dust particle from air by adhesion force. The collection efficiency increased with increasing of CGA flow rate whereas it decreased with increasing of air flow rate and dust concentration. The shape of particle was more influence on the efficiency than wetting ability of dust particle. The collection efficiency of large particle size was higher than small particle size.



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน ประจำปีงบประมาณ 2547 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณ อ.ละเอียด เพ็งโสภา, คุณอ่อนสา นนท์พละ และคุณประภาส คุณนาม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความสะดวกในด้านสถานที่, อุปกรณ์ และสารเคมี ที่ใช้ในการทดลองมาโดยตลอด และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิเคราะห์ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ รวมทั้ง บริษัท วินีไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์ผงพีวีซี เรซิน เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่วิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 สารลดแรงตึงผิว	4
2.1.1 โครงสร้างและลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิว	4
2.1.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว	6
2.1.3 การเลือกชนิดของสารลดแรงตึงผิว	7
2.2 แอฟรอน (Aphron)	7
2.2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของแอฟรอน	7
2.2.2 การเกิดฟองแก๊สแอฟรอน (Gas Aphron Foaming)	9
2.2.3 โครงสร้างของแก๊สแอฟรอนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยก	9
2.2.4 การกลายเป็น Creaming ของแก๊สแอฟรอน	10
2.3 เครื่องผลิตแอฟรอน	11
2.4 นิยามและประเภทของฟุ้ง	12

2.4.1 ประเภทของฝุ่น	13
2.5 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง	14
2.5.1 จากแหล่งธรรมชาติ	14
2.5.2 จากแหล่งชุมชน	15
2.5.3 จากแหล่งการค้า	15
2.5.4 จากแหล่งกิจกรรม	16
2.5.5 จากแหล่งการขนส่งหรือแหล่งการเคลื่อนที่	16
2.5.6 จากแหล่งกำเนิดทางอุตสาหกรรม	16
2.6 ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นละอองต่อสิ่งแวดล้อม	17
2.6.1 ผลกระทบต่อวัตถุ	17
2.6.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ	18
2.6.3 ผลกระทบต่อพฤษาชาติ	19
2.6.4 ผลกระทบต่ออูดุนิยมวิทยา	19
2.6.5 ผลในการลดสภาพการมองเห็น	19
2.6.6 ผลกระทบกับปฏิกิริยาเรือนกระจก	20
2.7 การควบคุมฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดประเภทอยู่กับที่	20
2.7.1 การชำระล้างโดยธรรมชาติ	20
2.7.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศ และมาตรฐานการปล่อยอนุภาคฝุ่น	21
2.7.3 การควบคุมที่จุดกำเนิด	21
2.7.4 อุปกรณ์การควบคุมฝุ่นละออง	22
บทที่ 3 การดำเนินการทดลองการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	28
3.2 สารเคมี	28
3.3 ชุดอุปกรณ์การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	29
3.3.1 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น (Dust generator)	30
3.3.2 ชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอน	31
3.3.3 หอดักจับฝุ่น (Column)	32
3.3.4 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น	33
3.4 วิธีการทดลอง	33
3.4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า	33
3.4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพ	34

การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	
3.4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	34
3.4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	35
การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	
3.4.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	36
3.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	36
3.4.7 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคฝุ่นที่ทางเข้า	37
3.5 วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่น	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	38
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า	40
4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	43
4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	49
4.3.1 ผลของความเร็วของอากาศ	49
4.3.2 ผลของความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า	49
4.3.3 ผลของความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน	50
4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	55
4.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	58
4.6 การเปรียบเทียบเครื่องดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนและเครื่องดักจับฝุ่นชนิดอื่น	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	71
5.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า	71
5.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	72
5.3 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	72
5.4 ผลของขนาดอนุภาคฝุ่น	72
5.5 ผลของชนิดของฝุ่น	72
เอกสารอ้างอิง	73

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 นิยามของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ	12
2.2 แสดงช่วงขนาดของอนุภาคมีรูปร่างไม่แน่นอน	14
2.3 แสดงมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ	15
2.4 การปล่อยฝุ่นละอองจากกระบวนการต่างๆ	17
2.5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องจับฝุ่นชนิดต่างๆ	26
2.6 ตัวอย่างแสดงการเลือกใช้เครื่องดักจับให้เหมาะสมกับลักษณะของฝุ่น	27
4.1 แสดงขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของฝุ่น (Fly ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง	38
4.2 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ความถี่, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่น เริ่มต้นที่ค่าต่างๆ	41
4.3 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ได้จากการ Calibrate เบื้องต้น เพื่อใช้ในการ ทดลองต่อไป ที่ความถี่คงที่ 20 Hz	42
4.4 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS, Titron X-100 และ CTAB เปรียบเทียบกัน	46
4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS, Titron X-100 และ CTAB เปรียบเทียบกัน	46
4.6 แสดงค่าครึ่งชีวิต (Half life) ของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด	47
4.7 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของอากาศ ที่ความเข้มข้นฝุ่น $0.2 g/m^3$ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} m/s$	50
4.8 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของอากาศ ที่ความเข้มข้นฝุ่น $0.2 g/m^3$ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} m/s$	51
4.9 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า ที่ความเร็วของ อากาศ $7.0 m/s$ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} m/s$	51
4.10 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า ที่ความเร็วของ อากาศ $7.0 m/s$ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} m/s$	52
4.11 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน	52

ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m ³	
4.12 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน	53
ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.2 g/m ³	
4.13 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนขนาดของฝุ่น(Fly ash) ที่ความเข้มข้นฝุ่น	57
ที่ทางเข้า 0.1 g/m ³ ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน	
2.82x10 ⁻³ m/s	
4.14 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนชนิดของฝุ่น ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่	66
ทางเข้า 0.1 g/m ³ ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน	
2.82x10 ⁻³ m/s	
4.15 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือจับฝุ่นชนิดต่างๆ กับการใช้ฟองแก๊สแอฟรอน	69



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 ลักษณะรูปแบบของ Surfactant ที่รวมตัวกันในสารละลาย	6
2.2 (ก) แสดงโครงสร้างของแอฟรอน, (ข) ลักษณะฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 20X	8
2.3 แสดงการเกิดฟองแก๊สแอฟรอน	9
2.4 แสดงโครงสร้างระดับโมเลกุลของแก๊สแอฟรอน	10
2.5 แสดงเครื่องผลิตแอฟรอนแบบ Spinning Disc	11
2.6 อวัยวะภายในที่อาจได้รับผลกระทบ	18
3.1 แสดงอุปกรณ์สำหรับระบบการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน	29
3.2 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น	30
3.3 แสดงแบบและขนาดของท่อสามทางนำฝุ่นเข้าสู่คอลัมน์	31
3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอนแบบ Spinning disc	31
3.5 แสดงหอดักจับฝุ่นและถังแยกแอฟรอน	32
3.6 แสดงหัวเก็บตัวอย่างฝุ่น (Nozzle) และอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)	33
3.7 แสดงการหาค่าความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอน	37
4.1 แสดงกราฟการกระจายตัวของอนุภาค Fly ash	39
4.2 แสดงลักษณะอนุภาค Fly ash ด้วยเครื่อง SEM	39
4.3 แสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s ความถี่ 16 Hz และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม	40
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มข้นฝุ่น ที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 73 กรัม	42
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศและความเข้มข้นฝุ่น ที่น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ความถี่ 20 Hz..	43
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ที่ความถี่คงที่ 20 Hz	43
4.7 แสดงกลไกการจับฝุ่นฟองแก๊สแอฟรอน	45
4.8 แสดงขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว (ก) Titron X-100, (ข) CTAB และ (ค) SDS ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 20X	48

4.9 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อความเร็วของอากาศต่างๆ ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.2 g/m^3 ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	53
4.10 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าต่างๆ ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	54
4.11 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนที่ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนต่างๆ ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3 และ 0.2 g/m^3	54
4.12 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Fly ash ขนาดต่างๆ ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000	56
4.13 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนขนาดอนุภาคฝุ่น (Fly ash) ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	56
4.14 (ก) Fly ash, (ข) PVC resin และ (ค) Wheat flour	59
4.15 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Fly ash เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000	60
4.16 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ PVC เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000	61
4.17 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Wheat flour เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000	62
4.18 แสดงกราฟการเปรียบเทียบกระจายอนุภาคระหว่าง Fly ash, PVC และ Wheat flour เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000	63
4.19 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ Fly ash เมื่อวัดด้วยเครื่อง Zeta potential	63
4.20 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ PVC เมื่อวัดด้วยเครื่อง Zeta potential	64
4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ Wheat flour เมื่อวัดด้วยเครื่อง Zeta potential	64
4.22 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนชนิดของฝุ่น ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	67
4.23 (ก) อนุภาค Fly ash (ข) อนุภาค Wheat flour และ (ค) PVC เมื่อถ่ายด้วยเครื่อง SEM	68

รายการสัญลักษณ์

C	=	ความเข้มข้นฝุ่น, g/m ³
C _i	=	ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า, g/m ³
C _o	=	ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางออก, g/m ³
D _p	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น, m
D _c	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์, m
G	=	แรงโน้มถ่วงโลก, m/s ²
H	=	ความสูงของคอลัมน์, m
Lp [*]	=	liquid property group $\left[\frac{\pi g D_c^3 \rho_L}{4 Q_L \mu_L} \right]$, dimensionless
Q _g	=	อัตราการไหลของอากาศที่เข้าไปในหัวเก็บตัวอย่าง, l/hr
Q _L	=	อัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอน, l/hr
Re _g	=	superficial gas Renolds number $\left[\frac{D_c V_g \rho_G}{\mu_G} \right]$, dimensionless
Re _L	=	superficial liquid Renolds number $\left[\frac{D_c V_L \rho_L}{\mu_L} \right]$, dimensionless
Sc	=	Schmidt number based of fly ash concentration $\left[\frac{\mu_L}{DF_i} \right]$, dimensionless
V	=	ปริมาตรของอากาศ, m ³
V _g	=	ความเร็วของอากาศในท่อ, m/s
V _L	=	ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน, m/s
V _n	=	ความเร็วของอากาศในหัวเก็บตัวอย่าง, m/s
η	=	ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น, %
μ _G	=	ความหนืดของอากาศ, g/m.s
μ _L	=	ความหนืดของฟองแก๊สแอฟรอน, g/m.s
ρ _G	=	ความหนาแน่นของอากาศ, g/m ³
ρ _L	=	ความหนาแน่นของฟองแก๊สแอฟรอน, g/m ³

ประมวลศัพท์และคำย่อ

g	=	dram/gauge
hr	=	hour
l	=	liter
cm	=	centimeter
cm ³	=	cubic centimeter
m	=	meter
m ³	=	cubic meter
s	=	second



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่วิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีกำลังพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สิ่งที่มาพร้อมกับความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและไม่อาจจะมองข้ามได้ก็คือปัญหาหลากหลายต่าง ๆ ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาหลากหลายทางอากาศที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้ การหลอมโลหะ การขุดเจาะ การกลึงและการขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดความรำคาญเดือดร้อนแก่ชุมชนใกล้เคียง รวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพและความเสียหายกับสภาพแวดล้อมด้วยการควบคุมที่ดีที่สุดคือการป้องกันไม่ให้เกิดฝุ่น แต่เมื่อเกิดมีฝุ่นขึ้นมาแล้วก็จำเป็นต้องหาวิธีกำจัดให้น้อยลง ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการแยกฝุ่นมีอยู่มากมาย เช่น เครื่องดักจับฝุ่นแบบไซโคลอน ห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง เครื่องกรอง เครื่องดักจับฝุ่นแบบเปียก หรือเครื่องแยกฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งเครื่องดักจับฝุ่นแต่ละประเภทมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซที่ต้องการแยก วัตถุประสงค์และความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น เครื่องดักจับฝุ่นแบบห้องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงและเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลอนจะให้ประสิทธิภาพต่ำในการแยกฝุ่นที่มีขนาดเล็ก เครื่องแยกฝุ่นชนิดเปียกจะมีปัญหาเกี่ยวกับตะกอนเปียกและใช้พลังงานสูงในการกระจายผิวหน้าของของเหลวให้สัมผัสกับฝุ่น หรือเครื่องแยกฝุ่นแบบเครื่องกรองจะมีปัญหาเกี่ยวกับความดันและจุดกรองตัน จึงได้มีการนำเทคนิคการแยกสารโดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอนมาประยุกต์ใช้ในการแยกฝุ่น เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถแยกสารที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ได้ รวมทั้งกำจัดได้ทั้งไอระเหยของก๊าซมลพิษและอนุภาคฝุ่นไปพร้อมกันได้ มีพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองก๊าซและสารที่ต้องการแยกสูง ลดปัญหาการอุดตันของตัวกลางและการหลุดกลับไปยังกระแสก๊าซของฝุ่น ขนาดเล็ก แรงดันทานต่ำ ใช้เนื้อที่น้อย สร้างประกอบง่าย และค่าใช้จ่ายการประกอบและการบำรุงรักษาต่ำ

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

กฎหมายกำหนดและเป็นไปตามมาตรฐาน EPA (Environmental Protection Agency) อีกด้วย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

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

1.2.2 ศึกษาสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่น ได้แก่ ความถี่, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหมักฝุ่นเริ่มต้น และหาสภาวะที่เหมาะสมของอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น

1.3.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

- สารลดแรงตึงผิวชนิด Anionic (SDS), สารลดแรงตึงผิวชนิด Cationic (CTAB) และสารลดแรงตึงผิวชนิด 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 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 13.308 μm

- อนุภาคในช่วง 6.763 – 78.842 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 22.567 μm

1.3.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

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

1.3.6 สร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการ ดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาเทคนิคใหม่ในการลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากฝุ่นได้

1.4.2 สามารถพัฒนาเทคนิคการดูดซับบนฟองแก๊สแอฟรอน ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการ
อื่นๆได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) [17]

Surfactant หรือสารลดแรงตึงผิว มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและในกระบวนการผลิต เนื่องจากสารดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับที่ผิวหน้าและลดแรงตึงผิว Surfactant จึงถูกเลือกให้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก, ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการกระจายตัวสำหรับ สังกะสีและเส้นใย, เชื้อกระดาษ, อุตสาหกรรมอาหาร, การผลิตและการสกัดสาร และอุตสาหกรรมเรซิน เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างและลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิว

Surfactant สามารถรวมตัวกันได้ด้วยตัวของมันเอง ซึ่งเป็นผลจาก dipole-dipole และแรงดึงดูดระหว่างไอออน Surfactant เป็น Amphiphilic molecule ซึ่งปลายข้างหนึ่งจะเป็น Nonpolar hydrophobic tail จะมีลักษณะเป็นไฮโดรคาร์บอนสายตรงหรือเป็นกิ่ง ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็น Polar hydrophilic group ซึ่งเป็นได้ทั้ง Nonionic หรือ Ionic สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม โครงสร้างที่ดึงดูดกับตัวทำละลายได้น้อยเรียกว่า หมู่ฟังก์ชันไลโอโฟบิก (Lipophobic Group) ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่ดึงดูดกับตัวทำละลายได้มากกว่าเรียกว่า หมู่ฟังก์ชันไลโอฟิลิก (Lipophilic Group) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โครงสร้างแอมฟิ-พาติก (Amphiphatic) เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวลงในตัวทำละลาย หมู่ฟังก์ชันไลโอฟิลิก ซึ่งอยู่ภายในตัวทำละลายจะทำให้ โครงสร้างของตัวทำละลายบิดเบี้ยวไปจากเดิม ทำให้พลังงานอิสระของระบบเพิ่มขึ้น ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โครงสร้างของน้ำถูกทำให้บิดเบี้ยวไปจากเดิมโดย หมู่ฟังก์ชันไลโอโฟบิกหรือที่เรียกว่าไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) และทำให้พลังงานอิสระของระบบเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการละลาย ซึ่งหมายความว่า การนำโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวไปยังผิวใช้งานน้อยกว่าการนำโมเลกุลของน้ำไปยังผิว ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวไปยังผิวจะมีจำนวนมาก ณ บริเวณผิว และเนื่องจากงานที่ใช้ในการนำโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวไปยังผิวมีค่าน้อยกว่าดังนั้นการที่มีสารลดแรงตึงผิวมาที่บริเวณผิวจึงลดงานในการสร้างพื้นที่จำนวนหนึ่งหน่วย (Surface Free Energy ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือแรงตึงผิว) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการมีหมู่ฟังก์ชันไลโอฟิลิก ช่วยไม่ให้สารลดแรงตึงผิวแยกออกไปเป็นอีกวัฏภาคหนึ่ง โครงสร้างแอมฟิพาติกไม่เพียงแต่ช่วยลดแรงตึงผิวเท่านั้นแต่ยังกำหนดทิศทางของ

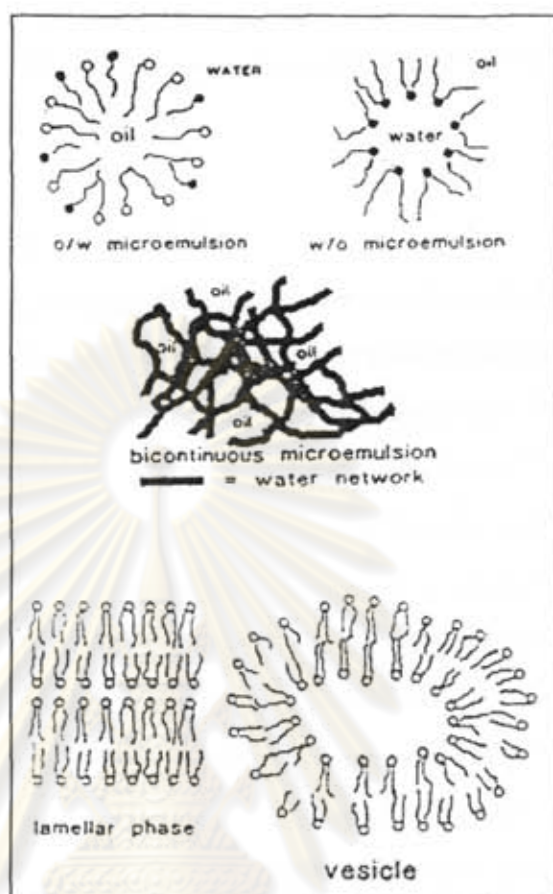
โมเลกุลซึ่งหมู่ฟังก์ชันไฮโดรฟิลิกจะอยู่ในวัฏภาคน้ำ ส่วนหมู่ฟังก์ชันไฮโดรโฟบิก จะหันไปอีกทางหนึ่ง

โครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เหมาะสมหรือไม่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวทำละลายและสภาวะที่ใช้ ถ้าตัวทำละลายที่ใช้มีความเป็นขั้วสูง ไฮโดรโฟบิกจะเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนหรือฟลูออ-โรคาร์บอน หรือ โซไซโลเซน (Siloxane Chain) ที่มีความยาวเหมาะสม ในตัวทำละลายที่มีขั้วน้ำจะเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮโดรโฟบิก หมู่ฟังก์ชันไฮโดรโฟบิกส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสายโซ่ที่ยาวและมีส่วนน้อยที่เป็นสารประกอบฮาโลเจนหรือไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบหรือโซไซโลเซน ส่วนหมู่ฟังก์ชันไฮโดรฟิลิกจะเป็นสารไอออนิกหรือพวกที่มีความเป็นขั้วสูง ประเภทของสารลดแรงตึงผิว สามารถแบ่งตามโครงสร้างของส่วน Hydrophilic ได้ดังนี้

1. Anionic surfactant: เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วน Hydrophilic เป็นประจุลบ เช่น Alkyl sulphates (ROSO_3^-), Soaps (ROO^-) เป็นต้น
2. Nonionic surfactant: เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วน hydrophilic ไม่มีประจุ เช่น Ethoxylated fatty alcohol ($\text{R}(\text{OC}_2\text{H}_4)_n\text{OH}$), Polyoxyethalated t-octylphenol (Triton x-100) เป็นต้น
3. Cationic surfactant: เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วน Hydrophilic เป็นประจุบวก เช่น Alkyl trimethyl ammonium salt ($\text{RN}^+(\text{CH}_3)_3$) เป็นต้น
4. Amphoteric surfactant : เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วน Hydrophilic เป็นทั้งประจุบวกและประจุลบ เช่น Alkylglycinates ($\text{RNH}_2^+\text{CH}_2\text{COO}^-$) เป็นต้น

การรวมตัวหรือรวมกลุ่มกันของโมเลกุล Surfactant สามารถเกิดเป็นโครงสร้างได้หลากหลายแบบ ประกอบด้วยโครงสร้างแบบ Micelles, โครงสร้างแบบ Inverted micelles, โครงสร้างแบบ Microemulsions, และโครงสร้างแบบ Lamellar ดังรูปที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปแบบของ Surfactant ที่รวมตัวกันในสารละลาย

2.1.2 การใช้สารลดแรงตึงผิว [13]

เนื่องจากประจุที่ผิวส่วนใหญ่เป็นประจุลบดังนั้นจึงต้องทำให้ผิวเป็นไฮโดรโฟบิกโดยการใช้สารลดแรงตึงผิวและควรใช้ประเภทที่มีประจุบวก สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้เกาะอยู่บนผิวโดยจะหันหัวไฮโดรโฟบิกออกจากผิวซึ่งเป็นการทำให้ผิวไล่น้ำออกไป แต่ถ้าเป็นไฮโดรฟิลิกซึ่งเปียกน้ำได้ไม่ควรใช้สารลดแรงตึงผิวที่เป็นประจุบวก

สำหรับสารประเภทไม่มีขั้วอาจหันหัวไฮโดรฟิลิกหรือไฮโดรโฟบิกเข้าหาผิวก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรรมชาติของผิว ในกรณีที่มีกลุ่มที่มีขั้วสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรฟิลิกหมู่ฟังก์ชันของสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับบนผิวโดยหันหัวไฮโดรฟิลิกไปยังผิวทำให้ผิวมีความเป็นไฮโดรโฟบิกมากขึ้น และถ้าสารลดแรงตึงผิวถูกดูดซับบนผิวโดยหันหัวไฮโดรโฟบิกไปยังผิวทำให้ผิวมีความเป็นไฮโดรฟิลิกมากขึ้นเช่นกัน

สารประเภทแอมโฟเทอริก (สวิตเตอร์เรียน) เป็นสารที่มีทั้งประจุบวกและลบดังนั้นจึงสามารถเกาะได้ทั้งผิวประจุบวกและประจุลบ โดยไม่ทำให้ประจุที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่การเกาะของประจุบวกบนผิวที่มีประจุลบจะลดประจุบนผิวหรืออาจเปลี่ยนประจุที่ผิวให้กลายเป็น

บวกรู้ได้ถ้ามีประจุบวกเป็นจำนวนมาก และถ้ามีประจุลบเป็นจำนวนมากอาจเกิดเหตุการณ์ทำนองเดียวกัน การดูดสารที่ไม่มีขั้วไว้บนผิวไม่มีผลต่อประจุนักแม้ว่าความหนาแน่นของประจุจะลดลงเมื่อชั้นที่ถูกดูดหนาขึ้นก็ตาม

2.1.3 การเลือกชนิดของสารลดแรงตึงผิว

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารลดแรงตึงผิวมีมากมายหลายชนิด ดังนั้นในการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดใดจึงดูจากราคาเป็นสำคัญ ควรเลือกสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีราคาไม่แพงและปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือการเลือกสารลดแรงตึงผิวชนิดใดจึงจะเหมาะกับงาน โดยจะต้องทำการทดลองโดยการทดสอบกับสารลดแรงตึงผิวหลายๆ ชนิด ดังนั้นจะเป็นต้องทราบลักษณะทางธรรมชาติ (คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี), ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ณบริเวณอินเทอร์เฟซในงานที่ต้องทำและบทบาทของสารลดแรงตึงผิวที่มีในปรากฏการณ์นั้นๆ, คุณสมบัติทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างต่างๆ กัน และความสัมพันธ์ของโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อพฤติกรรมของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อปรากฏการณ์นั้น ณ บริเวณอินเทอร์เฟซ

สารลดแรงตึงผิวมีความสำคัญมากในกระบวนการแยกสาร โดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอน เนื่องจากเหตุผลสำคัญอยู่ 2 ประการ ประการแรกคือสารลดแรงตึงผิวสามารถทำให้สารละลายกลายเป็นอนุภาคทรงกลมเล็กๆ ที่คงตัวอยู่ได้ ประการที่สองคือฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวเป็นผลทำให้เกิดการเกาะติดกันของอนุภาคบนฟองแก๊สแอฟรอน ดังนั้นการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวจึงขึ้นกับชนิดของสารที่ต้องการแยกและนอกจากนี้ชนิดของสารลดแรงตึงผิวยังมีผลต่อความเสถียรของฟองแอฟรอนอีกด้วย

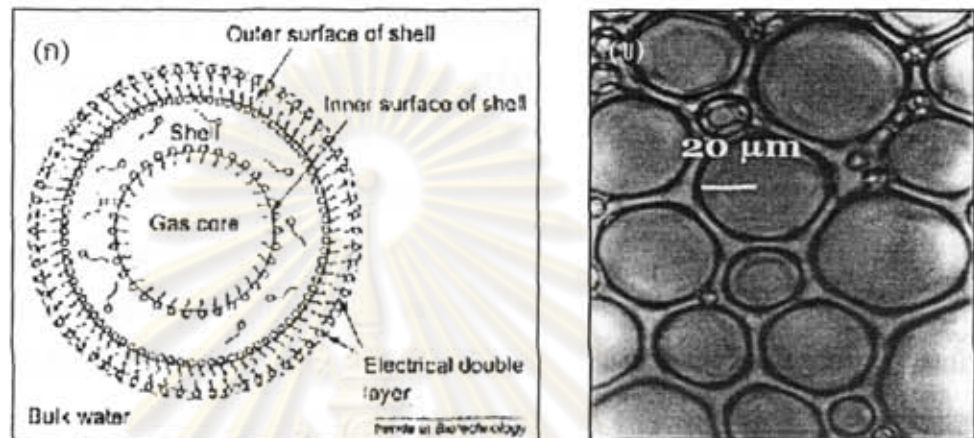
2.2 แอฟรอน (Aphron)

เมื่อประมาณปี 1972 Felix Sebba เป็นผู้ค้นพบและพัฒนาใช้ระบบคอลลอยด์ (Colloidal System) ที่รู้จักกันในนามของแอฟรอน (Aphrons) ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่สำหรับกระบวนการแยกสาร แอฟรอนเป็นอนุภาคทรงกลมเล็กๆ ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ด้วยฟิล์มสบู่ 2 ชั้น ฟิล์มสบู่บาง ๆ นี้สามารถทนแรงกดและการกระแทกได้เนื่องจากมีความยืดหยุ่น แอฟรอนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แก๊สแอฟรอน (Colloidal Gas Aphrons, CGA) และลิกวิดแอฟรอน (Colloidal Liquid Aphrons, CLA) โดยที่อนุภาคของแก๊สแอฟรอนเป็นฟองขนาดเล็กที่มีขนาดอยู่ในหน่วยไมโครเมตร ส่วนอนุภาคของลิกวิดแอฟรอนนั้นมีขนาดอยู่ในหน่วยที่เล็กกว่าไมโครเมตร

2.2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของแอฟรอน

แก๊สแอฟรอนหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไมโครโฟม (Microfoam) เป็นฟองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 - 100 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวในน้ำซึ่งมีลักษณะคล้ายโฟมที่มีเนื้อ

ละเอียด ฟองของแก๊สแอฟรอนเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นคอนลอยด์และมีความกลมมาก โดยฟองไม่เกาะกันหรือรวมตัวกัน ซึ่งฟองจะลอยตัวอย่างอิสระและแขวนลอยอยู่ในสารละลาย แก๊สแอฟรอนประกอบไปด้วย 65 เปอร์เซ็นต์เป็นแก๊สและสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่ใช้ในการผลิตแก๊สแอฟรอนใช้ได้ทั้งชนิด แอนไอออนิก (Anionic), แคทไอออนิก (Cationic) และนอนไอออนิก (Nonionic)



รูปที่ 2.2 (ก) แสดง โครงสร้างของแอฟรอน, (ข) ลักษณะฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 20X

การใช้แอฟรอนมีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการแยกสาร เช่น กระบวนการโฟลเตชัน (Flotation), กระบวนการสกัด (Extraction) ซึ่งจะใช้ฟองของแอฟรอนเป็นตัวจับอนุภาคของสารที่ต้องการแยกให้ลอยติดมากับฟอง แอฟรอนมีคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ประการในการใช้งานในกระบวนการแยกสาร

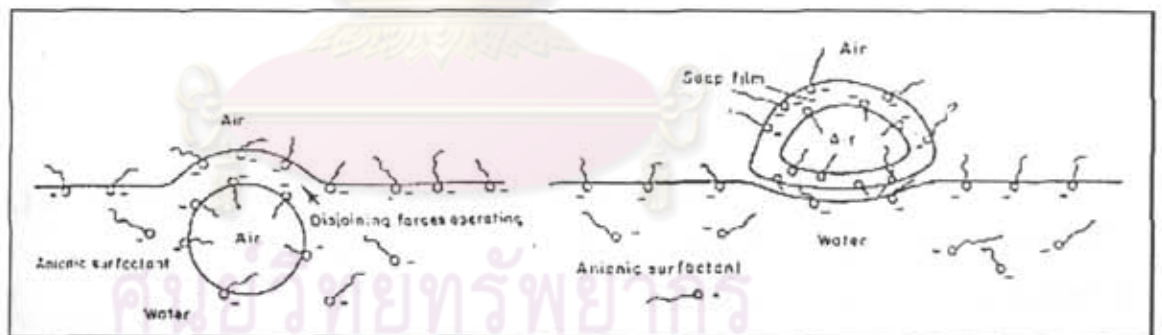
- แอฟรอนมีพื้นที่ผิว (Surface Area) ที่ใช้ในการจับมาก
- ฟองของแอฟรอนเคลื่อนที่ผ่านสารละลายได้อย่างรวดเร็ว มีแรงเฉือนและความหนืดต่ำ (Low-shear-rate viscosity)
- การนำฟองไปใช้สามารถดูจากแหล่งผลิตไปยังกระบวนการแยกได้ โดยที่ฟองของ แอฟรอนยังคงมีความเสถียรและคงรูปร่างเดิมอยู่

ฟองของแอฟรอนแตกต่างจากฟองสบู่ทั่วไป ที่ลักษณะโครงสร้างของฟองและคุณสมบัติการเป็นของไหล โดยที่ฟองสบู่มีฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวหุ้มอยู่ชั้นเดียว ฟองสบู่เหล่านี้จะเกาะกันและรวมตัวกันฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว มีผนังลามิลา (Lamellae) โดยผนังลามิลาของแต่ละฟองจะเชื่อมติดกันทำให้มีโครงสร้างเป็น โพลีฮีดรอล (Polyhedral) ส่วนแอฟรอนมีฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวหุ้มอยู่ 2 ชั้น ดังรูปที่ 2.2 (ก) ฟองของแอฟรอนแต่ละฟองมีความกลมมากและไม่เกาะติดกัน มีความเสถียรสูง แดกยาก ซึ่งจะเป็นลักษณะของฟองอย่างแท้จริง (True Bubble) และฟองของแอฟรอนยังมีคุณสมบัติของการเป็นของไหลอีกด้วย

2.2.2 การเกิดฟองแก๊สแอฟรอน (Gas Aphrons Foaming)

ในการเกิดฟองมีข้อกำหนด 2 ประการ คือ

1. แก๊สจะต้องสามารถผ่านไปยังผิวน้ำเพื่อทำให้เกิดฟองแก๊สได้
 2. ในการเกิดฟองโดยทั่วไปจะไม่เสถียรเนื่องจากฟองไม่มีส่วนที่ป้องกันการรวมตัวของฟองที่มาสัมผัสกัน โดยส่วนที่ป้องกันนี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้สารลดแรงตึงผิว
- เมื่อพิจารณากระบวนการการเกิดฟองได้น้ำโดยใช้ตัวกระจายแก๊ส ดังรูป 2.3 ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะกลม และจะลอยขึ้นไปบนผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ และจะทะลุผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ ถ้าน้ำเป็นน้ำบริสุทธิ์และผิวของน้ำไม่มีสิ่งปนเปื้อน ฟองที่ลอยขึ้นก็จะแตกออก แต่ในน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิวละลายอยู่เมื่อแก๊สผ่านเข้ามาขังน้ำก็จะทำให้เกิดฟองซึ่งผิวของประจุจะดูดซับ สารลดแรงตึงผิวและจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มแบบชั้นเดียว (Monolayer) ฟองแก๊สจะลอยขึ้นไปทีผิวของน้ำด้วยแรงลอยตัว และเมื่อใกล้ถึงผิวของน้ำจะเกิดแรงกระทำที่ต้านทานการลอยของฟอง เพราะเมื่อพิจารณาส่วนที่มีประจุหันเข้าหาส่วนที่เป็นน้ำจึงทำให้เกิดแรงผลักรัน เมื่อฟองแก๊สลอยใกล้ถึงน้ำ ถ้าแรงจากการชน (Momentum) เพียงพอที่จะเอาชนะแรงต้านทานนี้ก็จะทำให้ฟองแก๊สอีกชั้นหนึ่ง และถ้าแรงจากการชนมีค่าไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงต้านทานฟองของแก๊สแอฟรอนก็จะยังคงจมอยู่ใต้ผิวของน้ำ

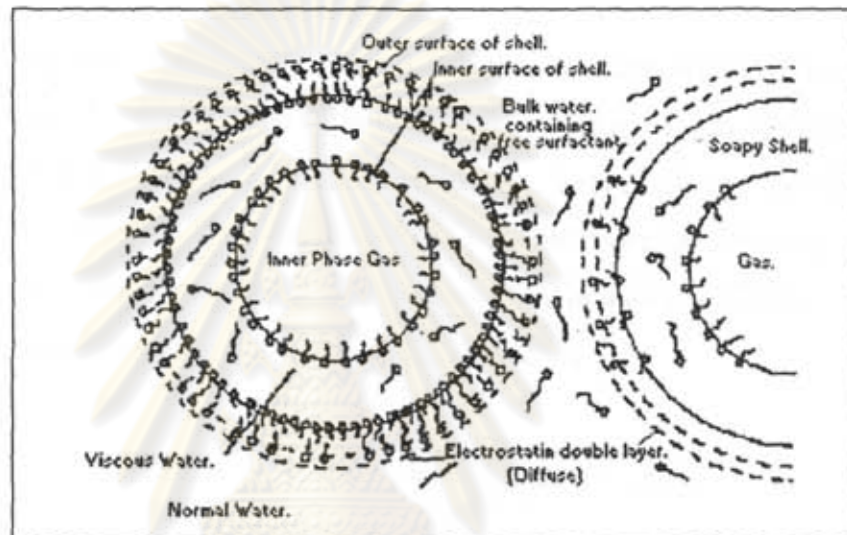


รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดฟอง Gas Aphrons

2.2.3 โครงสร้างของแก๊สแอฟรอนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยก

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของแก๊สแอฟรอนในระดับโมเลกุล ดังรูปที่ 2.4 เห็นได้ว่ามีฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวหุ้มอยู่ 2 ชั้น คือฟิล์มที่หุ้มอยู่ด้านใน (Inner Surface) และฟิล์มที่หุ้มอยู่ด้านนอก (Outer Surface) โดยที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีอยู่ทั้ง 2 ชั้นนี้จะเรียงตัวกันเป็น โมโนเลเยอร์ (Monolayer) ถัดเข้ามาจากฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวด้านนอกคือสารละลายของสารลดแรงตึงผิว (Soapy Shell) โดยสารละลายนี้มีคุณสมบัติต่างจากสารละลายที่อยู่รอบๆ อนุภาคของฟองแอฟรอน

(Bulk Water) คือมีพันธะไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ไว้ด้านนอก ส่วนที่ฟิล์มของสารลดแรงตึงผิว ด้านนอก โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวหันหัวไฮโดร โฟบิก (Hydrophobic) ไว้ด้านนอก โครงสร้างที่มีประโยชน์ของแก๊สแอฟรอนในกระบวนการแยกสารคือพื้นผิวระหว่างฟิล์มของสารลดแรงตึงผิว ด้านนอกกับสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่รอบๆ ฟองที่เรียกว่า Electrical Double Layer การเกาะติดของอนุภาคบนฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดขึ้นบน โครงสร้างนี้เอง



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างระดับโมเลกุลของแก๊สแอฟรอน

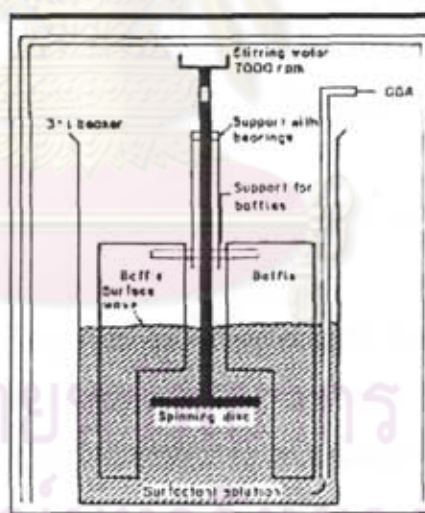
2.2.4 การกลายเป็น Creaming ของแก๊สแอฟรอน [11]

ฟองแก๊สแอฟรอนมีแนวโน้มที่จะเกิดอิมัลชัน (Emulsion) คล้ายกับหยดน้ำมันค้อยๆ ลอยขึ้นอย่างช้าๆ ไปที่พื้นผิวของสารละลาย การลอยตัวขึ้นนี้เกิดเนื่องมาจากฟองแก๊สแอฟรอนมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ โดยที่ฟองแก๊สแอฟรอนที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงลอยตัวที่มากกว่าฟองแก๊สแอฟรอนที่มีขนาดเล็ก (มีการต้านทานต่อการเคลื่อนที่ต่ำกว่า) เนื่องจากฟองของแก๊สแอฟรอนที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณแก๊สภายในมาก และแก๊สนี้เองที่มีความหนาแน่นน้อยมาก ทำให้เกิดการลอยตัวที่เร็วกว่าฟองแก๊สแอฟรอนที่มีขนาดเล็กซึ่งมีปริมาณแก๊สน้อยกว่า

การเกิด Creaming ของแก๊สแอฟรอนใช้เวลาประมาณ 10 – 15 นาที ซึ่งเร็วกว่าการเกิด Creaming ของอิมัลชันอื่นๆ เมื่อเกิด Creaming แก๊สแอฟรอนจะเปลี่ยนรูปร่างเป็น โฟมซึ่งจะมีความหนืดสูงขึ้น ในการนำฟองแก๊สแอฟรอนไปใช้งานนั้นควร ใช้งานในช่วงที่แก๊สแอฟรอนยังไม่เกิด Creaming แต่อย่างไรก็ตามสามารถชะลอการเกิด Creaming ทำให้การเก็บรักษาฟองแก๊สแอฟรอนไว้ได้เป็นหลายชั่วโมง จึงสามารถดูดแก๊สแอฟรอนไปใช้งานในกระบวนการแยกได้อย่างต่อเนื่องโดย สารละลายที่อยู่ในกระบวนการแยกนี้ควรมีความหนืดของสารต่ำเพื่อง่ายต่อการดูดไปใช้งาน

2.3 เครื่องผลิตแอฟรอน

การคิดค้นและพัฒนาเครื่องผลิตแอฟรอนโดย Sebba ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน หลักการทำงานของเครื่องคือการผลิตแอฟรอนโดยใช้ใบกวน (Spinning Disc) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการหมุนของมอเตอร์ในการกวนต้องมีค่าสูงมากกว่า 4,000 รอบต่อนาที และตำแหน่งที่วางใบกวนนั้น จะต้องต่ำกว่าผิวหน้าของสารละลายของสารลดแรงตึงผิวประมาณ 2 – 3 เซนติเมตร ภายในถังกวนมีการติดตั้ง Baffle 2 อันในแนวตั้งซึ่งทำมาจากพลาสติกแข็งและต้องอยู่สูงกว่าผิวหน้าของสารลดแรงตึงผิว มีการติดตั้งใบที่ระดับต่ำกว่ามอเตอร์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นที่เพล่าและมอเตอร์ที่ใช้ต้องยึดไว้กับฐานที่แข็งแรง ถ้าออกแบบระบบนี้ให้เหมาะสมสามารถทำให้มีการหมุนของมอเตอร์ในการกวนที่ความเร็วประมาณ 7,000 รอบต่อนาทีได้เป็นเวลาหลายๆ ชั่วโมง โดยไม่เกิดการสั่นและในการผลิตแอฟรอนประมาณ 3 ลิตร จะใช้เวลาเพียง 2-3 วินาทีเท่านั้น เพราะฉะนั้นเมื่อต้องการใช้แอฟรอนในปริมาณมากๆ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องผลิตหลายตัว และได้มีการประมาณว่าปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแอฟรอน 10,000 ลิตรนั้นน้อยกว่า 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งเป็นการใช้พลังงานน้อยและตัวเครื่องผลิตแบบนี้สามารถสร้างได้ง่าย และราคาไม่แพง



รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องผลิตแอฟรอนแบบ Spinning Disc

2.4 นิยามและประเภทของฝุ่น [13]

มลพิษทางอากาศ คือ สิ่งปลอมปนในอากาศที่มีอยู่ในปริมาณและระยะเวลาที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ สัตว์ หรือพืช หรือทรัพย์สิน หรือรบกวนความสุขสบายของสิ่งมีชีวิตหรือทรัพย์สิน การดำเนินธุรกิจ สิ่งปลอมปนดังกล่าวได้แก่ ฝุ่น กว้น ละอองสารระเหย ละอองวัตถุ ก๊าซพิษ ไอสารระเหย สารกลั่นลุน เป็นต้น ซึ่งให้คำจำกัดความของอนุภาคนิตต่างๆ ดังนี้คือ

ตารางที่ 2.1 นิยามของอนุภาคแขวนลอยในอากาศ

อนุภาคมลสาร (Particulate matter)	วัตถุทุกชนิด (ยกเว้นน้ำอิสระ) อยู่ในรูปของของแข็ง หรือของเหลว ในบรรยากาศ หรือในกระแสดำที่สภาวะมาตรฐาน
ละอองลอย (Aerosol)	การแพร่กระจายของอนุภาคของแข็งหรือของเหลวขนาดจุลทรรศน์ในก๊าซ
ฝุ่น (Dust)	อนุภาคของแข็งซึ่งสามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้ชั่วขณะหนึ่ง
ขี้เถ้าปลิว (Fly ash)	อนุภาคของเถ้าที่ติดมากับกระแสดำ อนุภาคนี้อาจประกอบด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ ของเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผา
หมอก (Fog)	ละอองลอยที่มองเห็นได้
ไอก๊าซ (Fume)	อนุภาคที่เกิดจากการกลั่นตัว การระเหิด หรือจากปฏิกิริยาเคมี ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร
ไอน้ำ (Mist)	การแพร่กระจายของหยดน้ำขนาดเล็กๆ ในบรรยากาศและหยดน้ำนี้มีขนาดใหญ่พอที่จะตกลงมาจากอากาศได้
อนุภาค (Particle)	มวลแยกเป็นชิ้นอิสระของของแข็งหรือของเหลว
กว้น (Smoke)	อนุภาคแขวนลอยในก๊าซ มีผลมาจากการเผาไหม้
เขม่า (Soot)	การจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคคาร์บอน

ฝุ่น (Dust) หมายถึง มลสารอนุภาค (Particulate Matter) ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งเท่านั้น มีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรขึ้นไป และสามารถแขวนลอยในบรรยากาศได้ชั่วคราว ถ้าหากอนุภาคของแข็งนี้มีขนาดโตกว่า 100 ไมโครเมตร อาจเรียกว่า อนุภาคหยาบ (Coarse Particle) และเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร เรียกว่า อนุภาคละเอียด (Fine Particle) [1] ฝุ่นละอองที่อยู่รอบๆ ตัวเรามีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมโครเมตร ไปจนถึงฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร (ฝุ่นที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีขนาดตั้งแต่ 50 ไมโครเมตรขึ้นไป) ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานจะเป็นฝุ่น

ละอองขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 10 ไมโครเมตร) เนื่องจากมีความเร็วในการตกตะกอนต่ำ และจะแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม เป็นต้น ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมโครเมตร) อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2-3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นปี

2.4.1 ประเภทของฝุ่น

โดยปกติการจำแนกฝุ่นออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ตามลักษณะทางกายภาพได้แก่

- อนุภาคที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต มีรูปร่างแน่นอน (Nonviable Particles)
- อนุภาคที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต มีรูปร่างไม่แน่นอน (Viable Particles)
- อนุภาคที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต มีรูปร่างแน่นอน

อนุภาคที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น ภูเขาไฟระเบิด หรือการก่อสร้าง มีขนาดแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับลักษณะ และการกำเนิดของฝุ่นนั่นเอง

อนุภาคฝุ่นที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต อาจจำแนกออกเป็น 3 จำพวก ได้แก่

- ฝุ่นที่มีผลต่อระบบหายใจ (Respirable dust) หมายถึงฝุ่นที่มีขนาดเล็กเพียงพอจะเข้าสู่ระบบหายใจทางจมูก หรือระบบหายใจส่วนบนและไหลเข้าสู่ปอดได้
- ฝุ่นที่มีผลต่อการดูดซึมทางร่างกาย (Inhalable dust) หมายถึงฝุ่นที่เข้าสู่ร่างกายได้โดยทางจมูกหรือปาก หรือโดยการรับประทานเข้าไป ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร
- ฝุ่นรวม (Total) ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ กันหรือมีหลายองค์ประกอบ

- อนุภาคที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต

อนุภาคที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตที่พบในบรรยากาศมีอยู่ 3 แบบคือ เกสรดอกไม้ (Pollen), จุลินทรีย์ (Microorganisms) และแมลง (Insect) ในตารางที่ 2.2 แสดงขนาดของอนุภาคที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 2.2 แสดงช่วงขนาดของอนุภาคมีรูปร่างไม่แน่นอน

Particulate	Stokes diameter (μm)
Viruses	0.015-0.45
Bacteria	0.3-15
Fungi	3-100
Algae	0.5
Protozoa	2-10,000
Moss spores	6-30
Fern spores	20-60
Pollen grains (wind-borne)	10-100
Plant fragments, seeds, insects, other micro fauna	100

เกสรดอกไม้ซึ่งเป็นลักษณะเมล็ดของพืช โดยมากจะไม่ทำให้เกิดโรค แต่จะเป็นประโยชน์ต่อวงจรชีวิตของพืชหลายชนิดมากกว่า เว้นแต่พวกที่แพ้เกสรดอกไม้ โดยจะพบเพียง 5-10% ของประชากรสหรัฐ

จุลินทรีย์ที่พบในอากาศประกอบด้วย Algae, Protozoa, Fungi, Yeasts, Molds, Rusts, Spores, Bacteria และ Viruses ซึ่งปกติจะมีอยู่ในระบบนิเวศน์ วิทยา แต่มีบางส่วนที่อาจก่อให้เกิดโรคแก่คน สัตว์ และพืช

2.5 แหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง[16]

2.5.1 จากแหล่งธรรมชาติ

มลพิษที่ถูกปล่อยออกจากธรรมชาติ จะมีลักษณะที่แตกต่างกันมากนั้นเป็นผลมาจากสถานที่ ภูมิประเทศ ฤดูกาล หรือภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ฝุ่นจากภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า และละอองเกสรดอกไม้ นอกจากนี้กิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมีผลช่วยให้เกิดการกระจายของมลพิษจากธรรมชาติด้วย เช่น ปรากฏการณ์ที่ชื่อ “ Dust bow 1” เมื่อค.ศ.1930 ทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา เป็นผลมาจากการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร แล้วทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของ สปอร์ไปทำความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน และถนน

ส่วนอีกตัวอย่างหนึ่งเป็นปรากฏการณ์ การระเบิดของภูเขาไฟเฮเลน เมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 1980 ทำให้เกิดการกระจายของอนุภาคฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ เป็นบริเวณพื้นที่ประมาณ 4 ตารางกิโลเมตร ฝุ่นละอองมีขนาดตั้งแต่ใหญ่ไปจนถึง 0.001 ไมโครเมตร ซึ่งการกำจัดโดยธรรมชาติต้องอาศัยระยะเวลาอันยาวนาน ดังนั้นจึงเกิดการกระจายของอนุภาคแขวนลอยในบรรยากาศอยู่เป็นเวลานาน

2.5.2 จากแหล่งชุมชน

ในแหล่งชุมชน กิจกรรมของมนุษย์เป็นปัจจัยหลักของการเกิดมลพิษ ซึ่งจะประกอบไปด้วยกิจกรรมต่างๆ ที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งจะอธิบายถึงกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ที่ปล่อยมลพิษทางอากาศออกสู่อากาศ

ตารางที่ 2.3 แสดงมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ

Activity	Pollutants released
Space heating	CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , soot, smoke (if fossil fuels are burned at the residence)
Cooking	Fats (as solids, liquids and vapors), particles, odors
Cleaning	Solvent vapor, dusts, lint, spray can propellants
Gardening	Pesticides, fertilizers (some of which may be highly toxic)
Painting	Principally solvent vapors
Washing	Detergent particles, soap particles, lint.

2.5.3 จากแหล่งการค้า

แหล่งกำเนิดทางการค้าของฝุ่นละออง คือ อุตสาหกรรมบริการต่างๆ เช่น ร้านซักแห้ง เสื้อผ้า, ร้านอาหาร, โรงแรม, โรงเรียน, โรงพิมพ์ และโรงพิมพ์สีรถยนต์ตามอู่รถยนต์ต่างๆ เป็นต้น กิจกรรมที่เกิดขึ้นต่างๆ ในการดำเนินธุรกิจอาจก่อให้เกิดฝุ่นละอองในบรรยากาศได้ เช่น จากร้านอาหาร อาจเกิดจากการประกอบอาหารขาย หรือร้านซักแห้งเสื้อผ้า เป็นแหล่งปล่อยฝุ่นละอองสารเคมี ที่ใช้สำหรับซักแห้งจำนวนมาก

2.5.4 จากแหล่งกิจกรรม

โดยส่วนใหญ่แล้ว จะมีแหล่งกำเนิดจากโรงฆ่าสัตว์และโรงเลี้ยงสัตว์ปีก เช่น โรงเลี้ยงไก่ เพื่อผลิตเนื้อ จะมีการฟุ้งกระจายของอนุภาคฝุ่น ขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจเป็นอย่างมาก

นอกจากตัวอย่างนี้แล้ว ผลจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร ก็ยังเป็นสาเหตุสำคัญในการผลิตอนุภาคฝุ่นละอองสู่บรรยากาศ

2.5.5 จากแหล่งการขนส่งหรือแหล่งการเคลื่อนที่

เป็นการพิจารณาจากแหล่งกำเนิดที่มาจากเครื่องยนต์ เมื่อเครื่องยนต์ได้เผาไหม้เชื้อเพลิงมีก๊าซเสียเกิดขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย CO, NO, ไฮโดรคาร์บอน และเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้บางส่วน โดยองค์ประกอบอาจเกิดการรวมตัว กลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า เขม่า (Soot)

2.5.6 จากแหล่งกำเนิดทางอุตสาหกรรม

แหล่งกำเนิดประเภทนี้ จะเป็นตัวที่ปล่อยมลพิษ และทำให้เกิดผลกระทบมากที่สุดเมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของภาคอุตสาหกรรมแล้ว พบว่า การปล่อยฝุ่นนั้น จะขึ้นอยู่กับประเภทของการผลิต กิจกรรมของอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ปิโตรเคมีที่มีผลนั้นอาจเป็น เครื่องจักรที่ทำงานบด หรือสกัดแร่ออกจากแหล่งแร่ หรือเหมืองแร่ โดยไม่มีการป้องกันหรือปกคลุมก่อนเป็นต้น โดยสรุปแล้วประมาณการปล่อยฝุ่นอาจสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงประมาณการปล่อยฝุ่น จากกิจกรรมหรือกระบวนการผลิตต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 การปล่อยฝุ่นละอองจากกระบวนการต่างๆ

Industry	Emission, ton/yr
Iron and steel	1,910,000
Other primary	40,000
Grey-iron foundries	170,000
Other secondary metals	50,000
Cement	870,000
Stone, sand, rock, etc.	870,000
Coal cleaning	185,000
Phosphate rock	205,000
Lime	450,000
Asphalt batching	540,000
Other mineral product	180,000
Oil refineries	100,000
Other chemical industries	90,000

2.6 ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นละอองต่อสิ่งแวดล้อม

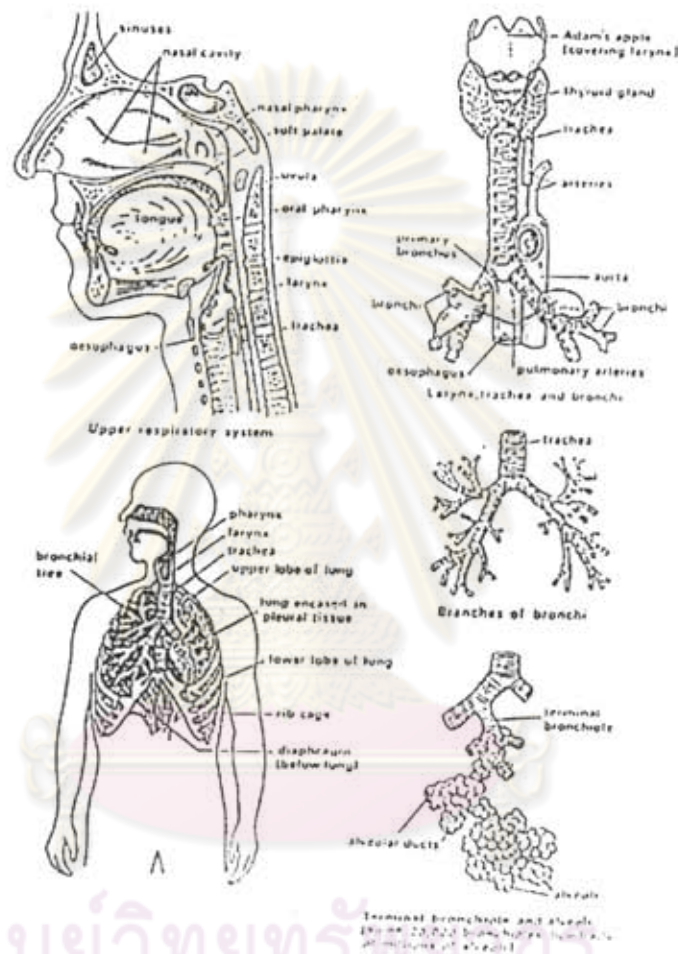
2.6.1 ผลกระทบต่อวัตถุ

โดยความจริงแล้วไม่สามารถเห็นได้ชัดเจนถึงความเสียหาย เนื่องจากการยากมากที่จะประเมินเป็นปริมาณทางเศรษฐศาสตร์ หากเป็นความเสียหาย ทางศิลปะ หรือสุนทรียภาพของสิ่งแวดล้อม สภาพความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อน หรือพังทลาย อาจเกิดจากมลพิษตัวอื่น และสภาวะภูมิอากาศ แต่อนุภาคฝุ่นก็สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนได้โดยอาศัยหลักการไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Galvanic reaction) โดยอาศัยทั้งอนุภาคที่เป็นกรด (Acid) หรือด่าง (Alkaline) และความชื้นจะเป็นตัวเร่งการเกิดการกัดกร่อนวัตถุให้เกิดความเสียหายได้เร็วขึ้น

2.6.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ

ผลต่อระบบการหายใจ (Respiratory Noisome effects)

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.6 พบว่า หากพิจารณาระบบหายใจส่วนบน (Upper respiratory system) ประกอบไปด้วย nasal cavity และ trachea ส่วนระบบหายใจส่วนล่าง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.6 อวัยวะภายในที่อาจได้รับผลกระทบ

(Lower respiratory system) ประกอบไปด้วย bronchial tubes และ lung โดยแต่ละ bronchus จะแตกแขนงออกเป็นเส้นเล็กๆ โดยแต่ละช่องที่ตรงปลายของแขนง สามารถใช้เป็นพื้นที่แลกเปลี่ยนออกซิเจนกับเลือดเสียเรียกพื้นที่นี้ว่า alveoli

อนุภาคขนาดใหญ่มากกว่า 10 ไมโครเมตรของละอองฝุ่นที่เข้าสู่ระบบหายใจ อาจถูกจับด้วยขน หรือน้ำมูก ภายในจมูก และถูกขับออกทางเสมหะ หรือน้ำมูกส่วนขนาดเล็กลงมาสามารถเข้าสู่ระบบหายใจส่วนล่าง ซึ่งจะมีบางส่วนที่ถูกจับด้วยก้ามเนื้อภายในนี้ ดังนั้นอาจสรุปได้ตามรูป

ที่ 2.3 ขนาดของอนุภาคจะมีผลต่ออวัยวะภายในที่จะได้รับอันตราย ซึ่งอนุภาคขนาด 0.5-10 ไมโครเมตรนี้ จะมีผลต่อระบบภายในปอดมาก ซึ่งเมื่อมีการสะสมภายในระบบหายใจมากเกินไป อาจเกิดโรคมะเร็งปอดได้เนื่องจากในระหว่าง 0.5-10 ไมโครเมตรนี้ จะสามารถเกิดการตกตะกอนภายในปอดได้นั่นเอง

แต่อย่างไรก็ตามกลไก การระบายฝุ่นละอองขนาดเล็กออกจากระบบหายใจ ยังไม่เป็นที่เข้าใจนั้นเท่าไร แต่โดยปรกติร่างกายมนุษย์สามารถทนรับระดับของประมาณ ฝุ่น ละอองได้จำนวนหนึ่ง ซึ่งความต้านทานของร่างกายในมนุษย์แต่ละคนจะไม่เท่ากัน

2.6.3 ผลกระทบต่อพฤษศาสตร์

ในด้านผลกระทบต่อพฤษศาสตร์มีผู้ศึกษาหลายท่าน ซึ่งส่วนใหญ่พบว่าความรุนแรงขึ้นอยู่กับ อัตราการปล่อยอนุภาคฝุ่น (Dust emission rate), อุตุนิยมวิทยา (meteorology) และลักษณะของผิวหน้าใบพืช (leaf surface) โดยทางกายภาพอนุภาคฝุ่นสามารถไปปิดบังการทำงานของปากใบพืช (stomata) ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 8-12 μm สำหรับพืชผลการเกษตร ดังนั้นขนาดอนุภาคฝุ่นในช่วง 8-12 μm เป็นตัวแปรสำคัญที่เกิดผลกระทบต่อพืชผล

2.6.4 ผลกระทบต่ออุตุนิยมวิทยา

ผลต่อความเข้มแสงอาทิตย์

ตามเมืองใหญ่ศึกษาพบว่า หากมีการปกคลุมด้วยฝุ่นละอองในบรรยากาศจำนวนมากมีผลทำให้พลังงานความเข้มแสงอาทิตย์ที่ส่องลงพื้นดินน้อยกว่าที่ระดับบริเวณพื้นที่ตามชนบทหรือพื้นที่ที่มีการกระจายของฝุ่นละอองต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มีขนาดช่วง 0.1-100 ไมโครเมตร มีผลต่อการกระจาย, บดบัง และดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงอุลตราไวโอเลต และ visible ที่ถูกปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นระดับความเข้มแสงในบรรยากาศจึงต่ำลงกว่าชนบท แต่ทั้งนี้ผลของมุมตกกระทบของคลื่นแสงจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการนี้ เช่น มุมแสงอาทิตย์ (Solar angle) ตำแหน่งเมือง ฤดูกาล ปริมาณความเข้มฝุ่นละอองในบรรยากาศ และมุมตกกระทบของวัตถุ (Elevation angle)

2.6.5 ผลในการลดสภาพการมองเห็น

ผลของการลดสภาพการมองเห็น เป็นหนึ่งในหลายหัวข้อที่เกิดจากการกระจายฝุ่นละอองในบรรยากาศ เป็นผลกระทบรุนแรงในระดับ ขนาดพื้นที่ หรือท้องถิ่น ที่เรียกว่า Micro scale ในความหมายทางอุตุนิยมวิทยาของคำว่า สภาพการมองเห็น (Visibility) คือ มาตรฐานการวัดของระดับความสามารถในการเคลื่อนที่ของแสงในช่วง visible spectrum ผ่านตัวกลางที่เป็น

บรรยากาศ หากพบการลดลงของสภาพการมองเห็น แสดงว่าระดับความปลอดภัยลดลง และ
 ศูนย์ภาพลดลงอีกด้วย

ฝุ่นละอองในช่วงขนาด 0.38-0.76 ไมโครเมตร เป็นสิ่งเจือปนหลักที่มีผลต่อการลดสภาพ
 การมองเห็น เพราะว่าฝุ่นละอองดังกล่าวจะทำให้เกิด การดูดกลืน และการกระจายแสงซึ่งผลจาก
 การกระจายแสงทำให้ภาพของวัตถุ และภาพเบื้องหลัง เกิดความไม่กระจายขึ้น โดยจะเห็นตัวอย่าง
 จากการสะท้อนแสงของฝุ่นละอองในเวลาเย็นตอนพระอาทิตย์ตกดิน ดังนั้นปริมาณแสงจึงไม่
 เพียงพอต่อการมองเห็นที่กระจายชัด สภาพการมองเห็นในปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงลดลง

2.6.6 ผลกระทบต่อระบบปฏิกิริยาเรือนกระจก

ฝุ่นละอองในอากาศนอกจากส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ต่างๆ มากมายดังที่ได้กล่าวไป
 แล้ว แต่ในทางอุตุนิยมวิทยา อาจจะเป็นตัวช่วยในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศของโลกไม่
 เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว เนื่องจากฝุ่นละอองเหล่านี้จะเป็นจุดศูนย์กลางหรือนิวเคลียสของไอน้ำที่จะ
 รวมตัวกลายเป็นเมฆหรือหยดน้ำ ซึ่งถ้าในอากาศไม่มีฝุ่นละอองเหล่านี้การรวมตัวของไอน้ำเป็น
 หยดน้ำ จะเป็นไปด้วยความยากลำบาก หรือไม่อาจเกิดขึ้นได้เป็นที่น่าสังเกตว่าเมืองอุตสาหกรรมที่
 ปลดปล่อยควันไฟ หรือสารเคมีต่าง ๆ ขึ้นสู่ท้องฟ้าฝุ่นละอองเหล่านี้จะช่วยทำให้ไอน้ำรวมตัวกัน
 กลายเป็นเมฆ (Cloud) หมอกแดด (Haze) หรือหมอกควัน (Smog) เกิดขึ้นท้องฟ้าในบริเวณเมือง
 นั้นๆ จึงทำให้ท้องฟ้ามืด กรึ่มและมีฝนตก

2.7 การควบคุมฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดประเภทอยู่กับที่

2.7.1 การชำระล้างโดยธรรมชาติ

ในธรรมชาติ กระบวนการกำจัดมลพิษทางอากาศ เกิดขึ้นได้หลายกลไก ซึ่งอาจเป็นการ
 แพร่กระจาย (Dispersion), การตกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational setting), การเกาะกลุ่มรวมตัว
 (Flocculation), การดูดซึม (Absorption), การชะล้างด้วยฝน (Rainout) และการดูดซับ
 (Adsorption) ปรากฏการณ์เหล่านี้อาจเกิดขึ้นพร้อมกัน หรือ โดดเดี่ยวก็ได้

การแพร่กระจาย (Dispersion) ของมลพิษในธรรมชาติ อาศัยกระแสลม จัดเป็นการกำจัด
 มลพิษแบบทำให้เจือจางลง เกิดในบริเวณพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งเท่านั้น แต่ไม่เป็นการดึงนำมลพิษออก
 จากกระแสอากาศ

การตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational setting) เป็นกลไกทางธรรมชาติที่สำคัญ
 ที่สุด เป็นการแยกฝุ่นละอองออกจากบรรยากาศ เกิดสำหรับขนาดอนุภาคฝุ่นที่ใหญ่กว่า 20
 ไมโครเมตร และในทางธรรมชาติกลไกนี้อาจเกิดจากกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการอื่น เช่น
 การเกาะกลุ่มรวมตัว (Flocculation) โดยอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร หากรวมตัวเกาะ

กลุ่มเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่า 20 ไมโครเมตร หรือมากพอที่จะทำให้มีน้ำหนักเพียงพอ อาจเกิดการตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกได้ เหตุผลเนื่องจาก อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก สามารถเคลื่อนที่มาชนกัน อาจทำให้เกิดการจับเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ได้

ขบวนการดูดซึม(Absorption) เป็นการนำอนุภาคฝุ่นออกจากบรรยากาศโดยอาศัยตัวพา ได้แก่ น้ำฝน หรือหมอกควัน ในบรรยากาศ ขบวนการนี้อาจเรียกว่า “washout” หรือ “Scavenging” ตัวแปรที่สำคัญจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน และขนาดของอนุภาคฝุ่น ซึ่งอาจมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ก็อาจสามารถถูกดึงออกจากบรรยากาศได้

การชะล้างด้วยฝน (Rainout) ปรากฏการณ์นี้ต่างกับ “washout” คือ washout จะปรากฏขึ้นขณะเกิดฝนตก แล้วดูดซับเอาอนุภาคฝุ่นเข้าไปกับหยดน้ำฝน และชะล้างออกมาด้วยกันแต่ “rainout” จะปรากฏขึ้นภายในหมอก หรือกลุ่มเมฆ กลายเป็นหยดน้ำฝนออกมา ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มการตกของน้ำฝน หรือการเกิดหมอกในชุมชนนั่นเอง

การดูดซับ (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นอากาศที่ใกล้ผิวดิน ซึ่งเมื่ออนุภาคฝุ่นสัมผัสกับผิวดิน และถูกแรงดึงดูดจับอนุภาคให้เกาะติดกับผิวสัมผัสนั้นไว้ ผิวสัมผัสทางธรรมชาตินี้ได้แก่ ผิวดิน หิน ใบไม้ และกิ่งไม้ เป็นต้น ซึ่งการดูดซับของอนุภาคฝุ่นอาจได้รับการช่วยเหลือจากแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้อนุภาคขนาด 10-15 ไมโครเมตร ก็อาจถูกจับด้วยกระบวนการนี้ได้

ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยระยะเวลาและความเหมาะสมของภูมิอากาศ เป็นองค์ประกอบ จึงทำให้การกำจัดมลพิษทางธรรมชาติไม่เพียงพอต่อปริมาณมลพิษที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา

2.7.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศ และมาตรฐานการปล่อยอนุภาคฝุ่น

โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ของประเทศไทย ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศของฝุ่นละอองแขวนลอยที่ 0.30 mg/m^3 และมาตรฐานการปล่อยอนุภาคฝุ่นที่ 400 mg/m^3 สำหรับโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน

2.7.3 การควบคุมที่จุดกำเนิด

การวางแผนระบบบำบัดฝุ่น

เมื่อปริมาณของฝุ่นละอองที่ปล่อยออกจากแหล่งผลิต มีค่าเกินกว่าระดับที่ระบุไว้ในมาตรฐานปล่อยออก จึงมีความจำเป็นต้องประยุกต์ใช้วิธีเก็บฝุ่นที่เหมาะสม การเลือกระบบเก็บรวบรวมฝุ่นที่เหมาะสม ต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

ก. กระบวนการเก็บรวบรวมฝุ่น

ข. ความต้องการด้านอุปกรณ์

ค. ค่าใช้จ่ายของกระบวนการ

สำหรับหัวข้อ ก. สิ่งที่ต้องศึกษาคุณสมบัติของฝุ่นที่จะเก็บและลักษณะสมบัติการไหลของก๊าซทั้ง คุณสมบัติของฝุ่น ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่น (หรือความถ่วงจำเพาะ) ที่แท้จริงของอนุภาค รูปร่างของอนุภาค คุณสมบัติการติดเกาะ การรวมก้อน (Agglomeration) การเสียดถู (Abrasion) คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าสถิต คุณสมบัติดูดความชื้น (Hygroscopic) อุณหภูมิติดไฟ และความเข้มข้นในก๊าซ ลักษณะสมบัติของการไหลของก๊าซที่ต้องตรวจสอบในการเลือกเครื่องเก็บฝุ่น คือ อัตราการไหล อุณหภูมิ ความชื้น ฤทธิ์กัดกร่อน กลิ่น ความหนืด คุณสมบัติระเบิด และอื่นๆ

ถ้าปัญหาของมลพิษสรุปได้ว่าเราจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือทำความสะอาด ก็มีเครื่องมือและเทคนิคมากมายปัจจุบันให้เลือกใช้ให้เหมาะสม ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งเครื่องเก็บฝุ่น ได้แก่ การใช้น้ำในกระบวนการ(Process water) การเก็บความร้อนที่กลับมาใช้ การกำจัด (Disposal) ฝุ่นที่เก็บรวบรวมได้ การเก็บฝุ่นเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ (by products) และขีดจำกัดด้านตำแหน่งที่ตั้ง หรือพื้นที่ติดตั้ง รวมทั้งประสิทธิภาพของการเก็บอนุภาค ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 คือ

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

โดยที่ η_o = ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่น

C_i = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า (g/m^3)

C_o = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางออก (g/m^3)

ค่าใช้จ่ายของกระบวนการควรรวมทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า ค่ากำจัดของทิ้ง ค่าน้ำใช้ในกระบวนการ ค่าวัสดุ ค่าบำบัดก๊าซที่ใช้ล่วงหน้า ค่าแรงงาน ค่าประกันภัยและค่าเสื่อมราคา นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการศึกษาทางวิศวกรรมค่าออกแบบหน่วยหลักและหน่วยพ่วง ค่างานก่อสร้างและค่างานวิศวกรรมโยธาตลอดจนค่าทดสอบการทำงาน เป็นต้น

2.7.4 อุปกรณ์การควบคุมฝุ่นละออง [12]

กลไกพื้นฐานที่ใช้ในการเก็บอนุภาคมี 6 ชนิด คือ

1. การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity setting chambers)
2. การตกกระทบด้วยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal impaction)
3. การตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial impaction)
4. การสกัดโดยตรง (Direct interception)
5. การแพร่กระจาย (Diffusion)
6. ผลของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effect)

โดยกลไกในการเก็บอนุภาคแต่ละชนิดนั้น สามารถนำมาใช้สร้างเครื่องมือพื้นฐานในการกำจัดฝุ่นได้หลายชนิด ซึ่งจะมีคุณสมบัติและความเหมาะสมกับลักษณะของฝุ่นละอองที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.7.4.1 เครื่องตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity settling chamber)

เครื่องนี้ใช้ได้ดีเมื่ออัตราเร็วของการตกตะกอนมากกว่า 13 cm/s คือ อนุภาคความหนาแน่นต่ำควรมีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร และ 10 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูง โดยเมื่ออากาศเสียไหลผ่านห้องตกตะกอน อนุภาคในอากาศจะตกลงสู่พื้นห้องโดยแรงโน้มถ่วงของโลก ความเร็วของอากาศที่ผ่านห้องตกตะกอนนั้นจะต้องต่ำพอที่จะไม่กวาดตะกอนที่ตกแล้วให้ฟุ้งขึ้นมาอีก การลดความเร็วของอากาศเข้าทำโดยการขยายขนาดท่อทางเข้าห้องตกตะกอน ห้องตกตะกอนนี้เหมาะที่จะใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร เนื่องจากขีดจำกัดเกี่ยวกับความยาวของห้อง เพราะอนุภาคที่เล็กกว่า 50 ไมโครเมตร จะต้องใช้ห้องที่ยาวมาก ห้องตกตะกอนนี้เหมาะที่จะใช้เป็นตัวทำความสะอาดชั้นแรกเพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนที่จะผ่านกระแสดำฝุ่นเข้าเครื่องเก็บฝุ่นชนิดอื่นเพื่อลดการสึกกร่อน

2.7.4.2 เครื่องแยกไซโคลอน (Cyclone)

เครื่องแยกไซโคลอนเป็นเครื่องมือทำความสะอาดที่ใช้หลักของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของกระแสดำฝุ่นทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสดำฝุ่นอย่างทันที อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงเฉื่อยอยู่ ทำให้สามารถแยกตัวออกจากกระแสดำฝุ่น แล้วถูกเก็บรวบรวมไว้เพื่อนำไปกำจัดตามความเหมาะสม โดยปกติเครื่องแยกไซโคลอนใช้กำจัดอนุภาคขนาด 10 ไมโครเมตร หรือใหญ่กว่านี้ แต่ไซโคลอนแบบทั่วไปมีขีดความสามารถในการกำจัดได้ไม่ถึง 90 % นอกจากนี้

อนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่า 25 ไมโครเมตร หรือใหญ่กว่านี้ อัตราส่วนของประสิทธิภาพการกำจัด จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงถึงระดับหนึ่ง จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดทั้งนี้เนื่องจากสร้างง่าย ราคาและค่าบำรุงรักษาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ควบคุมชนิดอื่น

2.7.4.3 เครื่องเก็บฝุ่นชนิดเปียก (Wet collector)

เครื่องเก็บฝุ่นชนิดเปียกจะใช้น้ำเป็นตัวจับฝุ่น หรือเพื่อเพิ่มขนาดของละอองลอยให้มีน้ำหนักมากขึ้น การตกตะกอนจะง่ายขึ้น เครื่องมือนี้สามารถแยกอนุภาคขนาดละเอียด ทั้งของแข็งและของเหลวที่มีขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องมือที่ดีต้องสามารถกระจายผิวหน้าของของเหลวกับผิวของของแข็งหรือฝุ่นให้มีพื้นที่สัมผัสกันมากที่สุด

เครื่องมือเก็บฝุ่นชนิดเปียกที่สำคัญมีอยู่ 3 แบบคือ

1. เครื่องฟอกแบบฉีดพ่น (Spray scrubber)
2. เครื่องฟอกแบบไซโคลน (Cyclonic scrubber)
3. เครื่องฟอกแบบเวนตูรี (Venturi scrubber)

เมื่อเทียบกับเครื่องมือ 2 ชนิดแรกแล้วจะพบว่าเครื่องเก็บฝุ่นชนิดเปียกจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสามารถควบคุมอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะสูงกว่าเนื่องจากต้องใช้พลังงานในการกระจายหยดน้ำให้มีอนุภาคขนาดเล็กพอและต้องการมีควบคุมมิให้ เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ

เคยมีผู้ศึกษาหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปร ไร้นหน่วยเพื่อทำนายประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของเครื่องมือเก็บฝุ่นชนิดเปียกแบบ Bubble column โดยพบว่าประสิทธิภาพของการดักจับฝุ่นจะขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรต่างๆ ดังนี้ [1]

- Geometrical parameter ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองแก๊ส (d_0), เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (D_C) และความสูงของคอลัมน์ (H)
- Flow parameter ได้แก่ ความเร็วอากาศ (V_G) และความเร็วของเหลว (V_L)
- Physical property ได้แก่ ความหนาแน่นของอนุภาค (ρ_p), ความหนาแน่นของกระแสาอากาศ (ρ_G), ความหนาแน่นของของเหลว (ρ_L), ความหนืดของแก๊ส (μ_g), ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า ($C_{FA,0}$), ความเร่งสู่ศูนย์กลาง (g), surface tension of liquid (σ_L) และความสามารถในการแพร่ (D_L)

ซึ่งสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นเป็นฟังก์ชันกับตัวแปร 13 ตัวคือ

$$\eta_{FA} = f(d_0, D_C, H, V_G, V_L, \rho_p, \rho_G, \rho_L, \mu_g, \sigma_L, D_L, C_i, g)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถจับให้อยู่ในกลุ่มตัวแปรไร้มิติตามทฤษฎี Buckingham's Π theorem ดังสมการ

$$\eta_c = 1 - 2.24 \times 10^{-3} [L_p]^{0.294} [R_{cG}]^{-0.042} [S_c]^{-0.50} [H_R]^{-2.86} \quad (2.2)$$

โดยที่	L_p	=	Liquid property group, $[\pi g D^3 c \rho_L / 4 Q_L \mu_L]$
	R_{cG}	=	Superficial gas Reynolds number, $[D_c V_G \rho_G / \mu_G]$
	S_c	=	Schmidt number based on fly ash concentration, $[\mu_L / D_L C_i]$
	H_R	=	Height to diameter ratio, $[H / D_c]$

2.7.4.4 เครื่องกรองสิ่งทอ (Fabric filter)

การกรองฝุ่นออกจากกระแสก๊าซเป็นกรรมวิธีเก่าแก่ที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลาย วัสดุกรองโดยทั่วไปมีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งอาจจะทำจากเม็ควัสดุหรือทอเป็นเส้นใย กลไกการแยกฝุ่นในกรณีนี้เกิดจากการชนกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัด ข้อเสียคือต้องการทำความสะอาดบ่อยๆ เพื่อหลีกเลี่ยงแผ่นกรองตัน เหมาะที่จะใช้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ยกเว้นในกรณีที่มีความชื้นสูง

2.7.4.5 เครื่องแยกฝุ่นไฟฟ้า (Electrostatic Precipitators)

วิธีแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซด้วยไฟฟ้าใช้หลักการของการดึงดูดกันระหว่างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าหนึ่งและขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงกันข้าม โดยการทำให้อนุภาคที่ต้องการกำจัดเกิดมีประจุไฟฟ้าขึ้นมาเสียก่อน โดยการเหนี่ยวนำจากนั้นก็จะถูกส่งต่อไปยังส่วนแยกอนุภาค ซึ่งมีรูปร่างต่างๆกัน เช่นเป็นแผ่นแบบเรียบ เป็นลอน เป็นแท่ง ดังนั้นเมื่อกระแสก๊าซเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาถึงส่วนนี้อนุภาคต่างๆ ก็จะเข้าจับกับส่วนแยกอนุภาค

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องมือดักจับฝุ่นชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งตัวอย่างการเลือกใช้เครื่องมือการดักจับฝุ่นให้เหมาะสมกับลักษณะและประเภทของฝุ่นแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องจับฝุ่นชนิดต่างๆ [12]

เครื่องมือจับฝุ่น	ข้อดี	ข้อจำกัด
1. เครื่องดกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง	1.1 ใช้พลังงานต่ำมาก 1.2 ค่าติดตั้ง ค่าซ่อมบำรุงต่ำ 1.3 ให้ความเชื่อถือในการใช้งานสูง	1.1 ขนาดใหญ่มาก 1.2 ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นต่ำถึงต่ำมาก โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร)
2. เครื่องแยกไซโคลน	2.1 ใช้สำหรับต้องการทำความสะอาดอากาศแก๊สในเบื้องต้น 2.2 สร้างง่าย ค่าบำรุงรักษาต่ำ	2.1 เหมาะสำหรับกำจัดฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ 2.2 ไม่ต้องการประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นที่สูงมาก
3. เครื่องเก็บฝุ่นชนิดเปียก	3.1 สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง 3.2 สามารถลดอุณหภูมิของกระแสแก๊ซ 3.3 สามารถใช้ได้กับกระแสแก๊ซที่มีความชื้นสูงและเป็นแก๊ซที่สามารถติดไฟได้ 3.4 ต้องการกำจัดทั้งแก๊ซมลพิษและอนุภาคมลสารพร้อมกันได้	3.1 มีปัญหาเกี่ยวกับตะกอนเปียก 3.2 การกัดกร่อนสูงเนื่องจากใช้น้ำ 3.3 ใช้พลังงานสูงในการกระจายผิวหน้าของของเหลวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสัมผัส
4. เครื่องกรอง	4.1 ให้ประสิทธิภาพในการเก็บสูง แม้ว่าอนุภาคมีขนาดต่างกันมาก 4.2 สามารถเก็บฝุ่นที่มีค่าในลักษณะแห้งได้	4.1 ใช้พื้นที่มาก 4.2 ต้องการการทำความสะอาดบ่อย เพราะอาจเกิดการอุดตันง่ายและอาจเกิดความดันตก 4.3 อาจเกิดระเบิดได้ถ้าเกิดประกายไฟขึ้นในบริเวณอุปกรณ์กรอง 4.4 ไม่นิยมใช้กับอนุภาคที่ดูดซับ

เครื่องมือจับฝุ่น	ข้อดี	น้ำได้ดี เนื่องจากปัญหา อนุภาคจับตัวเป็นก้อนเหนียว ข้อจำกัด
5. เครื่องแยกฝุ่นไฟฟ้า	5.1 รับปริมาณก๊าซได้มาก 5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นสูง แม้จะมีขนาดเล็กมากๆ 5.3 ใช้พลังงานต่ำ แรงต้านทาน ต่ำ	5.1 ฝุ่นอาจหลุดกลับไปยังกระแส ก๊าซได้ ถ้าประจุไฟฟ้าที่อยู่บน อนุภาคไม่เพียงพอที่จะยึด เกาะซึ่งกันและกัน 5.2 ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อฝุ่น มีความชื้นและอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างแสดงการเลือกใช้เครื่องดักจับให้เหมาะสมกับลักษณะของฝุ่น

Collection surface	Type of separator	Transport mechanisms
Non-permeable wall	Cyclone Electrostatics precipitator	Centrifugal force Electrostatic force
Permeable wall	Surface filter	Mostly sieving
Droplet	Wet scrubber	Mostly inertia
Granule, fiber	Granular bed, Fiber filter	Inertia, interception, Diffusion, electrostatic force

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการทดลองการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 เครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) ของ GW. Instek รุ่น GFG-8015
- 3.1.2 เครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ของ Pro-amp รุ่น 0560345
- 3.1.3 ลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ของ Woofer รุ่น DC-S410
- 3.1.4 เพอร์ริสตัดติคปั๊มของ Masterflex รุ่น 7518
- 3.1.5 หัวเก็บตัวอย่าง (Nozzle)
- 3.1.6 อุปกรณ์ระสมอนุภาค (Filter holder)
- 3.1.7 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ ของ Testo รุ่น 512
- 3.1.8 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 3.1.9 ขวดรูปชมพู่ (Flask) พร้อมจุกยาง
- 3.1.10 กระดาษกรองเบอร์ GF/F ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. ของ Whatmam
- 3.1.11 จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 3.1.12 บีกเกอร์ขนาด 100 มล.
- 3.1.13 ปากกิบ
- 3.1.14 เตาอบ (Oven)
- 3.1.15 เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.16 โถดูดความชื้น
- 3.1.17 เครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000
- 3.1.18 เครื่องวัด Zeta potential ของ Malvern รุ่น DST Ver. 4.00
- 3.1.19 เครื่องร่อนแยกขนาด Sieve shaker
- 2.1.20 เครื่องบด Ball mill

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 Cetyltrimethyl Ammonium Bromide ($C_{19}H_{42}BrN$): CTAB
- 3.2.2 Sodium Dodecyl Sulfate (Na_2SiO_3): SDS
- 3.2.3 Triton X-100 ($C_{34}H_{62}O_{11}$)
- 3.2.4 ขี้เถ้าลอย (Fly ash)

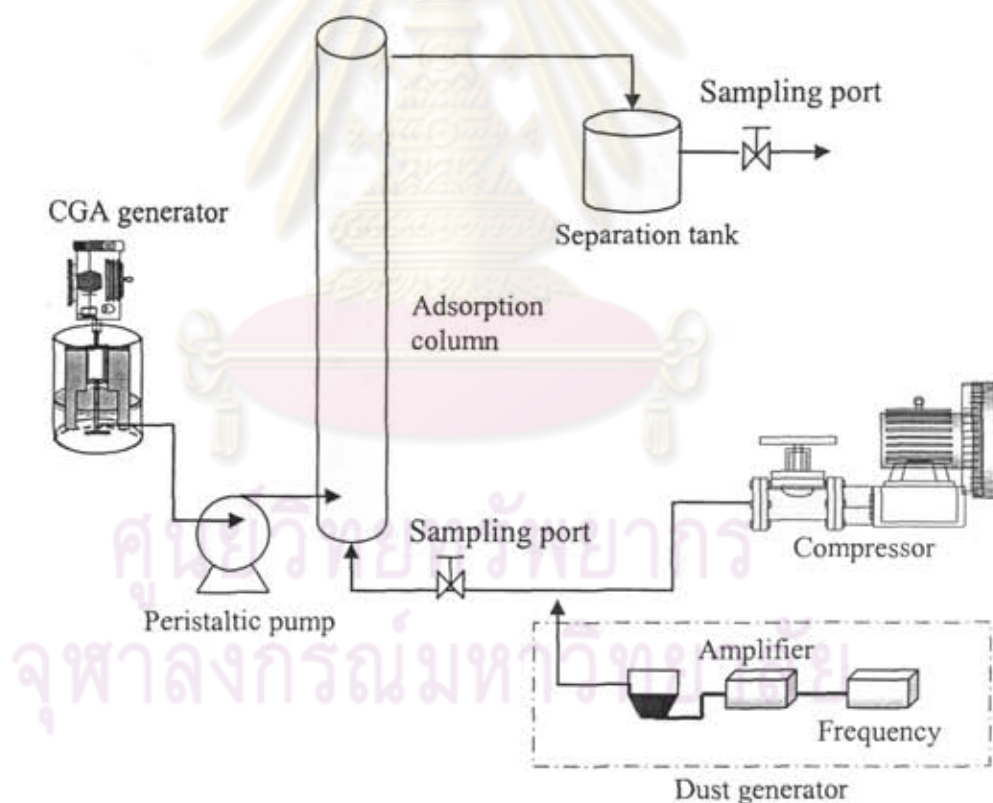
3.2.5 PVC resin ชนิด Emulsion

3.2.6 Wheat flour

3.2.7 Acetone ชนิด Reagent grade 0.001% residue

3.3 ชุดอุปกรณ์การดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ชุดอุปกรณ์ในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ อุปกรณ์กำเนิดฝุ่น ออกแบบโดยใช้ลำโพงเป็นตัวกำเนิดฝุ่น เมื่อลำโพงสั่นจะทำให้ฝุ่นลอยฟุ้งขึ้นมาและถูกอากาศพาเข้าสู่คอลัมน์ วัสดุที่นำมาใช้ทำคอลัมน์จะเลือกใช้ท่ออะคริลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็น การเคลื่อนที่ของฟองแก๊สแอฟรอนที่ถูกบีบเข้ามา โดยส่วนประกอบต่างๆของชุดอุปกรณ์การดักจับ ฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์สำหรับระบบการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

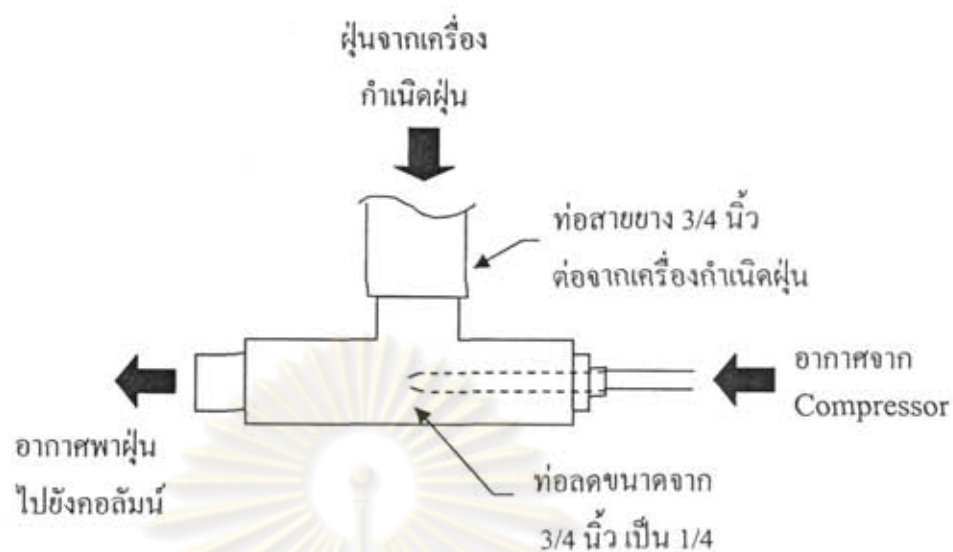
3.3.1 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น (Dust generator)

ในการผลิตเครื่องกำเนิดฝุ่นนี้ จะใช้อากาศจาก Compressor เป็นตัวพาฝุ่นเข้าสู่คอลัมน์ โดยเริ่มจากใช้ลำโพงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ต่อกับท่ออะคริลิกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม เพื่อเป็นตัวควบคุมการกระจายตัวของฝุ่น ต่อลำโพงเข้ากับเครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) และขยายความถี่ด้วยเครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ดังรูปที่ 3.2 ฝุ่นจะฟุ้งกระจายตัวตามการสั่นสะเทือนของลำโพงด้วยความถี่คงที่ เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้วที่ท่ออะคริลิก ที่ความสูง 15 ซม. ต่อท่อสายยางอีกด้านหนึ่งเข้ากับท่อสามทาง ซึ่งมีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ จาก 3/4 นิ้ว เป็น 1/4 นิ้ว เพื่อให้ลักษณะคล้ายกับ Venturi ฝุ่นที่ฟุ้งจากการสั่นของลำโพงจะถูกดูดเข้าสู่ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 1/2 นิ้ว และนำฝุ่นเข้าสู่ส่วนล่างของคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น

ศูนย์วิจัยทอพอยีกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงแบบและขนาดของท่อสามทางนำฝุ่นเข้าสู่คอถัมน์

3.3.2 ชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอน

ชุดผลิตฟองแก๊สแอฟรอนในการทดลองนี้สร้างตามแบบของ Felix Sebba คือเป็นแบบ Spinning disc โดยใช้ใบกวนด้วยความเร็วที่ 6000 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4

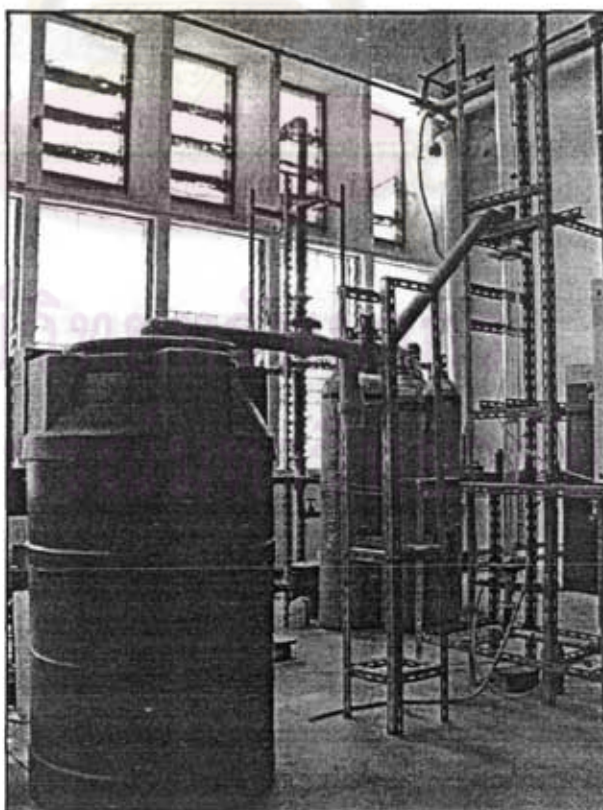


รูปที่ 3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ผลิตฟองแก๊สแอฟรอนแบบ Spinning disc

3.3.3 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

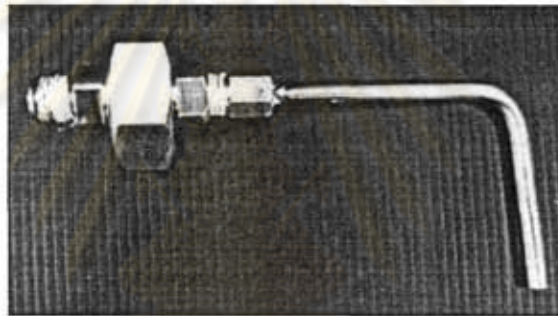
กระบวนการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจะเริ่มจากการป้อนฝุ่นเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ ผ่านตัวกระจายฝุ่น (Distributor) จากนั้นป้อนฟองแก๊สแอฟรอนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ อากาศจะพาอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอนขึ้นไปสู่ยอดคอลัมน์พร้อมกัน โดยมีลักษณะการไหลอย่างต่อเนื่องแบบตามกัน (Co-current flow) ซึ่งทั้งแอฟรอนและอากาศจะไหลออกจากคอลัมน์ทางด้านบน ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงหอดักจับฝุ่นและถังแยกแอฟรอน

3.3.4 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างฝุ่น

การเก็บตัวอย่างฝุ่นจะอาศัยหลักการดูดอากาศจากแหล่งกำเนิดฝุ่นมาจำนวนหนึ่ง อนุภาคฝุ่นที่แขวนลอยมากับกระแสอากาศจะถูกกักเก็บไว้ในอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์หาน้ำหนักและความเข้มข้นของฝุ่นได้ เมื่อทราบปริมาตรอากาศที่ถูกดูดเข้ามา โดยขั้นแรกจะประกอบหัวเก็บตัวอย่าง (Nozzle) ที่ทำจากท่อสแตนเลสไม่มีตะเข็บ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ปลายฝุ่นเอียงทำมุม 30 องศา ต่อเข้ากับอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder) ที่ทำหน้าที่ยึดกระดาษกรองสำหรับดักฝุ่นที่แขวนลอยกับอากาศ ผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Rotameter) ที่อ่านสเกลในช่วง 240 – 2400 ลิตร/ชม. เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามหลัก Isokinetic จากนั้นต่อเข้ากับขวดรูปชมพู่ และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อดูดอากาศจากแหล่งกำเนิดฝุ่นเข้าสู่ Filter holder ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงหัวเก็บตัวอย่างฝุ่น (Nozzle) และอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

- ผลของความถี่ของคลื่นเสียง, ความเร็วของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่มีต่อ

ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

จัดชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นดังแสดงตามรูปที่ 3.1 โดยใช้คอลัมน์สูง 120 cm.

3.4.1.1 เติมฝุ่นขี้เถ้าลอย (Fly ash) ลงในชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น ที่น้ำหนัก 63 กรัม

3.4.1.2 ปรับความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s

3.4.1.3 เปิดเครื่องกำเนิดความถี่ (Frequency generator) โดยตั้งค่าความถี่เท่ากับ 16 Hz

3.4.1.4 เปิดเครื่องขยายความถี่ (Amplifier) ด้วยค่าสูงสุด

3.4.1.5 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้เวลาในการเก็บ

ตัวอย่างฝุ่น 2 นาที นำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักฝุ่นและความเข้มข้นของฝุ่นพร้อมทั้งคำนวณค่า % Isokinetic

3.4.1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4.1.1 – 3.4.1.5 แต่เปลี่ยนความถี่ที่ใช้จาก 16 Hz เป็น 18 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ

3.4.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4.1.1 – 3.4.1.6 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, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ใช้กับความเข้มข้นของฝุ่นที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ผลการ Calibrate ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้ากับตัวแปรต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

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

3.4.2.2 ปรับความเร็วของอากาศเป็น 7.0 m/s เดินเครื่องอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นโดยกำหนดความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าคงที่ 0.2 g/m³

3.4.2.3 เปิดเครื่องเพอร์ริสตาลติคปั๊ม ปั๊มฟองแก๊สแอฟรอนเข้าสู่หอคูดจับด้วยความเร็ว 1.41x10³ m/s

3.4.2.4 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์เป็นเวลา 15 และ 30 นาที

3.4.2.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4.2.1 – 3.4.2.4 แต่เปลี่ยนชนิดสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จาก CTAB เป็น SDS และ Triton X-100 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ตามลำดับ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชนิดสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นตามหัวข้อ 3.4.6.1 และหาความเสถียรของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดโดยวิเคราะห์ได้จากเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลาย เป็นของเหลวซึ่งมีปริมาตรของของเหลวเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรของเหลวเริ่มต้น (Half Life) ตามหัวข้อที่ 3.4.6.2

3.4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

3.4.3.1 ผลของความเร็วของอากาศ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.2 โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ได้จากการทดลองข้างต้น แต่เปลี่ยนความเร็วของอากาศจาก 6.0 m/s เป็น 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฝุ่น

ที่ทางเข้าคงที่ 0.2 g/m^3 และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3.4.6.1

3.4.3.2 ผลของความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.2 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 3.4.6.1

3.4.3.3 ผลของความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.2 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 3.4.6.1

3.4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

3.4.4.1.1 จัดชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่นดังแสดงตามรูปที่ 3.1

3.4.4.1.2 เติมฝุ่นซีเถ้าลอย (Fly ash) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $5.81 \mu\text{m}$ ลงในชุดอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น

3.4.4.1.3 ปรับความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s

3.4.4.1.4 เดินเครื่องอุปกรณ์กำเนิดฝุ่น โดยกำหนดความเข้มข้นฝุ่นขาเข้าคงที่ 0.1 g/m^3

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

3.4.4.1.6 เก็บตัวอย่างฝุ่นที่ทางเข้าและทางออกของคอลัมน์ที่เวลา 15 และ 30 นาที

3.4.4.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4.4.1.1 – 3.4.4.1.6 แต่เปลี่ยนขนาดของอนุภาคฝุ่นเป็น $13.3 \mu\text{m}$ และ $22.5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคฝุ่นที่มีต่อการดักจับฝุ่นตามหัวข้อ 3.4.6.1

3.4.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.4 แต่เปลี่ยนชนิดของฝุ่นจาก Fly ash เป็น PVC resin และ Wheat flour ตามลำดับ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3.4.6.1

3.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.6.1 ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

วิเคราะห์ผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1[5]

$$\eta_o = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (3.1)$$

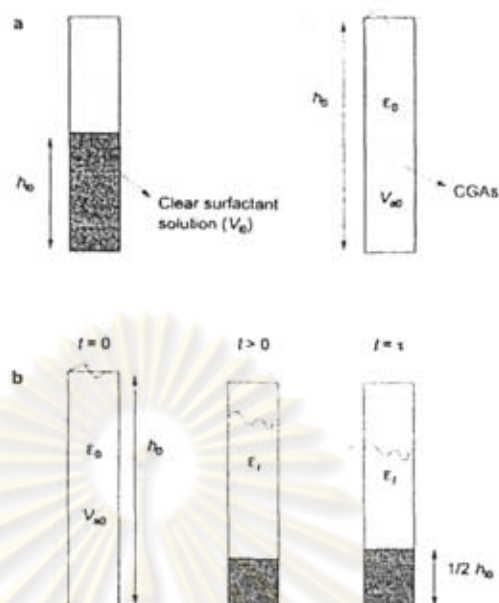
โดยที่ η_o = ประสิทธิภาพการเก็บฝุ่น

C_i = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า (g/m^3)

C_o = ความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางออก (g/m^3)

3.4.6.2 การหาครึ่งชีวิตของฟองแก๊สแอฟรอน

ในการหาความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอนจากสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ในการทดลองตอนที่ 3.4.2 สามารถเตรียมการทดลองได้ดังนี้คือ เตรียมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100, CTAB และ SDS ความเข้มข้นเท่ากับ 25.6×10^{-3} mol จำนวน 1 ลิตร จากนั้นกวนสารละลายด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ 6000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที บีบฟองแก๊สแอฟรอนใส่กระบอกตวงขนาด 100 ml ตรวจสอบความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอน โดยจับเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลว โดยมีระดับความสูงของสารละลายเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความสูงเริ่มต้น (Half Life) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการหาค่าความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอน

3.4.7 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคฝุ่นที่ทางเข้า

3.4.7.1 ร่อนคัดขนาดอนุภาคฝุ่นที่ต้องการทดลองด้วยเครื่อง Sieve Shaker ให้มีขนาดต่างๆ กัน

3.4.7.2 ต่อกท่อสายยางจากจุดเก็บตัวอย่างขาเข้าไปยังกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ซึ่งบรรจุน้ำ D.I ปริมาตร 800 ml.

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

3.4.7.4 นำตัวอย่างฝุ่นที่เก็บได้ในน้ำไปวัดขนาด ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000

3.4.7.5 หากยังไม่ได้ขนาดฝุ่นที่ต้องการ ให้ลดขนาดของอนุภาคฝุ่นด้วยเครื่องบด Ball mill จนกระทั่งได้ขนาดตามต้องการ

3.5 วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่น[5]

3.5.1 ออบกระดาษกรองเบอร์ GF/F ที่อุณหภูมิ 100 – 110 °C เป็นเวลา 2-3 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น ตำรวจความเรียบร้อยของกระดาษกรองไม่ให้มีรอยแตกหรือชำรุด

3.5.2 ชั่งน้ำหนักกระดาศกรองให้ได้ตศนิยม 4 ตำแหน่ง โดยในการชั่งไม่ควรให้กระดาศกรองสัมผัสอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเกิน 50 % นานเกิน 2 นาที

3.5.3 ทดสอบหาปริมาณการรั่วของเครื่องมือเก็บตัวอย่างก่อนดำเนินการ โดยปิดจุกที่หัวเก็บตัวอย่าง เปิดปั๊มดูดอากาศ ปริมาตรอากาศที่เก็บได้จะต้องน้อยกว่า 34.2 ลิตร/ชม. ถ้ามากกว่า แสดงว่าชุดเก็บตัวอย่างมีรอยรั่ว จะต้องทำการแก้ไขรอยรั่วเสียก่อน

3.5.4 ใช้ปากคีบคีบกระดาศกรองที่ชั่งน้ำหนักแล้วลงในอุปกรณ์สะสมอนุภาค (Filter holder)

3.5.5 ทำการเก็บตัวอย่างโดยสอดหัวเก็บตัวอย่างเข้าไปในท่อที่จุดเก็บตัวอย่าง หันหัวเก็บตัวอย่างเข้าหากระแสดูดอากาศ โดยต้องปิดช่องด้านข้างไม่ให้มีรอยรั่วเพื่อป้องกันอากาศและฝุ่นจากภายนอกไหลเข้าไปด้านใน

3.5.6 เปิดปั๊มสุญญากาศ เป็นเวลา 2 นาที พร้อมกับปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตาม Isokinetic

3.5.7 เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเสร็จแล้วให้นำหัวเก็บตัวอย่างออกมา ระวางฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่างหลุดออกมา ถอดชุด Filter holder ออก ใช้ปากคีบคีบกระดาศกรองเก็บไว้ในจานเพาะเชื้อรวมทั้งชุดฝุ่นที่เกาะอยู่ภายใน Filter holder ลงไปด้วย

3.5.8 ล้างฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่างด้วยอะซิโตนจนได้อะซิโตนใสออกมา

3.5.9 นำกระดาศกรองที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100-110 °C เป็นเวลา 2-3 ชม. ทิ้งไว้ให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาศกรองให้ได้ตศนิยม 4 ตำแหน่ง โดยน้ำหนักกระดาศกรองหลังการเก็บตัวอย่างฝุ่นลบด้วยน้ำหนักกระดาศกรองเริ่มต้นจะได้น้ำหนักของตัวอย่างฝุ่นที่เก็บได้

3.5.10 ระเหยอะซิโตนที่ใช้ล้างฝุ่นในหัวเก็บตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักหาปริมาณฝุ่นที่ค้างอยู่ในหัวเก็บตัวอย่าง

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

3.5.12 ผลรวมของน้ำหนักฝุ่นที่เก็บได้จากข้อ 3.5.9 และข้อ 3.5.10 จะเป็นน้ำหนักฝุ่นทั้งหมดที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง

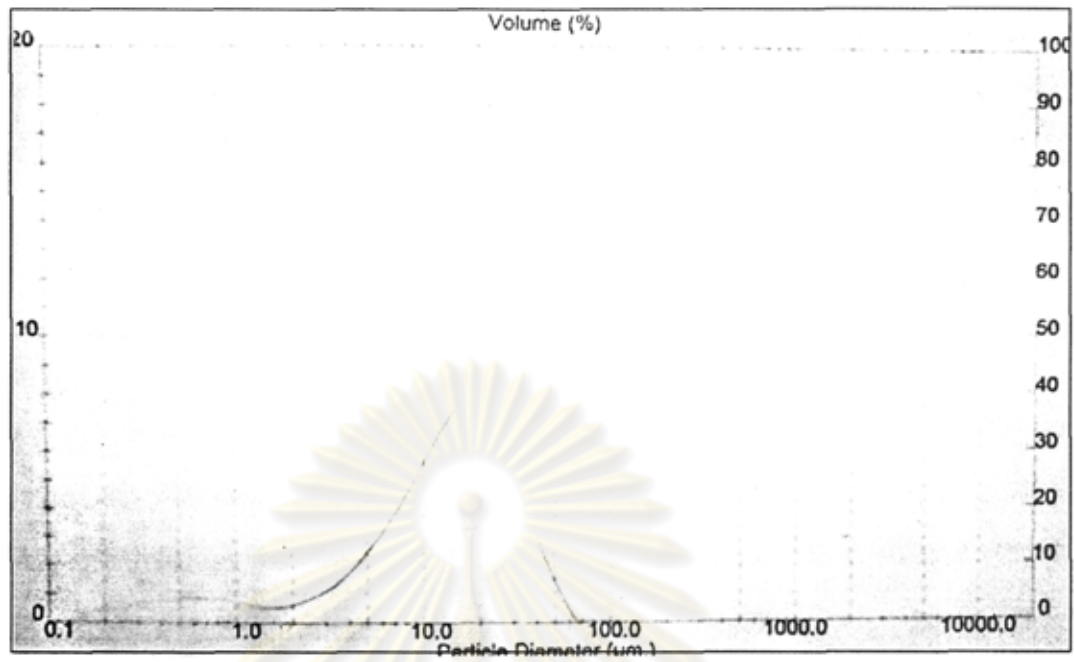
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

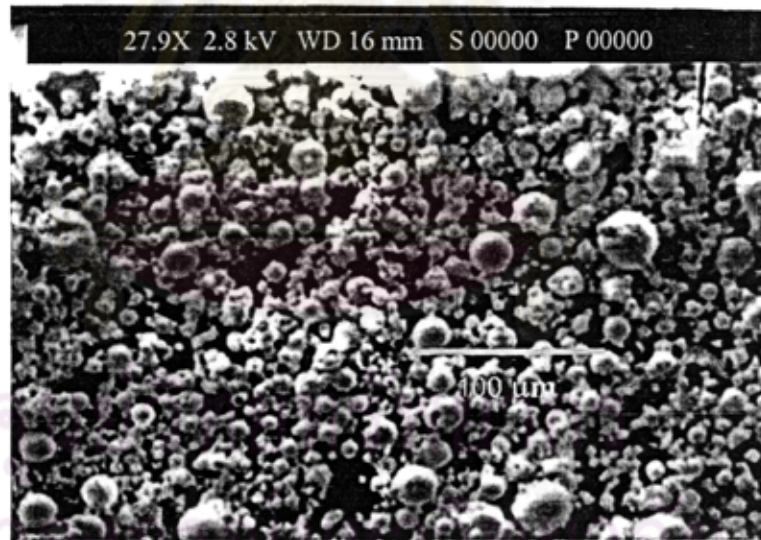
การทดลองในตอนๆที่ 3.4.1 – 3.4.3 จะใช้ Fly ash ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นตัวแทนของอนุภาคฝุ่นในอากาศ ซึ่งอนุภาคที่ใช้เป็นแบบ poly disperse โดยได้ทำการวัดขนาดอนุภาคฝุ่นและการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นด้วยเครื่อง particle size analysis พบว่าอนุภาคกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.12 – 52.68 μm และขนาดอนุภาคส่วนใหญ่คือ 15.97 μm ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 โดยลักษณะอนุภาค fly ash มีลักษณะเป็นทรงกลม เมื่อถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 4.2 โดยทดลองเก็บตัวอย่างฝุ่นที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 20 นาที, 30 นาทีและ 40 นาทีตามลำดับ สร้างกราฟแสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เก็บได้ที่เวลาต่างๆกัน พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นก่อนข้างลงในช่วงเวลา 0-30 นาทีและเมื่อดำเนินการทดลองต่อไปจนถึง 40 นาที พบว่าความเข้มข้นฝุ่นเริ่มลดลง ดังแสดงในกราฟที่ 4.3 เนื่องจากการทดลองนี้เป็น การทดลองแบบ Batch ซึ่งในระหว่างการทดลองไม่มีการเติมฝุ่นอีก ปริมาณฝุ่นจึงลดลงส่งผลให้ ความเข้มข้นฝุ่นลดลงด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปของงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดลองจะ ดำเนินการทดลอง 30 นาทีต่อการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของฝุ่น (Fly ash) ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

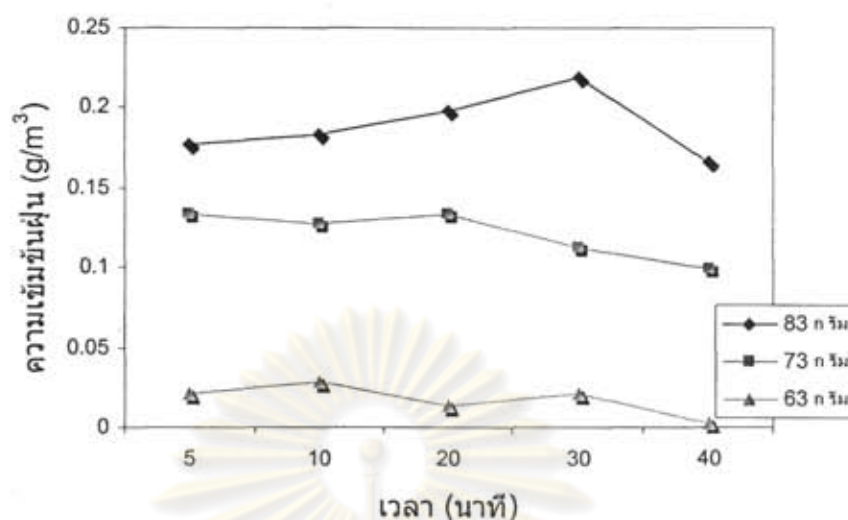
Size Low (μm)	In %	Size High (μm)	Under%	Size Low (μm)	In %	Size High (μm)	Under%
0.05	0.00	0.12	0.01	2.83	1.63	3.45	14.14
0.12	0.18	0.15	0.19	3.49	2.26	4.30	16.40
0.15	0.37	0.19	0.55	4.30	3.09	5.29	19.49
0.19	0.55	0.23	1.10	5.29	4.15	6.52	23.64
0.23	0.72	0.28	1.82	6.52	5.42	8.04	29.05
0.28	0.88	0.35	2.70	8.04	6.84	9.91	35.89
0.35	1.02	0.43	3.71	9.91	8.31	12.21	44.20
0.43	1.12	0.53	4.83	12.21	9.67	15.04	53.87
0.53	1.17	0.65	6.00	15.04	10.63	18.54	64.50
0.65	1.14	0.81	7.14	18.54	10.76	22.84	75.25
0.81	1.02	1.00	8.16	22.84	9.59	28.15	84.84
1.00	0.85	1.23	9.00	28.15	7.30	34.69	92.14
1.23	0.71	1.51	9.72	34.69	4.65	42.75	96.79
1.51	0.72	1.86	10.44	42.75	2.42	52.68	99.22
1.86	0.88	2.30	11.33	52.68	0.78	64.92	99.99
2.30	1.18	2.83	12.51	64.92	0.00	80.00	100.00



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟการกระจายตัวของอนุภาค Fly ash



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะอนุภาค Fly ash ด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เวลาต่างๆ เมื่อความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s ความถี่ 16 Hz และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม

4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

การทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นฝุ่นสามารถแบ่งได้ 3 ตัวแปร คือ ความถี่ของคลื่นเสียง, ความเร็วของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น การทดลองในคอนนี้จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทั้ง 3 ตัวแปรเพื่อนำมาใช้ในการ Calibrate ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าเบื้องต้นสำหรับการทดลองขั้นต่อไป โดยความถี่คลื่นเสียงที่ใช้เท่ากับ 16 Hz, 18 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มหรือลดความถี่ต่างจากช่วงนี้ พบว่าลำโพงไม่สามารถส่งเสียงให้ฝุ่นฟุ้งได้ ความเร็วของอากาศเท่ากับ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นคือ 63 กรัม, 73 กรัมและ 83 กรัม ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าได้ดังนี้

- ผลของความถี่ของคลื่นเสียง จากตารางที่ 4.2 สามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นที่เก็บ ได้กับความถี่และความเร็วของอากาศที่เปลี่ยนไปที่น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นคงที่ 73 กรัม ดังกราฟที่ 4.4 พบว่าเมื่อความถี่ของคลื่นเสียงเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นฝุ่นที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศที่พาฝุ่นเข้าคอลัมน์ เนื่องจากอัตราการสั่นของลำโพงจากการเปลี่ยนแปลงความถี่คลื่นเสียงมีผลต่อการฟุ้งของฝุ่นน้อยมาก ดังนั้นความถี่ของคลื่นเสียงจึงไม่มีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า

- ผลของความเร็วของอากาศ จากกราฟที่ 4.5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศมากขึ้น จะส่งผลให้ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้ามากขึ้นไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจะส่งผลให้ลมดูดที่ท่อสามทางพาฝุ่นเข้าคอถัมน์ได้มากขึ้น ความเข้มข้นฝุ่นจึงเพิ่มขึ้น

- ผลของน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความเข้มข้นฝุ่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มน้ำหนักฝุ่นหรือปริมาณฝุ่นเริ่มต้น ทำให้สัดส่วนของฝุ่นที่ถูกสั่นจนฟุ้งขึ้นมาและถูกพาเข้าคอถัมน์มีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่น้อยกว่า ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าจึงมากขึ้น

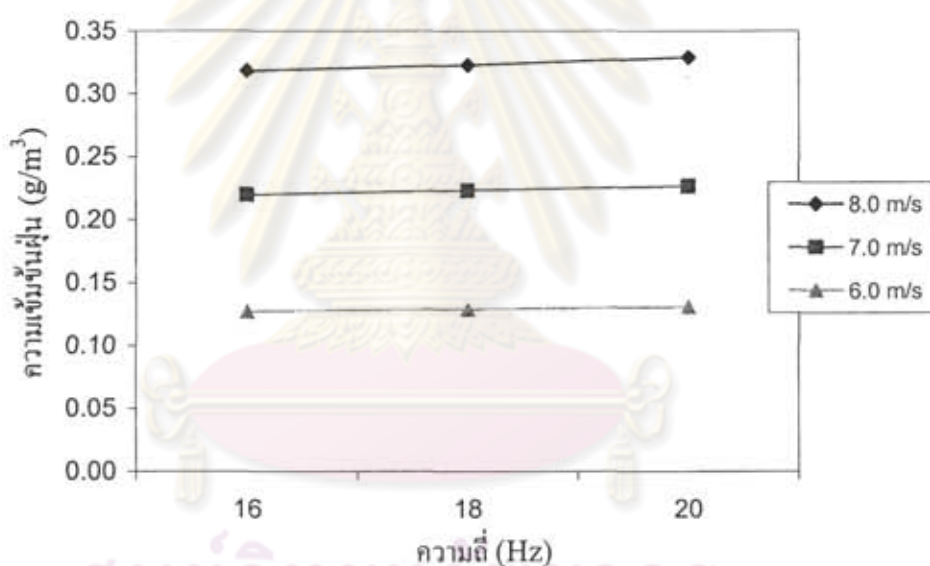
ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นฝุ่นที่เปลี่ยนไปเมื่อน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเปลี่ยนไป ที่ความถี่ 20 Hz และสามารถสร้างกราฟได้ดังรูปที่ 4.6 โดยพบว่าความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าจะมีค่าอยู่ในช่วง $0.02 \pm 0.002 \text{ g/m}^3$ ถึง $0.4 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$ และจากผลการทดลองที่สรุปได้ว่า ความถี่ของคลื่นเสียงไม่มีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นทางเข้า ดังนั้นในการปรับค่าความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าสำหรับการทดลองตอนต่อๆ ไปจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นเท่านั้น โดยในการทดลองตอนต่อไปจะเลือกใช้ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าที่ $0.1 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$, $0.2 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$ และ $0.3 \pm 0.02 \text{ g/m}^3$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ความถี่, อัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ค่าต่างๆ

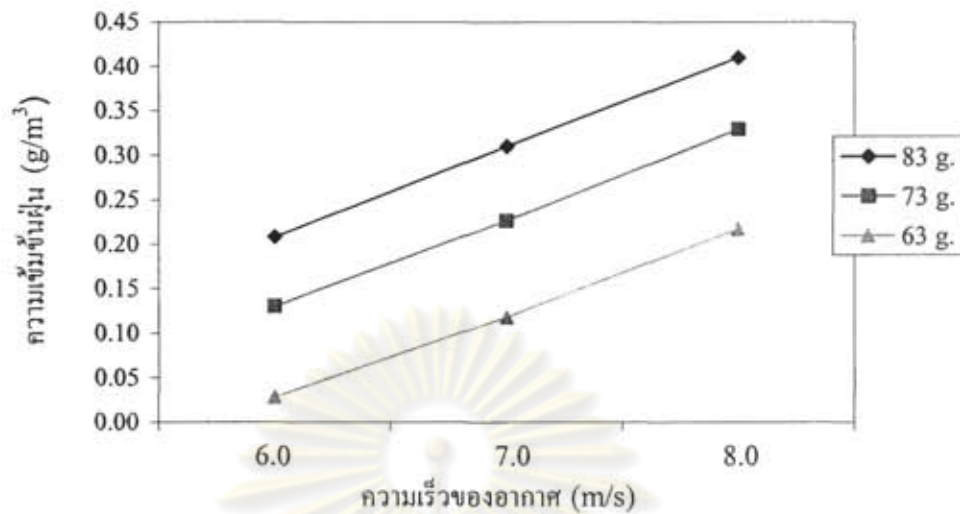
น้ำหนักฝุ่น (กรัม)	ความเร็วของอากาศ (m/s)	ความถี่ (Hz)		
		16	18	20
63	6.0	0.0212	0.0229	0.0282
	7.0	0.1000	0.1150	0.1183
	8.0	0.2082	0.2128	0.2173
73	6.0	0.1271	0.1288	0.1306
	7.0	0.2200	0.2233	0.2267
	8.0	0.3184	0.3230	0.3291
83	6.0	0.1941	0.2029	0.2082
	7.0	0.3050	0.3067	0.3100
	8.0	0.3888	0.4056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

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3) ที่ได้จากการ Calibrate เบื้องต้น เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ที่ความถี่คงที่ 20 Hz

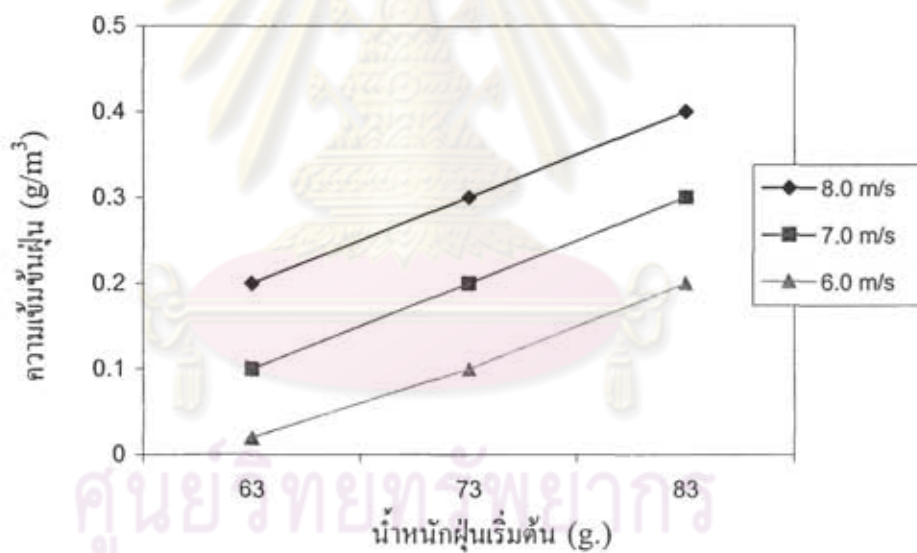
ความเร็วของอากาศ (m/s)	น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น (กรัม)		
	63	73	83
6.0	0.020 ± 0.002	0.10 ± 0.02	0.20 ± 0.02
7.0	0.10 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.30 ± 0.02
8.0	0.20 ± 0.02	0.30 ± 0.02	0.40 ± 0.02



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มข้นฝุ่น ที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 73 กรัม



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอากาศและความเข้มข้นฝุ่น ที่น้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น 63 กรัม, 73 กรัม และ 83 กรัม ความถี่ 20 Hz.



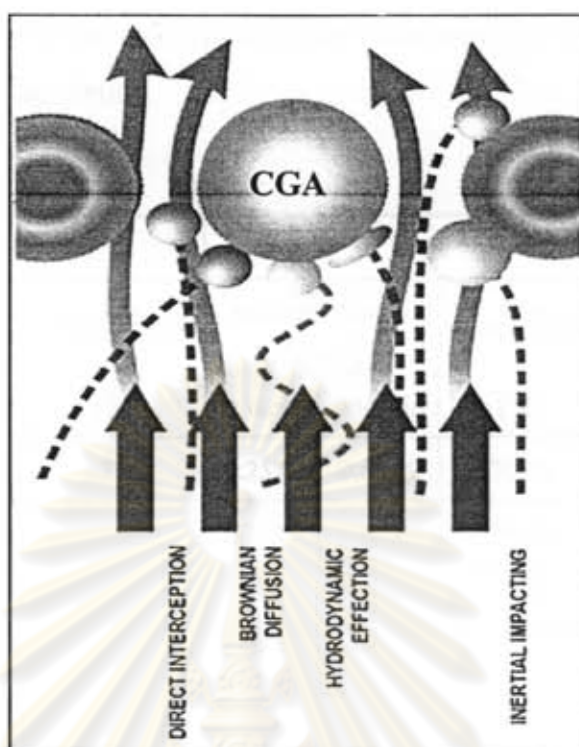
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นที่ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s, 7.0 m/s และ 8.0 m/s และน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นที่ 63 กรัม, 73 กรัม และ 83 กรัม ที่ความถี่คงที่ 20 Hz

4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

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 1.41×10^{-3} m/s ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 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 โดยจะเกิดการจับได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอนุภาคฝุ่นตั้งอยู่ภายในช่วงรัศมีของฟองแก๊สแอฟรอน
- กลไกแบบ Inertial impacting มีลักษณะคือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นจะไม่เท่ากับความหนาแน่นของฟองแก๊สแอฟรอน โดยจะมากกว่าฟองแก๊สแอฟรอนและไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศซึ่งอนุภาคอาจพุ่งไปติดที่ด้านอีกด้านหนึ่งของฟองแก๊สได้ ซึ่งเมื่อฝุ่นมีขนาดใหญ่เมื่อรวมตัวกับฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดการจับตัวกัน ทำให้อนุภาคฝุ่นจะมีน้ำหนักมาก ขึ้นส่วนฟองแก๊สแอฟรอนจะแตกออกและตกลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์พร้อมกัน
- กลไก Brownian diffusion กลไกแบบนี้จะเกิดกับฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ ไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศและมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ random ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากนี้ อาจถูกอากาศพาออกไปจากคอลัมน์ก่อนที่จะมีการสัมผัสกับฟองแก๊สแอฟรอนได้อย่างเต็มที่ ขณะที่ภายในคอลัมน์เกิด Channeling effect จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นขนาดเล็กมีค่าลดลง
- กลไกแบบ Hydrodynamic effect โดยกลไกลักษณะการจับแบบนี้จะเกิดกับอนุภาคที่มีลักษณะการไหลไม่แน่นอน ไม่ไหลไปตามกระแสอากาศ อาจเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของฟองแก๊ส และอนุภาคไม่เป็นทรงกลม



รูปที่ 4.7 แสดงกลไกการจับฝุ่นฟองแก๊สแอฟรอน

เมื่อศึกษาถึงความเสถียรของฟองแก๊สแอฟรอนแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเสถียรได้จากเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลวซึ่งมีปริมาตรของของเหลวเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรของเหลวเริ่มต้น (Half Life) ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol เท่ากันพบว่า สารลดแรงดึงผิวชนิด SDS มีความเสถียรมากที่สุด คือมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.50 นาที รองลงมาคือ Titron X-100 และ CTAB ที่มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.07 และ 2.00 นาทีตามลำดับดังตารางที่ 4.6 และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 20x ภายในระยะเวลาไม่เกิน 3 นาทีหลังจากการกวนดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า ขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนที่ใช้สารลดแรงดึงผิวทั้ง 3 ชนิด มีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือประมาณ 75-90 μm และเมื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของสารลดแรงดึงผิวทั้ง 3 ชนิด พบว่า CTAB ที่มีประจุเป็นบวกมีเสถียรภาพต่ำที่สุด

แต่จากผลการทดลองที่แสดงว่าชนิดของสารลดแรงดึงผิวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน โดยอิทธิพลของกลไกการชนระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอนมีมากกว่าแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ดังนั้นในการทดลองตอนต่อไปจึงเลือกใช้สารลดแรงดึงผิวชนิด Non-ionic หรือ Titron X-100 มาใช้ผลิตฟองแก๊สแอฟรอนเพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ในตอนต่อไป

ตารางที่ 4.4 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 (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	0.1800	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 4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS, Titron X-100 และ CTAB เปรียบเทียบกัน

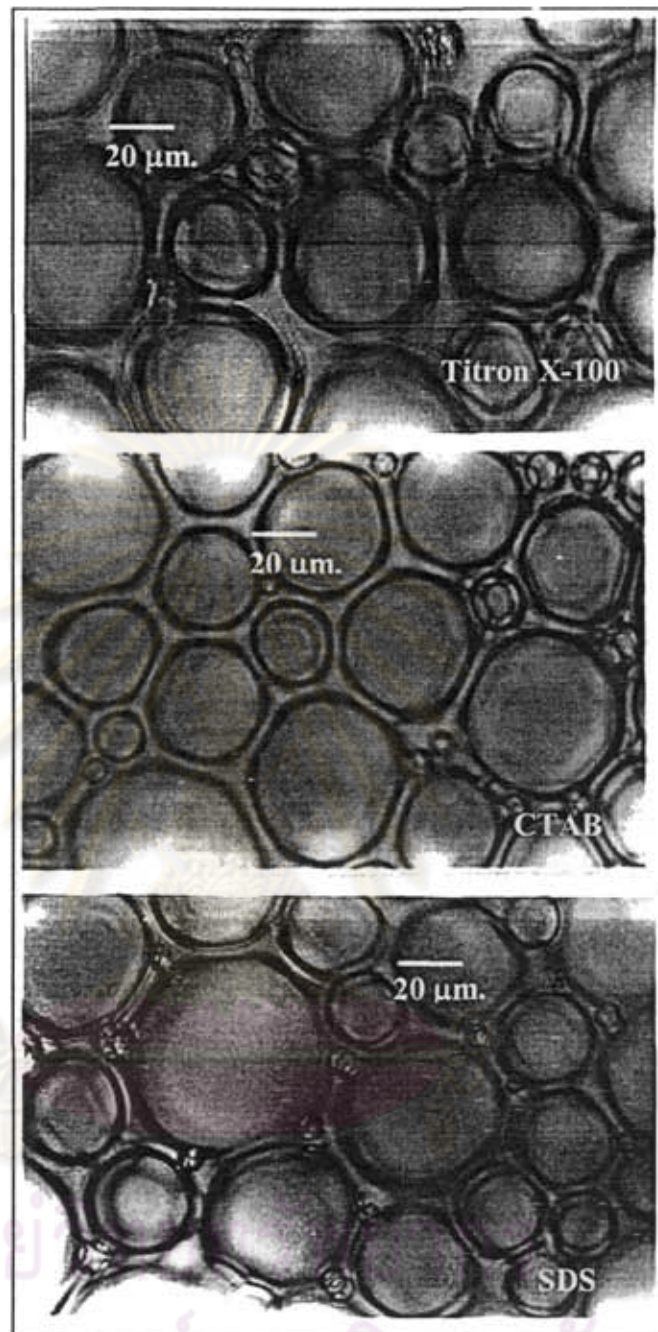
ครั้งที่	Titron X-100	CTAB	SDS
1	75.21	73.71	74.78
2	77.43	75.11	75.11
เฉลี่ย	76.32	74.41	74.94

ตารางที่ 4.6 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



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 แสดงขนาดของฟองแก๊สแอพรอนเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว Titron X-100, CTAB และ SDS ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol

4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊ส

แอฟรอน

การทดลองในตอนนี้จะศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเร็วของอากาศ, ความเข้มข้นของฝุ่นทางเข้าและความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน

4.3.1 ผลของความเร็วของอากาศ

กราฟรูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนความเร็วของอากาศจาก 6.0 m/s เป็น 7.0 m/s และ 8.0 m/s ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคงที่ 0.2 g/m^3 ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ จากกราฟพบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วของอากาศมากขึ้น ทำให้อากาศพาอนุภาคฝุ่นออกไปจากคอลัมน์ได้เร็วขึ้น เวลาในการสัมผัสกันระหว่างฟองแก๊สแอฟรอนและฝุ่นมีน้อยลงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นจึงน้อยลงด้วย และเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศให้สูงขึ้นพบว่าภายในคอลัมน์จะเกิด channeling effect มากกว่าที่ความเร็วของอากาศต่ำๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับลดลงด้วยเช่นกัน โดยประสิทธิภาพในการดักจับลดลงจาก 79.20% เป็น 75.34% และ 69.50% ที่ความเร็วฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ 78.55%, 84.61% และ 73.36% ที่ความเร็วฟองแก๊สแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ตามลำดับดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

การทดลองตอนนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 3 ค่า คือ 0.1 g/m^3 , 0.2 g/m^3 และ 0.3 g/m^3 ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้ามากขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากที่ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนคงที่ ปริมาณฟองแก๊สแอฟรอนเท่าเดิม พื้นที่ผิวในการดักจับอนุภาคฝุ่นจึงยังคงเท่าเดิมด้วย แต่เมื่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์ขึ้น โอกาสที่อนุภาคฝุ่นจะออกจากคอลัมน์โดยไม่ถูกดักจับด้วยฟองแก๊สแอฟรอนจึงมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนลดน้อยลง โดยลดลงจาก 80.22% เป็น 75.34% และ 70.50% ที่ความเร็วฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ และ 86.19%, 83.77% และ 79.11% ที่ความเร็วฟองแก๊สแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

4.3.3 ผลของความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน

กราฟรูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนจาก 1.41×10^{-3} m/s เป็น 2.12×10^{-3} m/s และ 2.82×10^{-3} m/s ตามลำดับ

พบว่าเมื่อความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นจะเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากฟองแก๊สแอฟรอนจะถูกบีบเข้าสู่คอลัมน์มากขึ้น ในขณะที่เวลาในการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคฝุ่นกับฟองแก๊สแอฟรอนในคอลัมน์ซึ่งถูกควบคุมโดยความเร็วของอากาศยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนมากขึ้น จึงสามารถดักจับฝุ่นได้มากขึ้นตาม โดยประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นที่ดีที่สุดคือ 94.96% ที่ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 2.82×10^{-3} m/s และความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3 โดยเพิ่มขึ้นจาก 80.22% เป็น 89.77% และ 94.96% และเพิ่มจาก 74.27% เป็น 84.61% และ 91.82% ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.2 g/m^3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของอากาศ ที่ความเข้มข้นฝุ่น 0.2 g/m^3 ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 1.41×10^{-3} m/s

ครั้งที่	ความเร็วอากาศ 6.0 m/s			ความเร็วอากาศ 7.0 m/s			ความเร็วอากาศ 8.0 m/s		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.1835	0.0424	76.92	0.2265	0.0551	75.68	0.1960	0.0633	67.70
2	0.1906	0.0353	81.48	0.1837	0.0459	75.00	0.1844	0.0535	71.00
เฉลี่ย			79.20			75.34			69.35

ตารางที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของอากาศ ที่ความเข้มข้นฝุ่น
 0.2 g/m^3 ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

ครั้งที่	ความเร็วอากาศ 6.0 m/s			ความเร็วอากาศ 7.0 m/s			ความเร็วอากาศ 8.0 m/s		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.1906	0.0212	88.89	0.1837	0.0276	85.00	0.2020	0.0490	75.76
2	0.2047	0.0282	86.21	0.2327	0.0367	84.21	0.1898	0.0551	70.97
เฉลี่ย			87.55			84.61			73.36

ตารางที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า ที่ความเร็วของ
 อากาศ 7.0 m/s ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

ครั้งที่	ความเข้มข้นฝุ่น 0.1 g/m^3			ความเข้มข้นฝุ่น 0.2 g/m^3			ความเข้มข้นฝุ่น 0.3 g/m^3		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.0857	0.0154	82.00	0.2082	0.0551	73.53	0.3122	0.0864	72.32
2	0.0796	0.0172	78.43	0.1837	0.0459	75.00	0.2816	0.0961	65.89
เฉลี่ย			80.22			74.27			69.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 2.12×10^{-3} m/s

ครั้งที่	ความเข้มข้นฝุ่น 0.1 g/m^3			ความเข้มข้นฝุ่น 0.2 g/m^3			ความเข้มข้นฝุ่น 0.3 g/m^3		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.0918	0.0122	86.67	0.1837	0.0306	83.33	0.2749	0.0551	79.96
2	0.1286	0.0184	85.71	0.2327	0.0367	84.21	0.2816	0.0612	78.26
เฉลี่ย			86.19			83.77			79.11

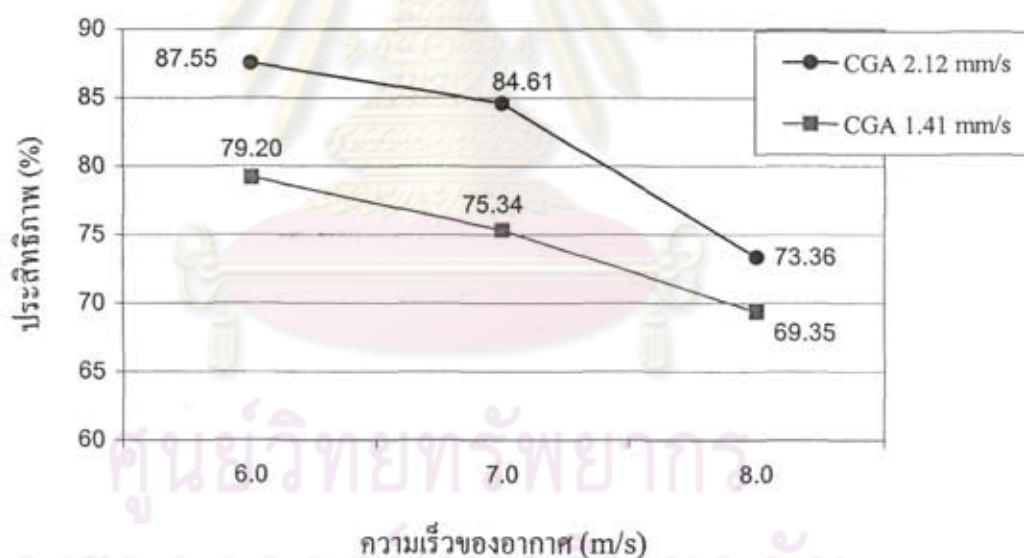
ตารางที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3

ครั้งที่	ความเร็วแอฟรอน $1.41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$			ความเร็วแอฟรอน $2.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$			ความเร็วแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.0857	0.0154	82.00	0.0918	0.0122	86.67	0.1224	0.0061	95.00
2	0.0796	0.0172	78.43	0.1286	0.0184	85.71	0.1163	0.0061	94.74
เฉลี่ย			80.22			86.19			94.87

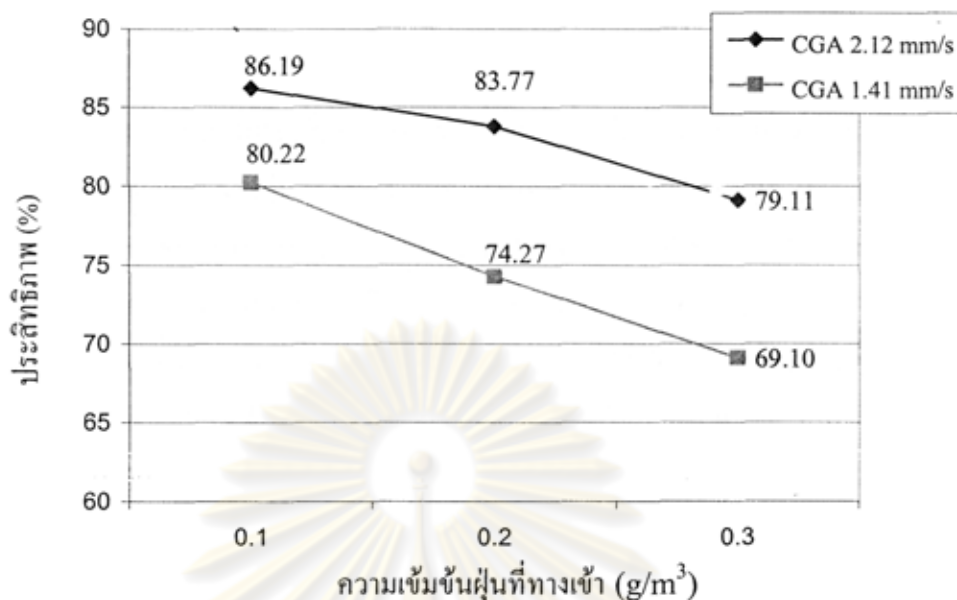
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน ที่ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.2 g/m³

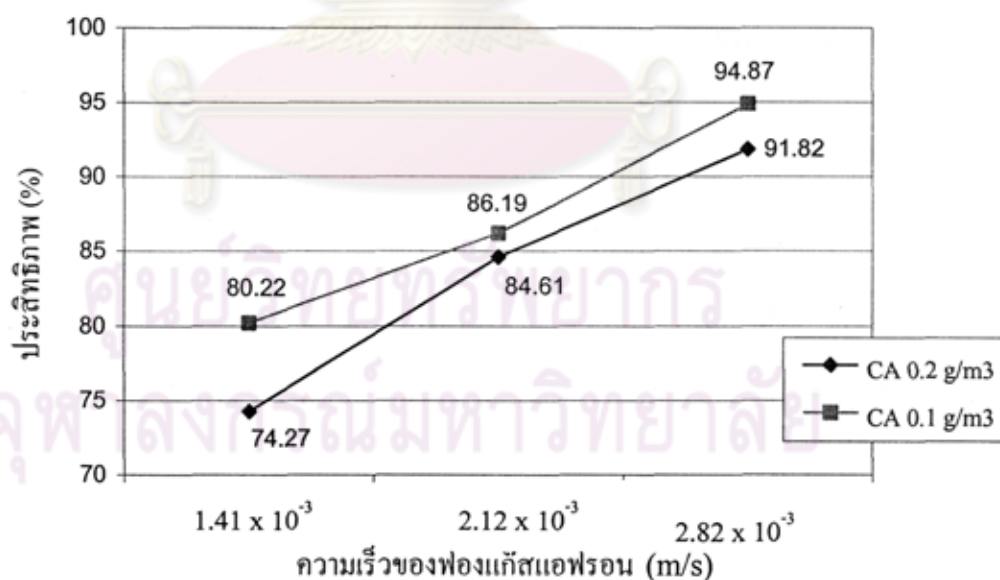
ครั้งที่	ความเร็วแอฟรอน 1.41x10 ⁻³ m/s			ความเร็วแอฟรอน 2.12x10 ⁻³ m/s			ความเร็วแอฟรอน 2.82x10 ⁻³ m/s		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m ³)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.2082	0.0551	73.53	0.1837	0.0276	85.00	0.2265	0.0245	89.19
2	0.1837	0.0459	75.00	0.2327	0.0367	84.21	0.2204	0.0122	94.44
เฉลี่ย			74.27			84.61			91.82



รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อความเร็วของอากาศต่างๆ ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.2 g/m³ ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 1.41x10⁻³ m/s และ 2.12x10⁻³ m/s



รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าต่างๆ ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 1.41×10^{-3} m/s และ 2.12×10^{-3} m/s



รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนที่ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอนต่างๆ ความเร็วของอากาศ 7.0 m/s ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3 และ 0.2 g/m^3

4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

การทดลองในส่วนนี้จะศึกษาถึงขนาดอนุภาคฝุ่นที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับด้วยฟองแก๊สแอฟรอน โดยอนุภาคฝุ่นที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Fly ash ชั้นแรกนำ Fly ash ไปร่อนแยกคัดขนาดให้มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ขนาด ด้วย Sieve shaker จากนั้นนำ Fly ash ที่แยกขนาดแล้วไปวิเคราะห์หาขนาดของฝุ่นที่แท้จริงที่เข้าไปยังเครื่องดักจับฝุ่น โดยทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคของฝุ่นที่ทางเข้าของคอลัมน์ ด้วยการต่อสายยางจากจุดเก็บตัวอย่างไปยังกระบอกควงที่บรรจุน้ำ D.I. ปริมาตร 800 ml. เปิดเครื่องกำเนิดฝุ่นและคอมเพรสเซอร์ เป็นเวลา 30 นาที อนุภาคฝุ่นจะถูกอากาศพาไปยังกระบอกควงและถูกเก็บอยู่ในน้ำ จากนั้นนำน้ำที่มีฝุ่นอยู่ไปวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 พบว่าอนุภาคฝุ่นที่แยกได้มีขนาดต่างกันดังนี้ คือ

- อนุภาคในช่วง 1.137 – 13.669 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 5.815 μm
- อนุภาคในช่วง 3.406 – 30.975 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 13.308 μm
- อนุภาคในช่วง 6.763 – 78.842 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยคือ 22.567 μm

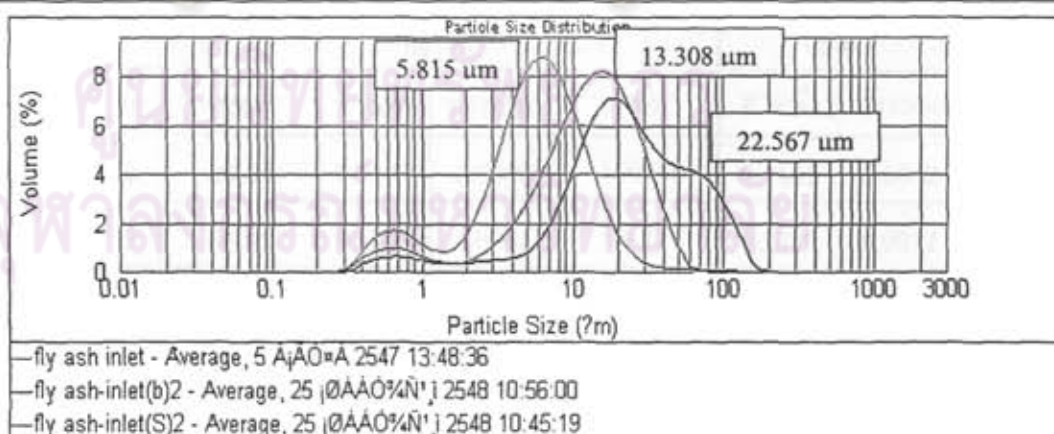
ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนขนาดของฝุ่นแสดงดังตารางที่ 4.13 และกราฟรูปที่ 4.13 ที่ความเร็วลม 6.0 m/s, ความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน 2.82×10^{-3} m/s และความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าเท่ากับ 0.1 g/m³ จากตารางพบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นเมื่อฝุ่นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.815 μm มีค่าเท่ากับ 86.96% , ฝุ่นอนุภาคเฉลี่ย 13.308 μm มีค่าเท่ากับ 97.06% และประสิทธิภาพการดักจับเท่ากับ 97.61% เมื่อฝุ่นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 22.567 μm เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนขนาดอนุภาคพบว่าประสิทธิภาพค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 85-99% โดยเฉพาะฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคมากกว่า 10 μm ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นมากถึง 96-99% ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 μm ประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 84-89%

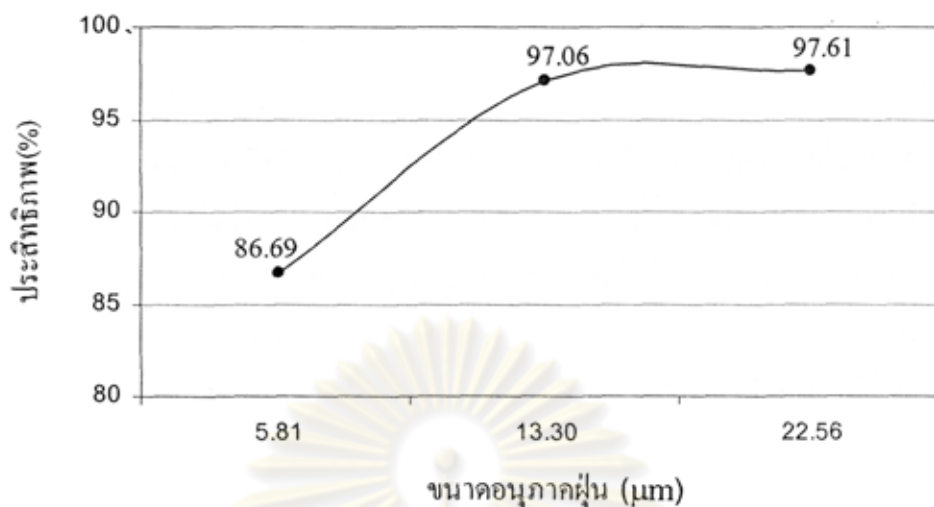
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนนั้น แสดงให้เห็นว่ากลไกในการดักจับฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนไม่ได้ขึ้นอยู่กับกลไกแบบผลของไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic effect) เป็นหลักเพียงอย่างเดียว โดยมีกลไกแบบอื่นร่วมด้วย ได้แก่ กลไกการสกัดโดยตรง (Direct interception) ระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอน และกลไก Inertia impacting [12] ระหว่างฝุ่นและของเหลว, กลไกการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และอิทธิพลของไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic effect) ซึ่งกลไกแต่ละกลไกก็จะมีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคที่มันชนด้วย

เช่น เมื่ออนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ชนกับฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดกลไกแบบ Inertial impacting มีลักษณะคือ ความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นจะไม่เท่ากับความหนาแน่นของฟองแก๊สแอฟรอน โดยจะมากกว่าฟองแก๊สแอฟรอน และไม่เคลื่อนไปตามกระแสอากาศซึ่งอนุภาคอาจพุ่งไปติดที่ด้านอีกด้านหนึ่งของฟองแก๊สได้ ซึ่งเมื่อฝุ่นมีขนาดใหญ่เมื่อรวมตัวกับฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดการจับตัวกัน ทำให้อนุภาคฝุ่นจะมีน้ำหนักมาก ขึ้นส่วนฟองแก๊สแอฟรอนจะแตกออกและตกลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์พร้อมกัน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึงปานกลางใกล้เคียงกับขนาดฟองแก๊สแอฟรอนจะเกิดกลไกแบบ Direct interception โดยมีลักษณะคือ อนุภาคฝุ่นจะเคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศ เมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคฝุ่นและฟองแก๊สแอฟรอน อนุภาคฝุ่นจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของฟองแก๊สแอฟรอนและถูกพาออกจากคอลัมน์พร้อมฟองแก๊สแอฟรอน โดยจะเกิดการจับได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอนุภาคฝุ่นต้องอยู่ภายในช่วงรัศมีของฟองแก๊สแอฟรอน แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ จะไม่เคลื่อนที่ไปตามกระแสอากาศและมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ random และเกิดกลไกการจับแบบ Brownian diffusion ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากนี้ อาจถูกอากาศพาออกไปจากคอลัมน์ก่อนที่จะมีการสัมผัสกับฟองแก๊สแอฟรอนได้อย่างเต็มที่ ขณะที่ภายในคอลัมน์เกิด Channeling effect จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นขนาดเล็กมีค่าลดลง ส่วนกลไกแบบ Hydrodynamic effect จะเกิดกับอนุภาคที่มีลักษณะการไหลไม่แน่นอน ไม่ไหลไปตามกระแสอากาศ อาจเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของฟองแก๊ส และอนุภาคไม่เป็นทรงกลม

Concentration: 0.0086 %Vol	Span : 2.072	Uniformity: 0.639	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.16 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.193 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 15.602 um	
d(0.1): 3.406 um	d(0.5): 13.308 um	d(0.9): 30.975 um	



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Fly ash ขนาดต่างๆ ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000



รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนขนาดอนุภาคฝุ่น (Fly ash) ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

ตารางที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนขนาดของฝุ่น (Fly ash) ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

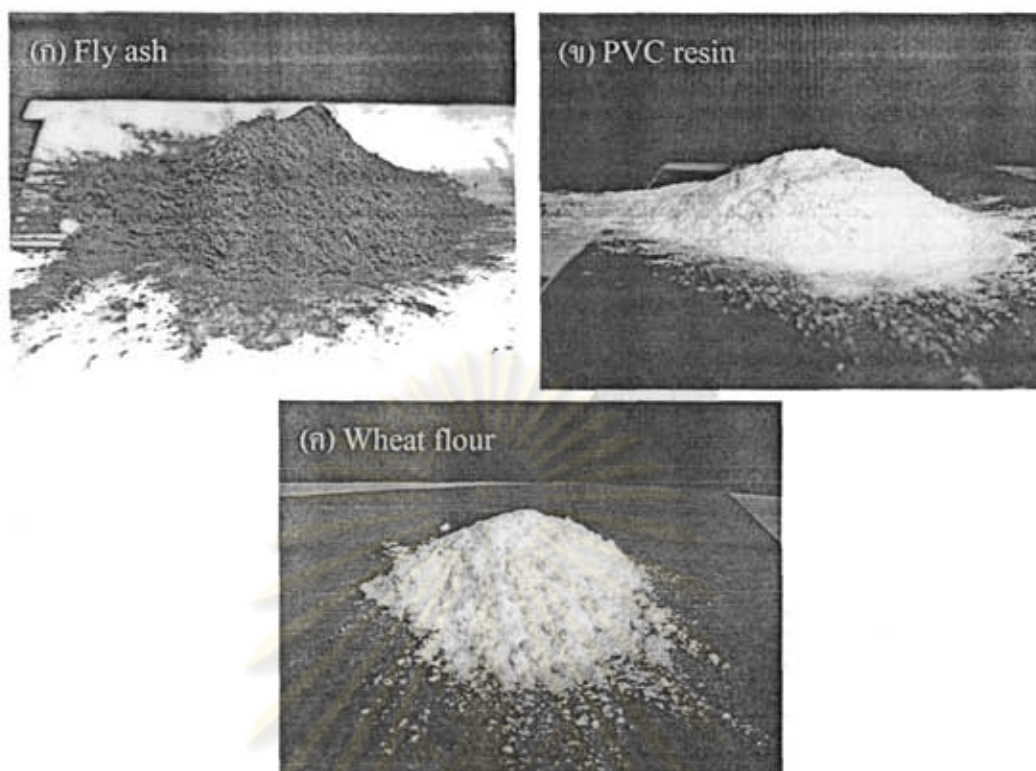
ครั้งที่	ขนาดอนุภาคฝุ่นเฉลี่ย $5.81 \mu\text{m}$			ขนาดอนุภาคฝุ่นเฉลี่ย $13.308 \mu\text{m}$			ขนาดอนุภาคฝุ่นเฉลี่ย $22.567 \mu\text{m}$		
	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
	ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
1	0.1306	0.0151	88.44	0.1347	0.0000	100.00	0.1102	0.0042	96.19
2	0.0857	0.0129	84.95	0.1041	0.0061	94.12	0.1230	0.0012	99.02
เฉลี่ย			86.69			97.06			97.61

4.5 การศึกษาชนิดของฝุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนที่มีต่อฝุ่นชนิดต่างๆ จากแหล่งอุตสาหกรรม ซึ่งฝุ่นที่เกิดจากแหล่งอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น ฝุ่นชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic dust), ฝุ่นชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic dust) โดยในการทดลองนี้จะนำ PVC resin ชนิด emulsion เป็นตัวแทนของฝุ่นชนิดไฮโดรโฟบิก และใช้ Wheat flour เป็นตัวแทนของฝุ่นชนิดไฮโดรฟิลิก เปรียบเทียบกับ Fly ash ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก), (ข) และ (ค)

โดยทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคของฝุ่น PVC และ Wheat flour ที่ทางเข้าของคอลัมน์เหมือนการทดลองส่วนแรก จากนั้นวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 พบว่าอนุภาคของ PVC กระจายตัวอยู่ในช่วง 2.324 – 39.084 μm และขนาดอนุภาคเฉลี่ยส่วนใหญ่คือ 14.994 μm และอนุภาคของ Wheat flour กระจายตัวอยู่ในช่วง 6.776 – 27.679 μm และขนาดอนุภาคเฉลี่ยส่วนใหญ่คือ 15.091 μm ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ PVC และ Wheat flour กับ Fly ash ที่ใช้ในการทดลองคอนแรก ซึ่งมีอนุภาคในช่วง 3.406 – 30.975 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.308 μm แสดงดังรูปที่ 4.15

เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของ Fly ash, PVC และ Wheat flour ที่วัดด้วยเครื่อง Zeta potential ของ Malvern DST, ver.4 พบว่าเมื่อลากเส้นตัดเพื่อหาค่า pH ของสารละลายไปตัดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 0 mV. ของฝุ่นทั้ง 3 ชนิด. ค่า pH จะเท่ากับ 4.84, 6.58 และมีค่าเข้าใกล้ 0 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Wheat flour มีประจุลบมากที่สุด รองลงมาคือ fly ash และ PVC เนื่องจากสารละลายที่มีค่า pH ต่ำ จำนวนโปรตรอนจะมีจำนวนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอน (ประจุบวกมาก) ดังนั้นในการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 0 จึงต้องใช้จำนวนอิเล็กตรอน (ประจุลบ) ไปจับกับโปรตรอน สารละลายจึงจะแสดงอำนาจเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อ pH ยิ่งต่ำ สารละลายนั้นจึงต้องการประจุลบมาก จึงแสดงอำนาจเป็นลบทางไฟฟ้ามาก และที่ pH สูง จะแสดงอำนาจเป็นลบทางไฟฟ้าน้อยลง

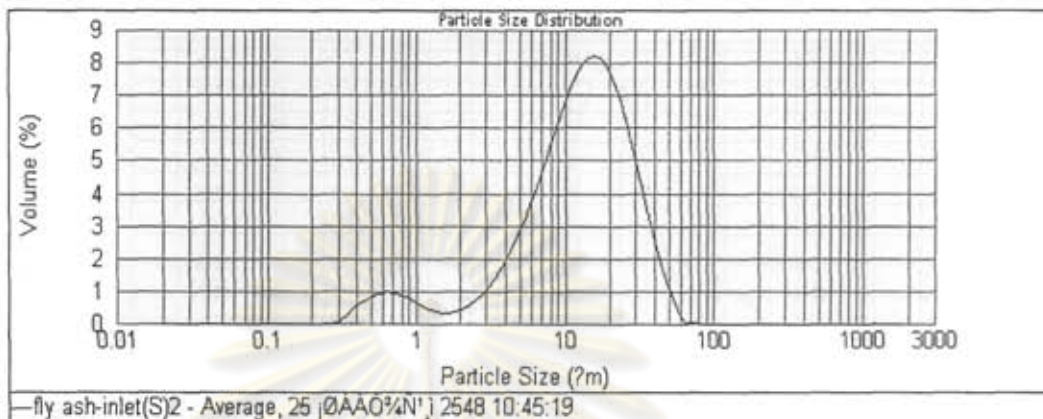


รูปที่ 4.14 (ก) Fly ash, (ข) PVC resin และ (ค) Wheat flour

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Fly ash

Concentration: 3.0086 %Vol	Span : 2.072	Uniformity: 0.639	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.16 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.193 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 15.602 um	
d(0.1): 3.406 um	d(0.5): 13.308 um	d(0.9): 30.975 um	



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.43	11.482	6.92	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.229	0.33	13.183	7.28	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.495	0.29	15.136	7.38	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.31	17.378	6.74	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.39	19.953	6.00	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.54	22.909	5.07	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.74	26.303	4.02	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.02	2.884	1.01	30.200	2.97	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.18	3.311	1.34	34.674	1.99	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.42	3.802	1.75	39.811	1.18	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.61	4.365	2.24	45.709	0.57	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.75	5.012	2.81	52.481	0.08	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.83	5.754	3.47	60.256	0.00	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.85	6.607	4.19	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.80	7.586	4.95	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.70	8.710	5.89	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.56	10.000	6.38	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.56	11.482	6.38	120.226	0.00	1258.925	0.00		

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Fly ash เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PVC

Concentration:
0.0264 %Vol

Span :
2.460

Uniformity:
0.896

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
1.1 m²/g

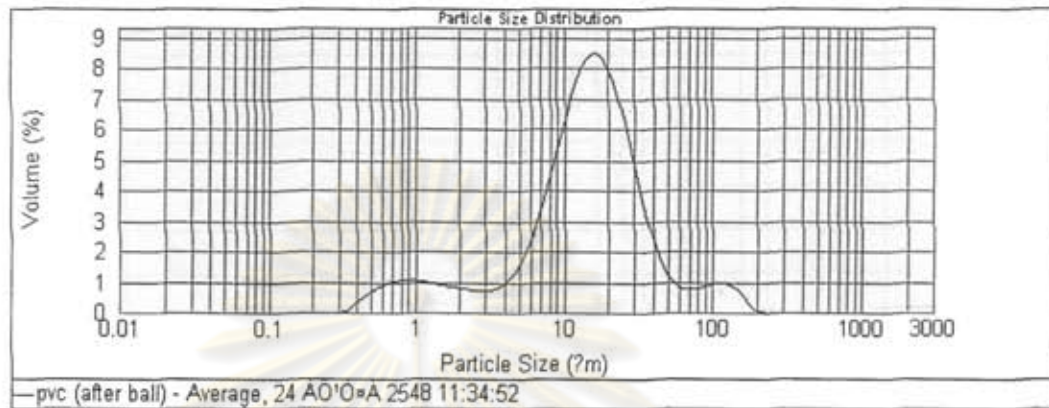
Surface Weighted Mean D[3,2]:
5.455 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
21.300 um

d(0.1): 2.324 um

d(0.5): 14.944 um

d(0.9): 39.084 um



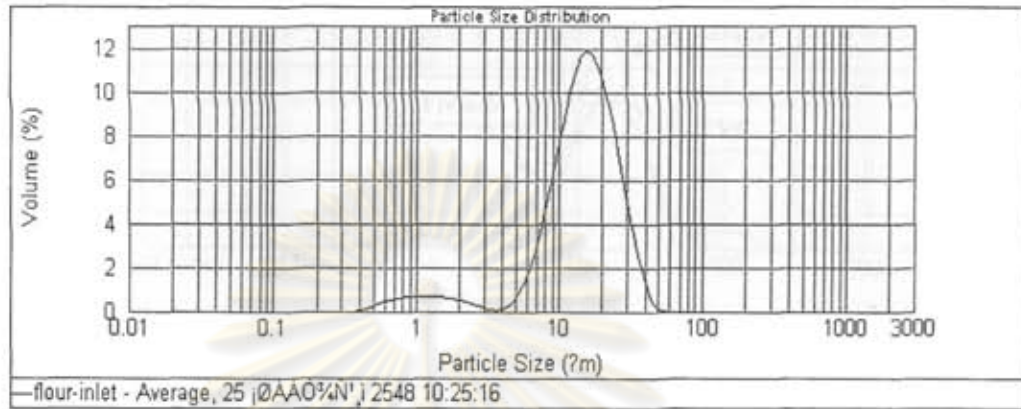
Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.81	11.482	6.06	120.226	0.80	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.84	13.183	7.44	138.038	0.65	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.79	15.136	7.65	158.489	0.34	1629.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.75	17.378	7.47	181.970	0.08	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.925	0.71	19.953	6.91	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.67	22.909	6.03	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.64	26.303	4.96	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.64	30.200	3.82	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.64	34.674	2.76	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.01	3.802	0.71	39.811	1.89	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.23	4.365	0.86	45.709	1.25	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.43	5.012	1.16	52.481	0.87	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.62	5.754	2.25	60.256	0.70	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.87	6.607	3.09	69.180	0.68	724.036	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.93	7.586	4.02	79.433	0.68	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.95	8.710	5.04	91.201	0.75	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.93	10.000	6.03	104.713	0.83	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.93	11.482	6.03	120.226	0.86	1258.925	0.00		

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ PVC เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Wheat flour

Concentration: 0.0204 %Vol Span: 1.385 Uniformity: 0.439 Result units: Volume
 Specific Surface Area: 0.781 m²/g Surface Weighted Mean D[3,2]: 7.685 um Vol. Weighted Mean D[4,3]: 16.188 um
 d(0.1): 6.776 um d(0.5): 15.091 um d(0.9): 27.679 um

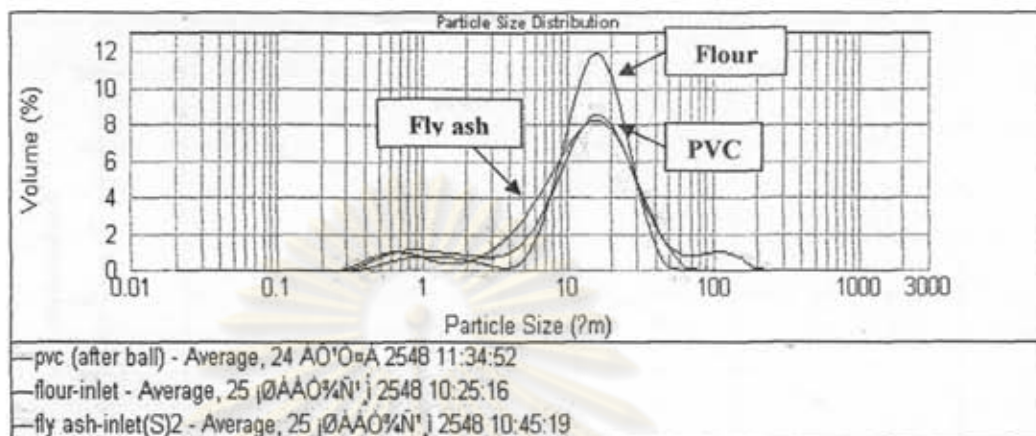


Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.030	0.00	0.105	0.00	1.096	0.64	11.482	9.31	120.226	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.62	13.183	10.35	138.038	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.59	15.138	10.69	158.489	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.57	17.378	10.26	181.970	0.00
0.017	0.00	0.180	0.00	1.905	0.54	19.953	9.12	208.930	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.46	22.909	7.44	239.803	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.37	26.303	5.52	275.423	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.26	30.200	3.64	316.228	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.15	34.674	2.06	363.078	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.08	39.811	0.87	416.869	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.11	45.709	0.17	478.630	0.00
0.046	0.00	0.479	0.25	5.012	0.32	52.481	0.00	549.541	0.00
0.052	0.00	0.550	0.25	5.754	0.80	60.256	0.00	630.957	0.00
0.060	0.00	0.631	0.38	6.607	1.62	69.183	0.00	724.406	0.00
0.069	0.00	0.724	0.48	7.586	2.80	79.433	0.00	831.764	0.00
0.079	0.00	0.832	0.56	8.710	4.33	91.201	0.00	954.993	0.00
0.091	0.00	0.955	0.61	10.000	6.04	104.713	0.00	1096.478	0.00
0.105	0.00	1.096	0.64	11.482	7.81	120.226	0.00	1258.925	0.00

รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการกระจายอนุภาคของ Wheat flour เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

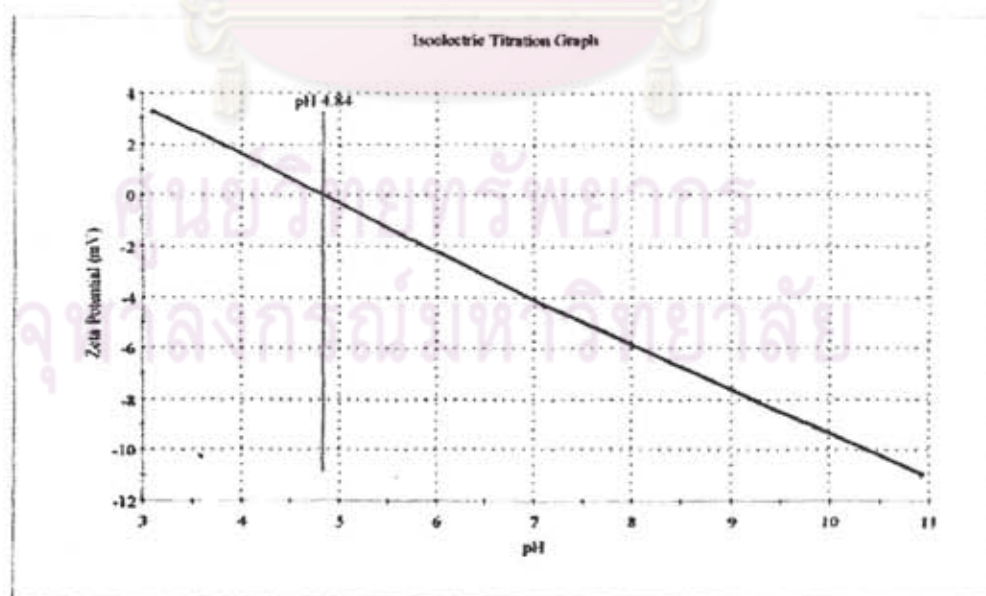
Concentration: 0.0086 %Vol	Span : 2.072	Uniformity: 0.639	Result units: Volume
Specific Surface Area: 1.16 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 5.193 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 15.602 um	
d(0.1): 3.406 um	d(0.5): 13.308 um	d(0.9): 39.975 um	



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟการเปรียบเทียบกระจายอนุภาคระหว่าง Fly ash, PVC และ Wheat flour เมื่อวัดด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

Fly ash

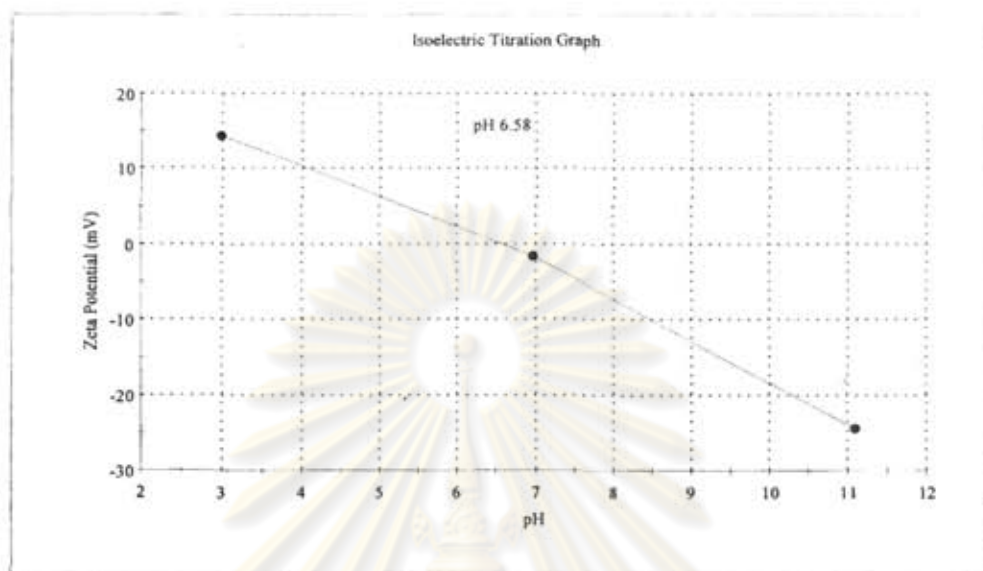
Target pH	Measured pH	Zeta Potential (mV)
3	3.11	3.29
7	7.09	-4.30
11	10.91	-10.9



รูปที่ 4.19 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ Fly ash วัดด้วยเครื่อง Zeta potential

PVC

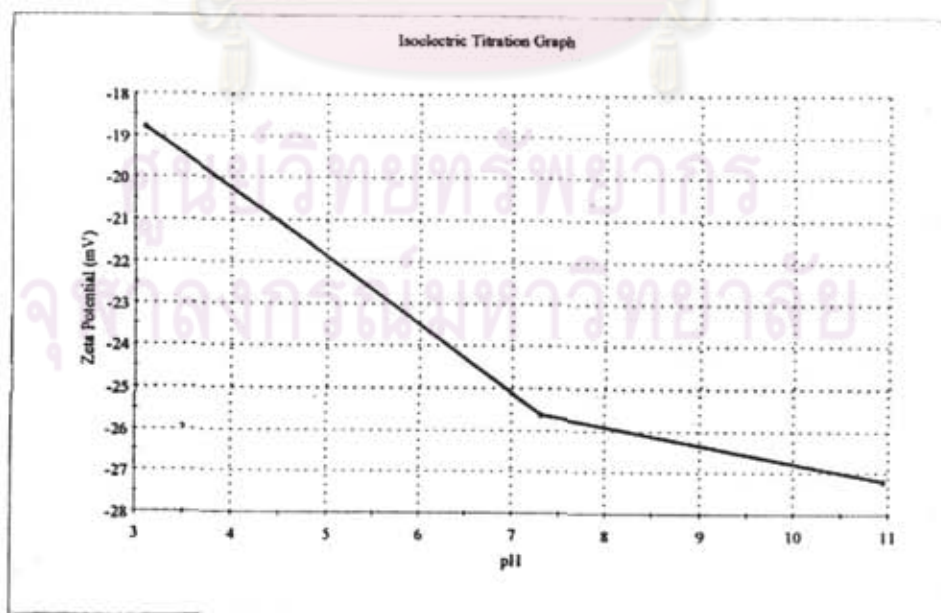
Target pH	Measured pH	Zeta Potential (mV)
3	2.98	14.46
7	6.96	-1.523
11	11.08	-24.29



รูปที่ 4.20 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ PVC วัดด้วยเครื่อง Zeta potential

Wheat flour

Target pH	Measured pH	Zeta Potential (mV)
3	3.1	-18.8
7	7.3	-25.61
11	10.93	-27.15



รูปที่ 4.21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของ Wheat flour วัดด้วยเครื่อง Zeta potential

ตารางที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นเปรียบเทียบระหว่าง Fly ash, PVC และ Wheat flour ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดจากผลการทดลองส่วนที่แล้วคือ 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศที่ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น Fly ash มีค่าเท่ากับ 97.06%, PVC มีค่าเท่ากับ 87.89% และ Wheat flour มีค่าเท่ากับ 90.37% ดังกราฟที่ 4.21

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับ Fly ash และ Wheat flour ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันและเป็นฝุ่นชนิด Hydrophilic เหมือนกัน โดยปกติฝุ่นชนิดนี้จะมีความสามารถในการเปียกน้ำและรวมตัวกับน้ำได้ดี[19] จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดักจับ Fly ash และ Wheat flour มีค่าประมาณ 97 และ 90%ตามลำดับ ในขณะที่ PVC resin เป็นฝุ่นชนิด hydrophobic ซึ่งความสามารถในการรวมตัวกับน้ำต่ำ มีประสิทธิภาพการดักจับเท่ากับ 87.89% ซึ่งใกล้เคียงกับฝุ่นชนิด hydrophilic ทั่วไป (ที่มีค่าประมาณ 90-99%) ซึ่งเมื่อสังเกตความสามารถในการรวมตัวกับน้ำของ PVC โดยนำมาละลายกับน้ำ พบว่า PVC จะจับเป็นก้อนรวมตัวกันลอยอยู่บนผิวน้ำ แต่เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวลงไปในน้ำ ความสามารถในการรวมตัวกับน้ำของ PVC จะมียากขึ้น โดย PVC จะเปียกน้ำและจมลงสู่ก้นภาชนะทันที แสดงให้เห็นว่าฟองแก๊สแอฟรอนสามารถเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกับน้ำของฝุ่นชนิด hydrophobic ได้ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องมือดักจับฝุ่นประเภทที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง เช่น Wet scrubber

สาเหตุที่ประสิทธิภาพการดักจับ Fly ash มีค่าสูงกว่า Wheat flour และ PVC เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของ Wheat flour และ PVC เมื่อถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Micrograph (SEM) พบว่าฝุ่นทั้ง 2 ชนิดจะมีความขรุขระและเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าผิวของ Fly ash ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลมและเรียบ โดยเฉพาะ PVC จะมีความขรุขระและเหลี่ยมมุมมากกว่า ดังแสดงดังรูปที่ 4.22 (ก), (ข) และ (ค) จึงทำให้พื้นที่ผิวและความสามารถในการเกาะติดกับฟองแก๊สแอฟรอนมีน้อยลง ซึ่งความเป็นเหลี่ยมและมุมของอนุภาคฝุ่นอาจไปขัดขวางการเกาะติดของฟองแก๊สแอฟรอนกับฝุ่นอนุภาคอื่น รวมทั้งยังทำให้ฟองแตกมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดักจับจึงน้อยลง ซึ่งพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการดักจับฝุ่น โดยความสามารถในการดักจับฝุ่นจะน้อยลงเมื่อเกิดผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ[5] เช่น Flux density ของฝุ่นมีน้อย, อนุภาคไม่สามารถกำจัดออกจากพื้นผิวของตัวดักจับฝุ่นได้ เช่น มีความสามารถในการไหลต่ำ, อนุภาคฝุ่นมีลักษณะทางเคมีหรือทางกายภาพบางอย่าง เช่น มีความแข็งมากหรืออ่อนมากเกินไปหรือมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

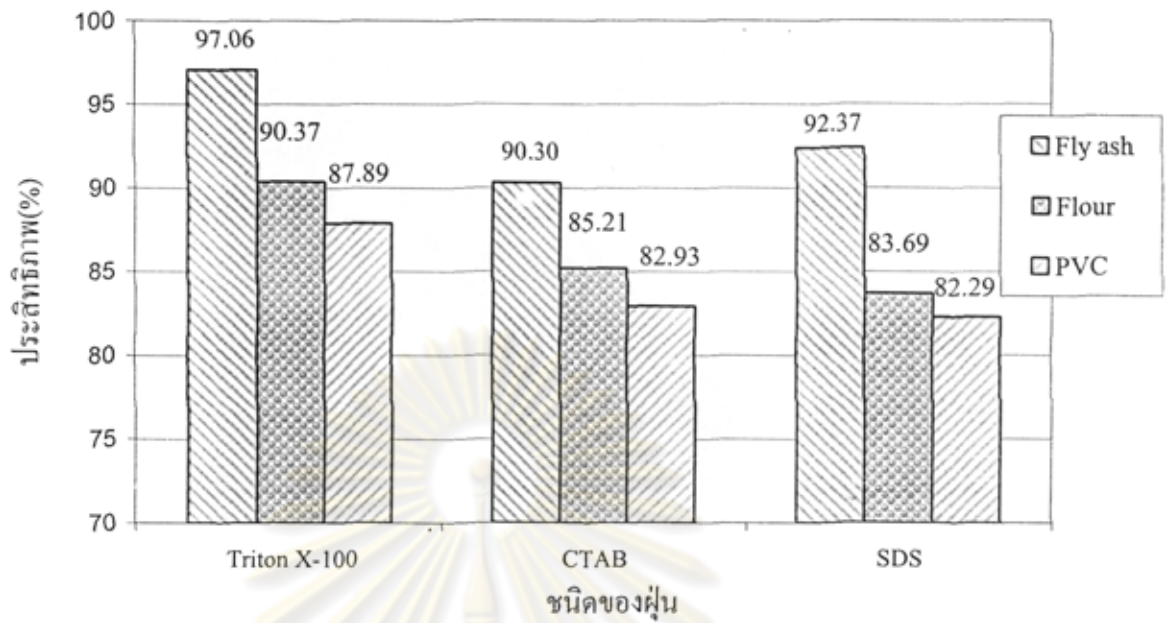
และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นชนิดต่างๆ โดยเปลี่ยนชนิดของสารลดแรงตึงผิวจาก Triton X-100 เป็น CTAB และ SDS ซึ่งมีประจุเป็นกลาง, เป็นบวกและเป็นลบตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแสดงดังตารางที่ 4.15 โดยประสิทธิภาพเมื่อใช้ Triton X-100 เป็นสารลดแรงตึงผิวจับฝุ่นทั้ง 3 ชนิดอยู่ในช่วง 87%- 99% และเมื่อใช้ CTAB เป็นสารลด

แรงดึงผิว ประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 81% - 93% และเมื่อใช้ SDS เป็นสารลดแรงดึงผิว ประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 81% - 94% แสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงเป็นการยืนยันผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.2 ว่าชนิดของสารลดแรงดึงผิวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแม้ฝุ่นต่างชนิดกันที่มีอำนาจทางไฟฟ้าไม่เท่ากันก็ตาม

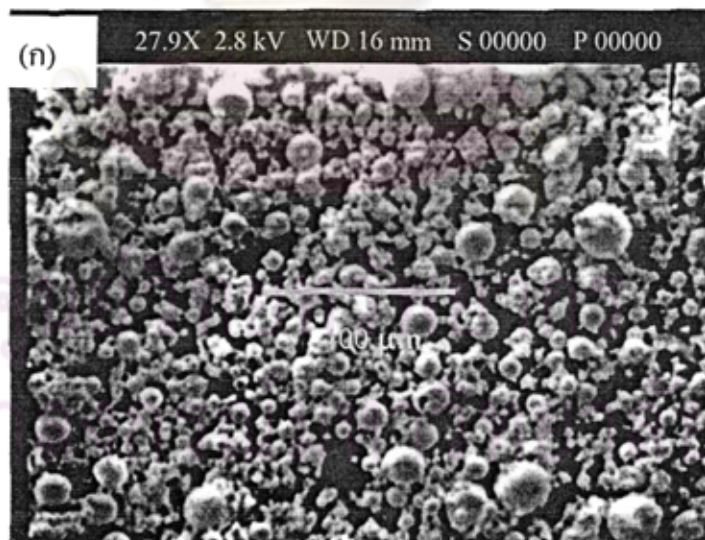
ตารางที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนชนิดของฝุ่น ที่ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^3 \text{ m/s}$

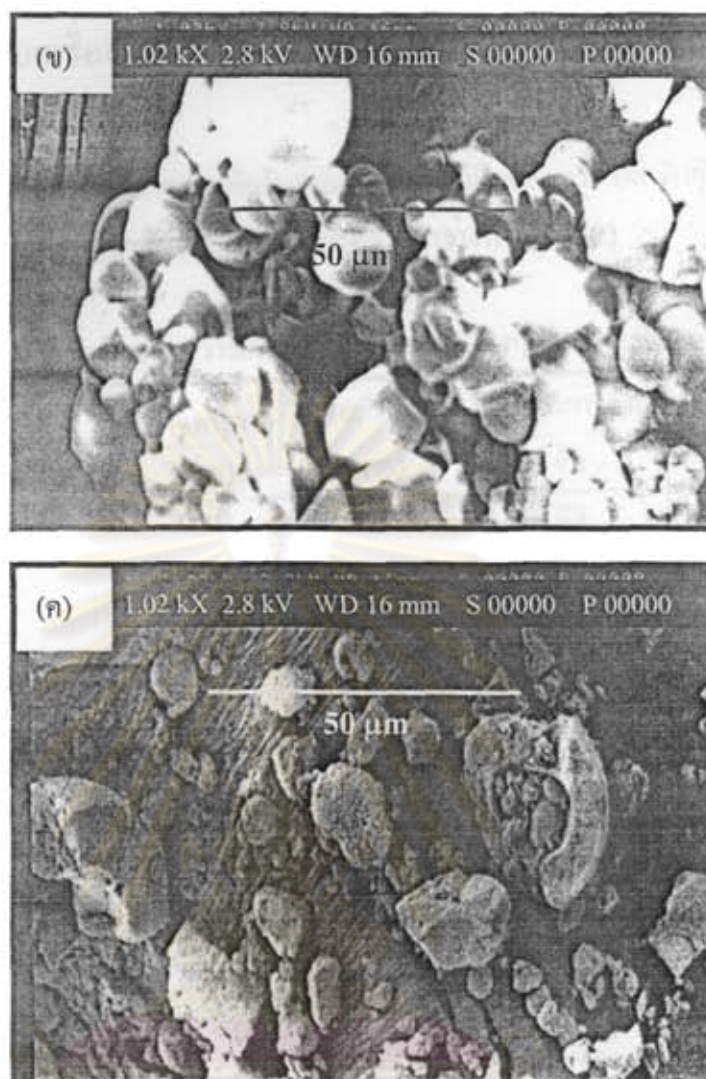
ชนิดสารลดแรงดึงผิว	ครั้งที่	Fly ash			PVC			Wheat flour		
		ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้นฝุ่น (g/m^3)		ประสิทธิภาพ (%)
		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก		ทางเข้า	ทางออก	
Triton X-100	1	0.1347	0.0000	100.00	0.0847	0.0099	88.31	0.1284	0.0106	91.74
	2	0.1041	0.0061	94.12	0.0918	0.0115	87.47	0.0864	0.0095	89.00
	เฉลี่ย			97.06			87.89			90.37
CTAB	1	0.1837	0.0245	86.67	0.1906	0.0353	81.48	0.2047	0.0212	89.66
	2	0.2020	0.0122	93.94	0.2259	0.0353	84.38	0.1835	0.0353	80.77
	เฉลี่ย			90.30			82.93			85.21
SDS	1	0.2082	0.0122	94.12	0.2118	0.0353	83.33	0.2047	0.0353	82.76
	2	0.1959	0.0184	90.62	0.2259	0.0424	81.25	0.1835	0.0282	84.62
	เฉลี่ย			92.37			82.29			83.69

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22 แสดงประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนชนิดของฝุ่น ที่ความเข้มข้นฝุ่นขาเข้า 0.1 g/m^3 ความเร็วของอากาศ 6.0 m/s และความเร็วของฟองแก๊สแอฟรอน $2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$





รูปที่ 4.23 (ก) อนุภาค Fly ash (ข) อนุภาค Wheat flour และ (ค) PVC เมื่อถ่ายด้วยเครื่อง SEM

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การเปรียบเทียบเครื่องดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนและเครื่องดักจับฝุ่นชนิดอื่น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและข้อดีข้อเสียของเครื่องดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนกับเครื่องดักจับฝุ่นชนิดอื่น สามารถแสดงได้ตารางที่ 4.16 [12]

ตารางที่ 4.15 แสดงข้อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือจับฝุ่นชนิดต่างๆ กับการใช้ฟองแก๊สแอฟรอน

ชนิดเครื่องมือ	ΔP (mmHg)	ขนาดอนุภาค (μm)	ประสิทธิภาพ (%)	กลไกการดักจับ	หมายเหตุ
1. Gravity settling chamber	Low	< 10 10 – 50	Low	Gravity force	- ใช้พลังงานต่ำมาก - ค่าติดตั้ง ค่าซ่อมบำรุงต่ำ แต่ขนาดใหญ่มาก
2. Cyclone[20]	0.9–3.7	< 5 5 – 20 15 – 50 > 40	< 50 50 - 80 80 - 95 95 - 99	Centrifugal force	- เหมาะสำหรับการกำจัดฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ - ใช้สำหรับการทำความสะอาดแก๊สในเบื้องต้น, สร้างง่าย
3. Electrostatic	0.18-0.9	0.05 - 200	80 - 99	Electrostatic force	- ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นสูงแม้จะมีขนาดเล็กมากๆ ,ใช้พลังงานต่ำ แรงต้านทานต่ำ - ฝุ่นอาจหลุดกลับไปยังกระแสแก๊สได้ ถ้าประจุไฟฟ้าที่อยู่บนอนุภาคไม่เพียงพอที่จะยึดเกาะกัน - ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อฝุ่นมีความชื้นและอุณหภูมิสูง

4. Wet scrubber	1.8 – 3.7	5-25 > 25	94 99	Inertia and direct interception	- สามารถกำจัดฝุ่นขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง - มีปัญหาเกี่ยวกับตะกอนเปียก, ใช้พลังงานสูงในการกระจายผิวหน้าของเหลวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
5. Filter	0.9 - 11.2	> 0.5	95 - 99	Mostly sieving	- ให้ประสิทธิภาพในการเก็บสูง แม้ว่าอนุภาคมีขนาดต่างกันมาก - ต้องการการทำความสะอาดบ่อย เพราะอาจเกิดการอุดตันง่ายและอาจเกิดความดันตก
6. Using CGA	0.15 - 0.3	< 10 > 10	84 - 89 96 - 99	Direct interception and inertia	- ความดันต่ำ - ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นสูงเมื่ออนุภาคขนาดเล็กเมื่อเทียบกับไซโคลอน - กำจัดทั้งก๊าซมลพิษและอนุภาคมลสารพร้อมกันได้ - กำจัดฝุ่นได้แม้ความเข้มข้นฝุ่นจะต่ำมาก (ประมาณ 0.1 g/m^3) - สามารถดักจับฝุ่นชนิด Hydrophobic ได้ - ประสิทธิภาพอาจไม่ดีนักเมื่อความเร็วลมสูงๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน ในเบื้องต้นจะศึกษาถึงปัจจัยที่มีต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์ จากนั้นจะศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆ ในการดำเนินการทดลอง คือ อัตราการไหลของอากาศ, ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าและอัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอน และศึกษาถึงผลของขนาดของฝุ่นและผลของชนิดของฝุ่นที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น

5.1 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของฝุ่นที่ทางเข้า

จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคือ อัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้น ส่วนความถี่ของคลื่นเสียงไม่มีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นที่วัดได้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและน้ำหนักฝุ่นเริ่มต้นขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์มีค่ามากขึ้น

5.2 การศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ในการศึกษาถึงชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวต่างกัน 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิด Anionic (SDS), สารลดแรงตึงผิวชนิด Cationic (CTAB) และสารลดแรงตึงผิวชนิด Non-ionic (Titron X-100) พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 75.22 ± 1.25 % และกลไกการดักจับฝุ่นของฟองแก๊สแอฟรอนที่เกิดขึ้น เป็นกลไกแบบต่างๆ คือ กลไกการสกัดโดยตรง (Direct interception), กลไกการตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial impacting), กลไกการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) และอิทธิพลทางไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic effect) ซึ่งกลไกต่างๆ เหล่านี้มีอิทธิพลต่อการดักจับฝุ่นมากกว่าอิทธิพลของกลไกแบบผลของไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic effect)

เมื่อศึกษาถึงความเสถียรของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด โดยวิเคราะห์ความเสถียรได้จากเวลาที่ฟองแก๊สแอฟรอนกลายเป็นของเหลวซึ่งมีปริมาตรของของเหลวเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรของเหลวเริ่มต้น (Half Life) ที่ความเข้มข้น 26.4×10^{-3} mol ความเร็วรอบในการกวน 6000 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการกวนสารละลายคือ 5 นาที พบว่า สารลดแรงตึงผิว SDS มีความเสถียร

มากที่สุด รองลงมาคือ Titron X-100 และ CTAB และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนที่ได้จากสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดพบว่า ขนาดของฟองแก๊สแอฟรอนมีขนาดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 75-90 μm .

5.3 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

ในการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอน สามารถสรุปได้ดังนี้คือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและความเข้มข้นฝุ่นที่ทางเข้าคอลัมน์ให้สูงขึ้นประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนลดต่ำลง ในทางตรงข้ามกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของฟองแก๊สแอฟรอน ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นจะสูงขึ้นด้วย โดยประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นที่ดีที่สุดคือ 95%

5.4 ผลของขนาดอนุภาคฝุ่น

ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นเมื่อเปลี่ยนขนาดของฝุ่น โดยใช้ Fly ash ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน 3 ขนาด คือ ขนาดเฉลี่ย 5.815 μm , 13.308 μm และ 22.567 μm พบว่าประสิทธิภาพการดักจับประมาณ 85-99% โดยเฉพาะฝุ่นที่มีขนาดอนุภาคมากกว่า 10 μm ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นมากถึง 96-99% ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 μm ประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 84-89%

5.5 ผลของชนิดของฝุ่น

เมื่อทำการศึกษาผลของการดักจับฝุ่นด้วยฟองแก๊สแอฟรอนเมื่อเปลี่ยนชนิดของฝุ่น โดยฝุ่นที่นำมาทดลองคือ PVC resin เป็นตัวแทนของฝุ่นชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic dust) และ Wheat flour เป็นตัวแทนของฝุ่นชนิดไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic dust) เปรียบเทียบกับ Fly ash จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นทั้ง 3 ชนิด มีค่าประมาณ 87 - 97% โดยความสามารถในการดักจับฝุ่นจะน้อยลงเมื่อเกิดผลกระทบจากตัวแปรบางอย่างของฝุ่น และสรุปได้ว่าชนิดของฝุ่นไม่มีผลความสามารถในการจับด้วยฟองแก๊สแอฟรอน

เอกสารอ้างอิง

1. B.C. Meikap, M.N. Biswas, 2003, "Fly-ash removal efficiency in a modified multi-stage bubble column scrubber", **Separation and Purification Technology**.
2. E. Berlin, Y. Mamane, Y. Zimmels and S. Lazarev, "Control of particulate matter using liquid foam layer technology", pp. 827.
3. N.O Breum, 1999, "The dust holding capacity of porous plastic foam used in particle size-selective sampling", **Journal of Aerosol science.**, Vol. 31, No. 3, pp. 379-385
4. Parker C. Resit, Lauralynn Taylor, 1999, "The Development and operation of an improved turntable dust feeder", **Powder technology**, Vol. 107, pp. 36-42.
5. W. Peukert, C. Wadenpohl, "Industrial separation of fine particles with difficult dust properties", **Powder technology**, Vol. 118, pp. 136-148.
6. Sebba, F., 1987, **Foam and biliquid Foams-Aphrons**, John Wiley&Sons., New York, pp.63-78.
7. Matsushita, K., Mollah, A.H, Stuckey, D.C., Cerro, and Bailey, A.I.,1992, "Predispersed solvent extraction of dilute product using collidal gas aphrons and colloidal aphrons: aphrons preparation , stability and size", **Colloids and Surfaces**, Vol.65, pp.65-72.
8. Amiri, M.C. and Woodburn, E.T., 1990, "A Method for The Characterization of Colloidal Gas Aphron Dispersions", **Transactions of The Institution of Chemical Engineer**, Vol. 68A, pp. 154-160.
9. Yujie Dai, Tong Deng, "Stabilization and characterization of colloidal gas aphron dispersions", **Journal of Colloid and Interface Science**, Vol. 261, pp. 360-365.
10. คารณี จันทร์อำภากุล, ดวงพร สุขศรีแดง, ดิศพล มีกุล, 2540, "การสร้างเครื่องมือเก็บฝุ่นจากแหล่งกำเนิด", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
11. จุฑารัตน์ รัตนโมลีพร, ชาญศักดิ์ ปลัดทอง, วิชชา สุทธิทราศิริกุล, 2540, "การออกแบบและจัดสร้างชุดอุปกรณ์ในการดูดซับไอระเหยของไซลีนโดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอน", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

12. พงษ์ชัย ชูมมงคล, “มลพิษทางอากาศและวิธีการควบคุม”, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 98-162
13. นิทัศน์ กมลเดชเดชา, 2546, “การดูดซับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ฟองแก๊สแอฟรอน: การศึกษาไฮโดรไดนามิกและการถ่ายเทมวล”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
14. Gregory D. Wight, 1994, **Fundamentals of air sampling**, Lewis publishers. Inc., London , pp. 135-183.
15. Nicholas P. Cheremisinof, 2002, **Handbook of air pollution Prevention and Control**, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, USA, pp. 15
16. ทรงวุฒิ ศรีสว่าง, 2540, การกำจัดเขม่าลอยด้วยเครื่องสลับเบอร์แบบหมุนวน, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
17. รัชนิกร ชเนศกัณฐาวร, นันทรัช สินธุพิสุทธิ์, ธัญชัช ม่วงสอนเขียว, 2544, การเตรียม HAP ด้วย **microemulsion และ emulsion**” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
18. A. Roman-Gutierrez, J. Sabathier, S. Guilbert, L. Galet, B. Cuq, “Characterization of the surface hydration properties of wheat flours and flour components by measurement of contact angle”, **Powder technology**, Vol.129 (2003), pp. 37-45
19. Youngmin Jo, Chi Tien, Madhumita B. Ray, “Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones”, **Powder technology**, Vol.113 (2000), pp. 97-108
20. Madhumita B. Ray, Pouwel E. Luning, Alex C. Hoffmann, Adri Plomp, Maurice I.L. Beumer, “Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometer”, **Mineral processing**, Vol.53 (1998), pp. 39-47