

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและการสร้างเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์



เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 36750
วัน, เดือน, ปี 28 ส.ค. 2543

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

A Design and Construction of Spray Scrubber



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบและการสร้างเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์

โดย นางสาว ธิดารัตน์ ดรุณพันธ์

นางสาว สุวิธสา สวัสดิมงคล

นาย นฤเทพ เล็กศิริไล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

อ. สันติ วัฒนานูสรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

กรรมการ

(อ. บุญชัย ไซตวิริยวาณิช)

กรรมการ

(อ. นกกร ธัมพิพิธ)

เรื่อง การออกแบบและการสร้างเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์

โดย นางสาว ธิดารัตน์ ดรุณพันธ์

นางสาว สุวิธสา สวัสดิมงคล

นาย นฤเทพ เล็กศิริไล

อาจารย์ที่ปรึกษา อ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ. ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์

อ. สันติ วัฒนานุกรณ์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในการกำจัดอนุภาคและก๊าซพิษที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม หลังจากทำการติดตั้งเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์และระบบท่อต่าง ๆ แล้ว จึงดำเนินการทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่อง โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) การทดลองสำหรับการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำต่อประสิทธิภาพของการกำจัดอนุภาคน้ำต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ที่ช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำต่ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกหลักในการกักเก็บอนุภาคคือการกระทบด้วยแรงเฉื่อย แต่ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำสูง ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง เนื่องจากกลไกหลักในการกักเก็บอนุภาคคือการแพร่ 2) การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาควางแบ่งกับผงเถ้า พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาควางแบ่งจะสูงกว่าอนุภาคผงเถ้า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคแขวนแขวงทางทฤษฎีกับการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองสูงกว่าค่าที่ได้จากทางทฤษฎี



Report Title A Design and Construction of Spray Scrubber

By Miss Tidarat Darunpan

 Miss Suwatsa Sawatdimongkol

 Mr. Naruetep Lecksiwilai

Advisor Mrs. Ruenruedee Benjangkprasert

Co-Advisor Asst. Prof. Dr. Pisal Nakpipat

 Mr. Santi Wattananusorn

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project was to design and construct a spray scrubber which is widely used for reducing particles and air pollution from exhaust gases produced by industrial processes. When scrubber, valve, and pipe systems had been completed, the experiments were conducted to find out the efficiency, which could be divided into 2 sections as followings :

1) Experiments for studying the effects of volumetric flow rate of water on collection efficiency in removing particles of various sizes. From experimental results it is found that, at the low volumetric flow rate of water, the collection efficiency increased as the particle diameter increased. But an increasing volumetric flow rate of water, the collection efficiency increased when particle diameter decreased. 2) Experiments for comparison of the collection efficiency between starch and that of ash , it is found that the collection efficiency of starch was higher than that of ash. The comparison of

collection efficiencies from the experiments and the theoretical, it is found that the experimental collection efficiency was higher than the theoretical collection efficiency.



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องสกรับเบอร์และมลพิษทางอากาศ	3
2.1 ประเภทและการใช้งานเครื่องสกรับเบอร์แบบต่าง ๆ	3
2.2 คุณสมบัติของเครื่องเก็บฝุ่นแบบสกรับเบอร์แต่ละชนิด	11
2.3 มลพิษทางอากาศ	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. ทฤษฎี	17
3.1 กลไกเบื้องต้นในการกักเก็บอนุภาค	18
3.2 การหาประสิทธิภาพจากกลไกการกักเก็บอนุภาค	21
4. การออกแบบ	31
4.1 การออกแบบหลอดเปรย์	31
4.2 การออกแบบสเปรย์นอซเซิล	32
4.3 การออกแบบส่วนกำจัดละออง	34
4.4 การออกแบบระบบท่อและวาล์ว	34
4.5 การใช้พลังงาน	36
4.6 โครงสร้างภายนอก	38
4.7 อุปกรณ์ป้อนสาร	40
5. การทดลอง	41
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดผงเก่า	41
5.2 การทดลองใช้เครื่องสเปรย์สครับเบอร์เพื่อกำจัดอนุภาคแป้ง	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
6.1 ผลการทดลอง	46
6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	49
7. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	54
7.1 สรุปผลการทดลอง	54
7.2 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การคำนวณออกแบบหอสเปรย์	60
ภาคผนวก ข การหาค่าความสูญเสียรวมในระบบท่อน้ำและ พลังงานของเครื่องสูบน้ำ	62
ภาคผนวก ค สารละลายมาตรฐานแป้ง	67
ภาคผนวก ง การคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่อง สเปรย์สครับเบอร์ทางทฤษฎี	69

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านประกอบด้วย อ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ และ ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.บุญชัย ไซตวิริยวานิชย์, อ.สันติ วัฒนานุสรณ์ และ อ.นภกร รั้มพิพิธ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆรวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ และคุณ พิลันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการติดตั้งระบบท่อต่างๆ ในการสร้างเครื่องสเปกโตรสโกปี

จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

30 เมษายน 2543

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ลักษณะของเครื่องสครับเบอร์ประเภทต่าง ๆ	4
ตารางที่ 3.1	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคและโมเลกุลของก๊าซ	21
ตารางที่ 4.1	รายละเอียดของนอซเชิล	34
ตารางที่ 6.1	อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคผงเข้าขนาด 60 mesh	46
ตารางที่ 6.2	อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคผงเข้าขนาด 100 mesh	47
ตารางที่ 6.3	อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคผงเข้าขนาด 140 mesh	48
ตารางที่ 6.4	อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคแป้ง	49

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	เครื่องสครับเบอร์แบบเหนียวน้ำสเปรย์ขึ้นเอง	5
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างการดัดแปลงเครื่องสครับเบอร์แบบเวนทูรี	7
รูปที่ 2.3	เครื่องสครับเบอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด	8
รูปที่ 2.4	เครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์	9
รูปที่ 2.5	เครื่องสครับเบอร์แบบอิมพินเจอร์	10
รูปที่ 2.6	เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน	11
รูปที่ 3.1	กระแสการไหลของอากาศที่ผ่านหยดของเหลว ซึ่งแสดงแนวกระทบ AB ของหยดของเหลว ซึ่งเป็นหลักการของกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย	19
รูปที่ 3.2	การเก็บอนุภาคโดยการสกัดกันอย่างเดียว	19
รูปที่ 3.3	การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน	20
รูปที่ 3.4	ห้องสเปรย์ส่วนเล็ก ๆ ที่ใช้ในการพิจารณา	22
รูปที่ 3.5	ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (17) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของอนุภาค (D_p) จากสมการ 3.9 ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหยดน้ำ (D_s) เท่ากับ 50, 100, 500 และ 1,000 ไมครอน (μm) สภาวะของหยดน้ำ ตกลงในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อ ลบ.ซม.	28

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6	ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (η) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของหยดน้ำ (D_s) จากสมการ 3.9 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D_p) เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 ไมครอน (μm) สภาวะของหยดน้ำ ตกอยู่ในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อ ลบ.ซม.	28
รูปที่ 3.7	ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (η) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของหยดน้ำ (D_s) จากสมการ 3.10 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D_p) เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 ไมครอน (μm) สภาวะของหยดน้ำ ตกอยู่ในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อ ลบ.ซม.	30
รูปที่ 4.1	การออกแบบหอสเปรย์	33
รูปที่ 4.2	นอซเจ็ตชนิด Spiral Jet และลักษณะของหยดน้ำที่ได้	33
รูปที่ 4.3	ลักษณะของส่วนกำจัดละออง	34
รูปที่ 4.4	ส่วนของระบบท่อและวาล์วของอากาศ	36
รูปที่ 4.5	ส่วนของระบบท่อและวาล์วควบคุมในเครื่องสเปรย์สครับเบอร์	37
รูปที่ 4.6	โครงสร้างของเครื่องเป่าอากาศ	38
รูปที่ 4.7	โครงสร้างของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์และเครื่องสูบน้ำ	39
รูปที่ 4.8	อุปกรณ์ป้อนสาร	40

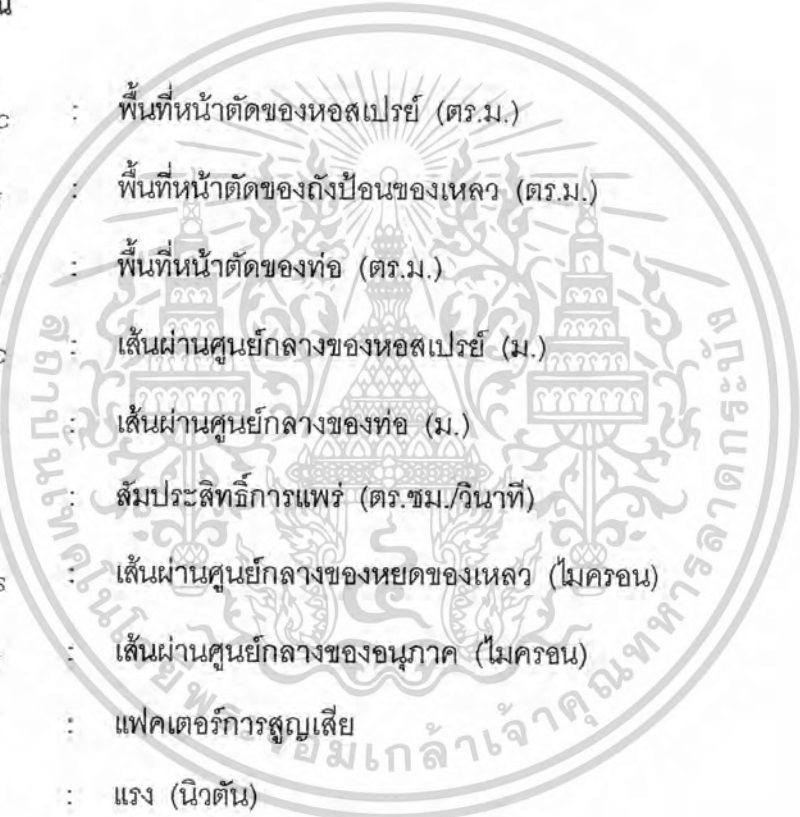
สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพ ในการกำจัดอนุภาคผงถ้ำขนาด 60 mesh	50
รูปที่ 6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพ ในการกำจัดอนุภาคผงถ้ำขนาด 100 mesh	51
รูปที่ 6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพ ในการกำจัดอนุภาคผงถ้ำขนาด 140 mesh	51
รูปที่ 6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพ ในการกำจัดอนุภาคแป้ง	52
รูปที่ 6.5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคผงถ้ำแต่ละขนาด	52
รูปที่ 6.6	การเปรียบเทียบในประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ในการกำจัดอนุภาคแป้งกับอนุภาคผงถ้ำขนาด 100 mesh	53
รูปที่ ค-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแป้ง กับเวลาในการไฮโดรไลส์	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์



A_C	:	พื้นที่หน้าตัดของหอสเปรย์ (ตร.ม.)
A_I	:	พื้นที่หน้าตัดของถังป้อนของเหลว (ตร.ม.)
A_t	:	พื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตร.ม.)
d_C	:	เส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ (ม.)
d_t	:	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (ม.)
D	:	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตร.ซม./วินาที)
D_S	:	เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลว (ไมครอน)
D_f	:	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมครอน)
f	:	แฟคเตอร์การสูญเสีย
F	:	แรง (นิวตัน)
g	:	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที ²)
g_c	:	ค่าคงตัวของการแปลงหน่วยของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (ม./วินาที ²)
G	:	อัตราการไหลของก๊าซในหอสเปรย์ (ลบ.ม./วินาที)
h_c	:	ค่าการสูญเสียพลังงานที่ปากทางออกของถังป้อนของเหลว (จูล/กิโลกรัม)
h_f	:	ค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากข้อต่อของท่อและวาล์ว (จูล/กิโลกรัม)
h_L	:	ค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากท่อ (จูล/กิโลกรัม)

- h_{n1} : ค่าการสูญเสียพลังงานรวมในท่อขนาด 1 นิ้ว (จูล/กิโลกรัม)
 h_{n2} : ค่าการสูญเสียพลังงานรวมในท่อขนาด 0.5 นิ้ว (จูล/กิโลกรัม)
 h_f : ค่าการสูญเสียพลังงานรวมทั้งหมดเนื่องจากของเหลว (จูล/กิโลกรัม)
 K_c : ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานที่ปากทางออกของถังป้อนของเหลว
 K_f : ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากข้อต่อของท่อและวาล์ว
 K_L : ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานเนื่องจากท่อ
 L_1 : ความยาวของท่อขนาด 1 นิ้ว (ม.)
 L_2 : ความยาวของท่อขนาด 0.5 นิ้ว (ม.)
 m : อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว (กิโลกรัม/วินาที)
 N : ความเข้มข้นของอนุภาค ณ เวลาใด ๆ (จำนวนอนุภาค/ปริมาตรอากาศ)
 N_0 : ความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้น (จำนวนอนุภาค/ปริมาตรอากาศ)
 P : ความดัน (บาร์)
 ΔP : ความดันตกภายในหอสเปรย์ (มิลลิบาร์)
 Re : เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
 Sc : ชมิดท์นัมเบอร์
 St : สโตกส์นัมเบอร์
 S_c : ค่าคงที่
 u_G : ความเร็วของก๊าซในท่อขนาด 2 นิ้ว (ม./วินาที)
 u_L : ความเร็วของของเหลวในท่อขนาด 1 นิ้ว (ม./วินาที)
 $u_{L,nozzle}$: ความเร็วของของเหลวในท่อขนาด 0.5 นิ้ว (ม./วินาที)
 V : ความเร็วของหยดของเหลวที่ตก (ม./วินาที)
 V_g : ความเร็วในการพุ่งขึ้นของก๊าซในหอสเปรย์ (ม./วินาที)
 V_t : ความเร็วปลายของหยดของเหลว (ม./วินาที)

- W : อัตราการไหลของของเหลว (ลบ.ม./วินาที)
 W_{nozzle} : อัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านต่อหนึ่งนอซเซิล (ลบ.ม./วินาที)
 W_p : งานของเครื่องสูบน้ำ (จูล/กิโลกรัม)
 Z : ความสูงของหอสเปรย์ (ม.)

ตัวอักษรกรีก-โรมัน

- η : ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคในหนึ่งหยดของเหลว
 η_p : ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูบน้ำ
 η_t : ประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สควับเบอร์โดยรวม
 K : อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคต่อหยดของเหลว
 ω : อัตราส่วนระหว่างความหนืดของน้ำต่ออากาศ
 ρ : ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลบ.ม.)
 μ : ความหนืด (เซนติพอยส์)
 σ_L : แรงตึงผิวของของเหลว (ดาเยน/ซม.)
 ψ : ค่าคงที่

ตัวห้อย

- air : อากาศ
 G, g : ก๊าซ
 L : ของเหลว
 nozzle : สภาวะที่นอซเซิล
 W : น้ำ
 1 : สภาวะเริ่มต้น
 2 : สภาวะสุดท้าย

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องเก็บฝุ่นแบบสครับเบอร์ (Scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมในการกำจัดอนุภาคของแข็งหรือ ก๊าซพิษที่มีอันตรายออกจากกระบวนการผลิต การกำจัดสิ่งเหล่านี้ เป็นสิ่งที่จำเป็นเพราะอนุภาคของแข็งหรือก๊าซเหล่านี้สามารถทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ก่อให้เกิดของเสียเหล่านี้ ได้แก่ โรงงานผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง โรงงานกลั่นน้ำมัน โรงงานเผาขยะ เป็นต้น ของเสียส่วนใหญ่ที่ออกมาคือก๊าซ SO_2 , NO_2 และฝุ่นที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันมลภาวะที่เกิดขึ้น ส่วนหนึ่งมาจากภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบการจัดการเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมไม่เพียงพอก่อให้เกิดปัญหาแก่สิ่งแวดล้อมขึ้นมากมาย ฉะนั้นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีส่วนให้เกิดมลพิษต่าง ๆ จึงต้องพยายามป้องกันและควบคุมมิให้ของเสียเหล่านี้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม วิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ การต่ออุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ เข้าไปเพื่อช่วยบำบัดหรือลดปริมาณของเสียที่ทำให้เกิดมลพิษต่าง ๆ ก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ อย่างมากมายเพื่อตอบสนองการใช้งานในลักษณะที่ต่างกัน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บฝุ่นหรือกำจัดก๊าซอันตรายที่ออกจากกระบวนการผลิตนั้นมีอยู่หลายชนิด เครื่องเก็บฝุ่นแบบสครับเบอร์เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่นำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายสามารถกำจัดได้ทั้งฝุ่นที่เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กและก๊าซพิษได้ควบคู่กัน แต่หลักการทำงานของสครับเบอร์นั้น มีความซับซ้อนน้อยกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น เช่น เครื่องดักจับอนุภาคที่ใช้

ไฟฟ้าสถิตย์ จะมีส่วนประกอบที่ยุ่งยากกว่า สกรับเบอร์ส่วนใหญ่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการกักเก็บอนุภาคฝุ่นและโมเลกุลของก๊าซที่ต้องการได้เป็นจำนวนมากพอสมควร ดังนั้นการทำให้เครื่องสกรับเบอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยสามารถกักเก็บอนุภาคฝุ่นหรือโมเลกุลของก๊าซได้เป็นจำนวนมาก ด้วยน้ำหรือของเหลวชนิดอื่นในปริมาณที่น้อยลง จึงเป็นเหตุผลที่นำมาพิจารณาและทดลองในโครงการ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องสเปรย์สกรับเบอร์ โดยนำทฤษฎีเกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้
- 2) เพื่อศึกษาการออกแบบเครื่องสเปรย์สกรับเบอร์แบบสเปรย์ และสภาวะที่เหมาะสมกับการปฏิบัติงาน
- 3) เพื่อศึกษาแนวทางในการประยุกต์เครื่องสเปรย์สกรับเบอร์ สำหรับสภาวะที่ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1) ศึกษาการทำงานเบื้องต้นของเครื่องสเปรย์สกรับเบอร์
- 2) ศึกษาวิธีการคำนวณออกแบบเครื่องและระบบท่อ
- 3) สร้างเครื่อง ติดตั้งอุปกรณ์และระบบท่อตามที่ออกแบบไว้
- 4) ศึกษาการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สกรับเบอร์ทางทฤษฎีและปฏิบัติ
- 5) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องสครับเบอร์และมลพิษทางอากาศ

2.1 ประเภทและการใช้งานเครื่องสครับเบอร์แบบต่างๆ

การใช้เครื่องสครับเบอร์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ในหลายกระบวนการ เนื่องจากการใช้งานที่ต่างกันจึงทำให้มีการออกแบบเครื่องสครับเบอร์หลายแบบเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของงานแต่ละอย่าง เครื่องสครับเบอร์สามารถจำแนกได้เป็น 6 ประเภทดังนี้

- 1) ประเภทเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง (Self-induced spray type) เช่น เครื่องสครับเบอร์แบบโรโตคอน N
- 2) ประเภทความดันน้ำ (Water pressure type) เช่น เครื่องสครับเบอร์แบบเวนทูรี เครื่องสครับเบอร์แบบเจ็ต (เครื่องสครับเบอร์แบบอินเจคเตอร์) หอสเปรย์ เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน
- 3) ประเภทฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed type)
- 4) ประเภทแพคทาวเวอร์ (Packed tower type)
- 5) ประเภทหมุน (Rotary type) เช่น Theisen washer, เครื่องสครับเบอร์แบบอิมพัลส์ หรือแบบจานหมุน เป็นต้น
- 6) ประเภทอิมพิงเจอร์ (Impinger type) เช่น Peabody scrubber

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องสกรีนแบบรีปรีประเภทต่าง ๆ

ชนิดของเครื่อง	ความเร็วก๊าช (ม.วินาที)	อัตราการไหลสูงสุด ของก๊าช (ลบ.ม./วินาที)	ความดันลด (มม.น้ำ)	อัตราส่วนอากาศต่อ ของเหลว (ลิตร/ลบ.ม.)	ความดัน น้ำ	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	หมายเหตุ
สกรีนเบอร์แบบ สปริง	0.5 - 2	10,000	5 - 50	0.05-1	สูง	3-5	ประหยัดและใช้กับ ความดันสูงได้
สกรีนเบอร์แบบเพค ทาวเวอร์	1 - 2	300	100 - 3,000	1-10	ต่ำ	1-2	ใช้ได้เฉพาะกับการ ไหลสวนทาง
สกรีนเบอร์แบบ ไซโคลน	1 - 2	5,000	50 - 150	0.5-5	ปานกลาง	1	ทำงานภายใต้ความ ดันบรรยากาศ
สกรีนเบอร์แบบ อิมพินเจอร์	5 - 100	5,000	50 - 200	1-5	ต่ำ	0.3	ใช้ได้ทั้งที่ในสุญญา ภาคและความดันสูง
สกรีนเบอร์แบบเจ็ต	5 - 20	1,000	0-200	5 - 50	สูง	0.5 - 1	ค่าใช้จ่ายสูง
สกรีนเบอร์แบบโรโต- คอน N	10 - 30	1,000	50 - 150	0.1 - 0.2	ต่ำ	0.5 - 1	มีปัญหาถ้าเกิดฟอง อากาศขึ้น
สกรีนเบอร์แบบ เวนจูรี	30 - 150	1,500	300 - 2,000	0.3 - 2	ปานกลาง	0.1 - 0.3	ค่าใช้จ่ายสูง

ชนิดของเครื่องสครับเบอร์ สามารถแบ่งแยกออกโดยใช้ลักษณะเฉพาะของแต่ละชนิดจากการกระจายตัวของของเหลวที่ใช้เป็นตัวกำจัดอากาศเสีย ตาราง 2.1 ได้แสดงลักษณะเฉพาะของเครื่องสครับเบอร์แต่ละชนิด เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงข้อดีและข้อด้อยของแต่ละชนิด

2.1.1 เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง



รูปที่ 2.1 เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง

ก. เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง ชนิดโรโตคอน N

ข. เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง ชนิดแชมเบอร์อย่างง่าย

ดังรูปที่ 2.1 เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง โดยเริ่มต้นจะบรรจุของเหลวปริมาณหนึ่งไว้ในห้อง (Chamber) และส่งก๊าซสกปรกผ่านด้วยความเร็วสูง ก๊าซสกปรกจะถูกชะล้างให้สะอาดโดยหยดน้ำและฟิล์มของน้ำที่เกิดขึ้นในห้อง

ลักษณะเด่นของเครื่องประเภทนี้คือ สามารถใช้น้ำปริมาณน้อยในการกำจัดอนุภาค โดยการหมุนเวียนน้ำที่ใช้โดยทั่วไป เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่กักเก็บได้ 50% คือ 1 ไมครอน และความดันสูญเสียประมาณ 150 มม.น้ำ

โดยทั่วไป ถ้าความเร็วของอากาศยิ่งสูง จำนวนของหยดน้ำละอองที่เกิดขึ้นจะยิ่งมาก และประสิทธิภาพการเก็บฝุ่นจะยิ่งสูงด้วย แต่ในขณะเดียวกันปริมาณของละอองไอน้ำ (Mist) ที่ติดออกไปกับก๊าซสะอาดจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมักต้องติดตั้งเครื่องกำจัดละอองไอน้ำ (Demister) ที่ทางออกของช่องอากาศ

2.1.2 เครื่องสครับเบอร์แบบเวนตูรี

เครื่องสครับเบอร์ แบบเวนตูรี (Venturi scrubber) เป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นสูงสุด โดยเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่กักเก็บได้ 50% คือประมาณ 0.1 ไมครอน

น้ำที่ป้อนเข้าตรงคอของเครื่องสครับเบอร์แบบเวนตูรี จะถูกเปลี่ยนให้เป็นหยดละอองโดยก๊าซที่ไหลด้วยความเร็วสูง แล้วกระจายไปสัมผัสกับอนุภาคในกระแสอากาศ เมื่อความเร็วของอากาศลดลงในท่อที่ขยายใหญ่ขึ้น หยดน้ำที่ถูกเร่งจนมีความเร็วสูงจะสัมผัสกับอากาศที่ช้าลงเพื่อเกิดการกักเก็บอนุภาคอีก

โดยทั่วไป ความเร็วของอากาศที่คอของเครื่องสครับเบอร์แบบเวนตูรีคือ 60 ถึง 90 เมตร/วินาที และความดันสูญเสียมีค่า 300 ถึง 900 มม.น้ำ ในกรณีของอนุภาคหยาบขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนขึ้นไป และในกรณีของอนุภาคที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ค่าอัตราส่วนปริมาตรระหว่างของเหลวและอากาศมีค่าประมาณ 0.3 ลิตร/ลบ.เมตร

เครื่องสครับเบอร์แบบเวนตูรีที่มีจานไหลล้น (Overflow disc type) จะมีประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคทัดเทียมกับเครื่องสครับเบอร์แบบเวนตูรีที่มีความดันสูญเสียเท่ากัน แต่เนื่องจากสามารถปรับพื้นที่เปิดรูปร่างในช่องคอให้กว้างขึ้นหรือแคบลงโดยการเลื่อนจานกลม

ขึ้นหรือลงได้ จึงสามารถปรับพื้นที่เปิดรูวงแหวนในช่วงคอตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอากาศได้ และป้องกันการลดลงของประสิทธิภาพการกักเก็บ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการดัดแปลงเครื่องสครับเบอร์แบบเวนจูรี

2.1.3 เครื่องสครับเบอร์แบบเจ็ต

น้ำชะล้างของเครื่องสครับเบอร์แบบเจ็ต (Jet scrubber) หรือเครื่องสครับเบอร์แบบอินเจคเตอร์ (Injector scrubber) ถูกฉีดพ่นเป็นเจ็ตไหลวนในช่วงคอของเครื่อง และเมื่อก๊าซไหลเข้าช่วงท่อที่ขยายใหญ่ขึ้น ความเร็วของก๊าซจะลดลง ทำให้เกิดการผสมชั้นอีกครั้งระหว่างก๊าซและของเหลวซึ่งมีความเร็วต่างกัน และเกิดการกักเก็บจับอนุภาคฝุ่นเพิ่มขึ้น โดยกลไกการปะทะด้วยแรงเฉื่อย กลไกการแพร่ เป็นต้น

อัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซจะประมาณ 10 ถึง 50 ลิตร/ลบ.เมตร และ
เส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่กักเก็บได้ 50% คือประมาณ 0.2 ไมครอน

2.1.4 เครื่องสครับเบอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด



รูปที่ 2.3 เครื่องสครับเบอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด

รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องสครับเบอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งมีเม็ดพลาสติกกลวง
จำนวนมาก ลอยอยู่ระหว่างตะแกรงด้านบนและล่างของฟลูอิดไดซ์เบด ฝุ่นในก๊าซสกปรกจะถูกชะ
ล้างออกโดยฟิล์มของน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของเม็ดพลาสติก

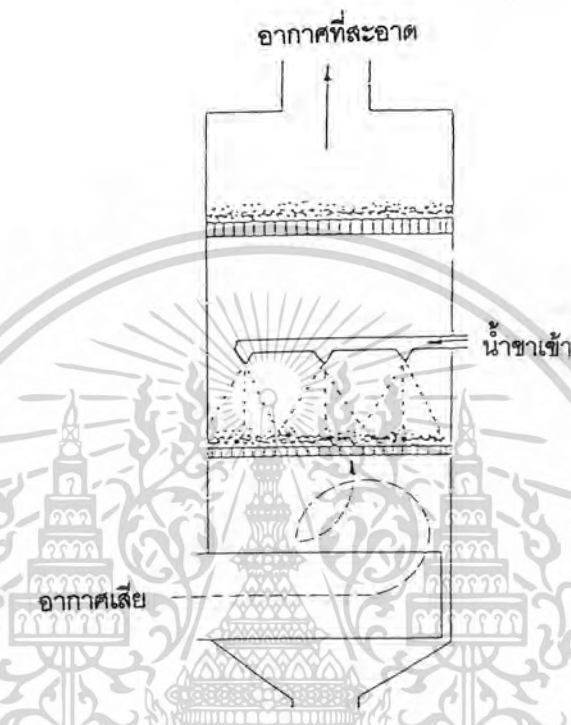
เครื่องสครับเบอร์แบบฟลูอิดไดซ์เบดมักใช้กำจัดอนุภาคละเอียดและก๊าซอันตราย
พร้อมกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่กักเก็บได้ 50% คือประมาณ 1 ไมครอน

2.1.5 เครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์

รูปที่ 2.4 ก๊าซจะไหลผ่านเครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์ (Packed tower scrubber) จากด้านล่าง และขึ้นผ่านชั้นวัสดุ (Fixed packing) ฝุ่นในก๊าซจะถูกชะล้างออกโดย
สเปรย์ซึ่งอาจไหลสวนทางหรือไหลขนานกับก๊าซ

อัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซในหอใส่วัสดุมีค่าประมาณ 2-3 ลิตร/ลบ.
เมตร และความเร็วของก๊าซประมาณ 1 เมตร/วินาที ความดันสูญเสียในเครื่องแบบนี้มีค่าแตกต่างกัน

ต่างกันอย่างมาก ขึ้นกับประเภทของเม็ดวัสดุที่ใส่ ความสูงของชั้นวัสดุ และการติดหรือไม่ติดเครื่องกำจัดละอองไอน้ำ ความดันสูญเสียต่ำสุดมีค่าประมาณ 100 มม.น้ำ

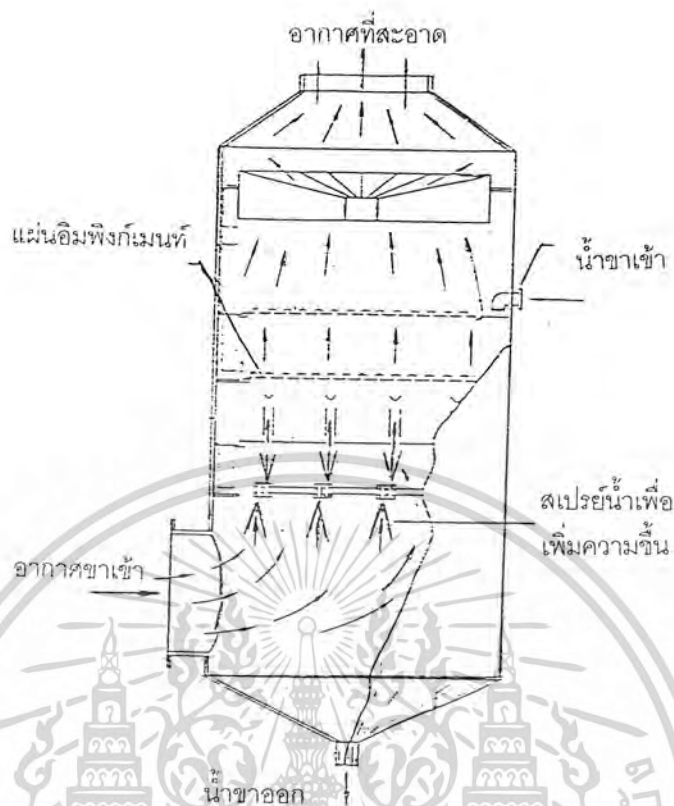


รูปที่ 2.4 เครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์

เม็ดวัสดุที่ใช้ควรมีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้เกิดการสร้างฟิล์มของน้ำได้ง่าย และควรมีความต้านทานต่อการไหลของก๊าซน้อย นอกจากนั้นการไหลกระจายของน้ำควรสม่ำเสมอและปริมาณที่ไหลล้นมีน้อย เม็ดวัสดุควรมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาด้วย เครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์มักใช้เก็บอนุภาคฝุ่นและก๊าซอันตรายพร้อมกัน

2.1.6 เครื่องสครับเบอร์แบบอิมพินเจอร์

รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของเครื่องสครับเบอร์แบบอิมพินเจอร์ ชนิดมีแผ่นอิมพิงก์เมนต์ ซึ่งใช้กลไกการปะทะด้วยแรงเฉื่อยในการเก็บอนุภาคฝุ่น อัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซที่ใช้มีค่าประมาณ 2-5 ลิตร/ลบ.เมตร ความดันสูญเสียประมาณ 200 มม.น้ำ และเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของอนุภาคที่เก็บได้ 50% ประมาณ 0.3 ไมครอน

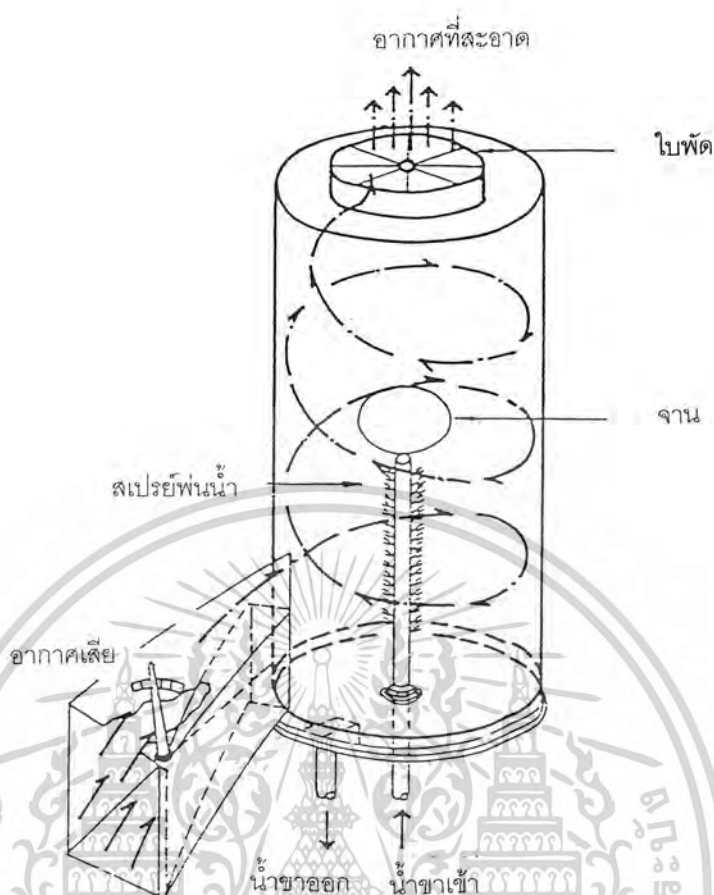


รูปที่ 2.5 เครื่องสครับเบอร์แบบอิมพัลเจอร์ ชนิดมีแผ่นอิมพัลเกอร์

2.1.7 เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน

เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน (Cyclone scrubber) มีท่อนิดเจ็ดซึ่งติดหัวฉีดสเปรย์จำนวนมากที่ใจกลางด้านล่างของเครื่อง ส่วนก๊าซสกปรกจะไหลในแนวเส้นสัมผัสคล้ายกับของไซโคลนทั่วไปในขณะที่ก๊าซสกปรกไหลวนขึ้นภายในเครื่องดังรูปที่ 2.9 หยดน้ำที่สเปรย์ออกจากหัวฉีดจะชะล้างฝุ่นสกปรกออก ทั้งอนุภาคฝุ่นหรือละอองไอที่เกาะติดกับหยดน้ำจะถูกเหวี่ยงแยกไปยังผนังของเครื่องโดยแรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการไหลวนของก๊าซ

โดยทั่วไป อัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซมีค่าประมาณ 1 ถึง 2 ลิตร/ลบ.เมตร และความดันสูญเสียประมาณ 120 มม.น้ำ ระบบนี้ทำงานได้ผลดีสำหรับเก็บฝุ่นที่ละลายได้ในของเหลวหรือละอองไอ



รูปที่ 2.6 เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน

2.2 คุณสมบัติของเครื่องเก็บฝุ่นแบบสครับเบอร์แต่ละชนิด

เครื่องสครับเบอร์แบบเหนี่ยวนำสเปรย์ขึ้นเอง ก๊าซสกปรกจะเป็นตัวพัดพาน้ำขึ้นข้างบน ดังนั้นถ้าความเร็วของก๊าซต่ำ การเกิดฟิล์มมีสูง หยดน้ำที่ได้จะละเอียดขึ้น และประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นจะสูงขึ้นด้วย

เครื่องสครับเบอร์แบบเวนทูรี เครื่องสครับเบอร์แบบเจ็ตหรือแบบความดันน้ำ ถ้าความเร็วของก๊าซในช่วงคอมมีสูง หยดน้ำที่ได้จะละเอียดขึ้น และประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นจะสูงขึ้นด้วย

เครื่องสครับเบอร์แบบไซโคลน หากความเร็วปรากฏ (Apparent velocity) ของก๊าซในหอต่ำ จะทำให้มีเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซกับหยดน้ำนานขึ้น และอัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซ

มีสูง ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นจะสูงด้วย เมื่อความดันน้ำที่ฉีดสเปรย์มีค่าสูง และหยดน้ำที่ได้ละเอียด อนุภาคฝุ่นที่เก็บได้จะละเอียดขึ้นด้วย

เครื่องสครับเบอร์แบบแพคทาวเวอร์ ถ้าความเร็วปรากฏของก๊าซในหอนมีค่าน้อย และเวลาที่ก๊าซสกปรกไหลอยู่ในชั้นวัสดุนาน ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นจะสูงด้วย

เครื่องสครับเบอร์แบบหมุน ถ้าความเร็วของการหมุนสูง และอัตราส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซมาก ประสิทธิภาพในการเก็บฝุ่นและกำลังที่ใช้จะมากขึ้นด้วย

โดยทั่วไปแล้ว ถ้าเครื่องแยกก๊าซและของเหลวที่ทางออกของเครื่องสครับเบอร์มีประสิทธิภาพในการเก็บหยดน้ำยิ่งสูง ประสิทธิภาพรวมของเครื่องเก็บฝุ่นแบบสครับเบอร์จะสูงตามด้วย อนึ่ง ความเข้มข้นของฝุ่นที่มีอยู่ในก๊าซสกปรกที่เข้าเครื่องเก็บฝุ่นแบบสครับเบอร์ทั่วไป ควรมีค่าน้อยกว่า 10 กรัม/ลบ.ม. ของก๊าซ

2.3 มลพิษทางอากาศ

2.3.1 แหล่งกำเนิดของมลพิษทางอากาศ

การที่จะทราบว่ามีสารอะไรบ้างซึ่งเมื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศแล้ว ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ และจะดำเนินการป้องกันและควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดมลพิษทางอากาศได้อย่างไรนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาก่อนว่า สารพิษดังกล่าวเกิดมาจากแหล่งประเภทใด ในการแบ่งแหล่งกำเนิดของมลพิษทางอากาศนั้น มีวิธีการแบ่งได้หลายวิธี ได้แก่ แบ่งตามลักษณะของการเคลื่อนไหวของแหล่งกำเนิดได้ 2 ประเภทคือ แหล่งที่ไม่เคลื่อนที่ (Station Source) เช่น การประกอบกิจการอุตสาหกรรมในโรงงาน การเผาไหม้เชื้อเพลิงในบ้านพักอาศัย และแหล่งที่เคลื่อนที่ (Mobile source) เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในรถยนต์หรือเรือยนต์หรือเครื่องบิน หรืออาจแบ่งตามกลุ่มประเภทของแหล่งกำเนิด ได้แก่ การคมนาคมขนส่ง โรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดฝุ่นละออง กิจกรรมการเกษตร การระเหยของก๊าซ หรืออื่น ๆ เช่น การบำบัดและกำจัดขยะมูลฝอย หรืออาจแบ่งตามตัวการที่กระทำให้เกิดสารพิษทางอากาศอย่าง

กว้าง ๆ ได้เป็น 2 แหล่ง คือ แหล่งที่มนุษย์สร้าง และแหล่งที่เกิดโดยธรรมชาติ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการแบ่งแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศตามตัวการที่กระทำดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่มนุษย์สร้าง
- 2) แหล่งที่เกิดมลพิษทางอากาศโดยธรรมชาติ

2.3.2 ประเภทของสารเจือปนในอากาศ

การแบ่งประเภทของสารเจือปนในอากาศ อาจแบ่งตามส่วนประกอบทางเคมีและกายภาพของสารเจือปนในอากาศได้เป็น 3 ประเภท คือ ก๊าซอินทรีย์ (Organic gases) ก๊าซอนินทรีย์ (Inorganic gases) และแอโรซอล (Aerosol)

1) ก๊าซอินทรีย์

ก๊าซอินทรีย์ หมายถึง ก๊าซที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน และอนุพันธ์ของธาตุคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอน ซึ่งรวมพวกไฮโดรคาร์บอนอยู่ในกลุ่มนี้และสารประกอบจำพวกที่ธาตุไฮโดรเจนถูกแทนที่ด้วยธาตุอื่น เช่น ออกซิเจน ฮาโลเจน ไนโตรเจน

2) ก๊าซอนินทรีย์

ก๊าซอนินทรีย์ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากธาตุอื่นซึ่งไม่ได้เกี่ยวกับสารประกอบของธาตุคาร์บอนที่เป็นพวกอินทรีย์ ทั้งนี้มีสารประกอบของคาร์บอนบางชนิดจัดอยู่ในพวกอนินทรีย์ ได้แก่ พวกออกไซด์ของคาร์บอน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ฮาไลด์ เป็นต้น

ก๊าซอนินทรีย์ที่เป็นสารเจือปนในอากาศที่สำคัญได้แก่ ออกไซด์ของไนโตรเจน ออกไซด์ของซัลเฟอร์รีดิคัลซัลเฟอร์ ออกไซด์ของคาร์บอน และโอโซนหรือออกซิแดนซ์ชนิดอื่น

3) แอโรซอล

แอโรซอล หมายถึง การฟุ้งกระจายของอนุภาคของของแข็ง อนุภาคของของเหลวหรือทั้งอนุภาคของของแข็งและอนุภาคของของเหลวรวมอยู่ด้วยกันในบรรยากาศ โดยจะแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศชั่วระยะเวลาหนึ่ง การแบ่งประเภทของแอโรซอลตามลักษณะทางกาย

ภาพของอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในแอโรซอลได้เป็น 2 ประเภทคือประเภทที่มีอนุภาคของของเหลวปนเปื้อนอยู่และประเภทที่มีอนุภาคของของแข็งปนเปื้อนอยู่ ถ้ามีอนุภาคของแข็งปนเปื้อนอยู่เรียกว่า “แอโรซอลของอนุภาคของของแข็ง (Aerosol of solid particle)” แต่ถ้ามีอนุภาคของของเหลวปนเปื้อนอยู่เรียกว่า “แอโรซอลของอนุภาคของของเหลว (Aerosol of liquid particle)” อนุภาคในแอโรซอลมักมีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตรถึง 1 ไมครอน ซึ่งมักจะมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของคอลลอยด์

3.1) แอโรซอลของอนุภาคของของเหลว ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศและมีสำคัญต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ กรด หรือน้ำมัน ซึ่งส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่มนุษย์เป็นผู้สร้างมากกว่าที่เกิดจากธรรมชาติ

3.2) แอโรซอลของอนุภาคของของแข็ง มีอยู่ในบรรยากาศมีอยู่มากมายหลายชนิด อาจจำแนกออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้หลายลักษณะ เช่น จำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้แก่ ควัน เหมม่า ละอองไอน้ำ ฝุ่น หมอก ฯลฯ แต่ในที่นี้จะจำแนกตามลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ อนุภาคของถ่านหรือเหมม่า เกลือและออกไซด์ของโลหะ และเกลืออนินทรีย์

2.3.3 ผลเสียของการเกิดมลพิษทางอากาศ

การเกิดมลพิษทางอากาศทำให้เกิดผลเสียหลายประการไม่ว่าจะเป็นทางตรง ได้แก่ ผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และทางอ้อม ได้แก่ การทำให้เกิดการบดบังแสงสว่างของดวงอาทิตย์ที่ส่งลงมายังพื้นผิวโลก หรือการทำลายทรัพย์สินหรือสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

2.3.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศ

มาตรฐานคุณภาพอากาศ ถูกกำหนดขึ้นเพื่อประโยชน์ต่อการใช้กฎหมายในการควบคุมดูแลคุณภาพอากาศ ทั้งในบรรยากาศและในสถานประกอบการหรือบริเวณที่อยู่อาศัยให้อยู่ในระดับที่เกิดความปลอดภัย โดยเฉพาะต้องคำนึงถึงสุขภาพอนามัย ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพเพื่อความสะดวกต่อการดำเนินการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย มักกำหนดเป็นมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศและมาตรฐานคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิด

1) มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ

ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ มักคำนึงถึงการที่จะควบคุมให้คุณภาพของอากาศมีความเหมาะสมต่อการดำรงชีพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ จึงได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของอากาศขึ้น เพื่อให้จะให้หน่วยงานของรัฐซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพอากาศใช้เป็นมาตรการสำหรับตรวจสอบและควบคุมดูแลให้สภาพแวดล้อมของบรรยากาศอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดดังกล่าว ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศไปในทางที่อาจจะก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพอากาศจะต้องดำเนินการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพของอากาศที่ระบายออกจากแหล่งกำเนิดให้เหมาะสม หรือเป็นการกระตุ้นเตือนให้ประชาชนผู้ที่ก่อให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศได้ตระหนักถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น โดยร่วมมือปรับปรุงและแก้ไขแหล่งกำเนิดมลพิษที่คนเป็นผู้ก่อ

2) มาตรฐานคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดของอากาศเสียที่เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์นั้น เป็นแหล่งสำคัญที่จะต้องควบคุมไม่ให้มีการปล่อยสารมลพิษอากาศ จนอาจเกิดปัญหาทั้งต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และต่อสิ่งมีชีวิตอื่น อีกทั้งต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมอื่นด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการควบคุมคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิดโดยเฉพาะแหล่งกำเนิดที่ไม่เคลื่อนที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานกำจัดขยะมูลฝอย แหล่งกำเนิดสารพิษในอากาศ ดังกล่าวนี้อาจดำเนินการควบคุมคุณภาพอากาศในบรรยากาศการปล่อยสารพิษให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ง่ายกว่าการควบคุมแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์ เรือยนต์ เครื่องบิน มาตรฐานคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิดมีความสัมพันธ์กับการควบคุมคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยตรง ดังนั้นถ้าหากมีการควบคุมมาตรฐานคุณภาพอากาศจากแหล่งกำเนิดได้ผลตามเกณฑ์กำหนดแล้วย่อมทำให้อากาศมีคุณภาพดีตามไปด้วย

โรงงานอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดสารพิษจากอากาศที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่จะต้องมีการใช้เชื้อเพลิงในการประกอบอุตสาหกรรม

เช่น อุตสาหกรรมถลุงแร่ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตเองก็อาจมีการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในรูปต่างๆ เช่นอุตสาหกรรมโซดาไฟอาจปล่อยสารปนเปื้อนในรูปของก๊าซคลอรีน หรือการผลิตกรดฟอสฟอริกอาจให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมา ในการประกอบอุตสาหกรรมที่อาจมีการปล่อยสารปนเปื้อนออกมาสู่บรรยากาศนั้น มักที่จะต้องมีการใช้อุปกรณ์ในการกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ เหล่านั้นให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



บทที่ 3

ทฤษฎี

การควบคุมมลภาวะที่แหล่งกำเนิดโดยการกักเก็บด้วยของเหลว เป็นการกำจัดโมเลกุลทั้งในสภาวะไอของก๊าซและอนุภาคของแข็งที่ออกจากก๊าซทั้ง โดยการอาศัยหยดของเหลวหรือฟิล์มของเหลว สิ่งที่แตกต่างกันกับวิธีอื่น คือ การทำงาน 2 ขั้นตอน ได้แก่ การกักเก็บอนุภาคด้วยของเหลวที่ใช้กักเก็บ และการแยกของเหลวที่ใช้แยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซออก ทั้งนี้ตัวกลางที่เป็นของเหลวสามารถลดอุณหภูมิของอากาศเสียที่ออกจากกระบวนการซึ่งมีอุณหภูมิสูงได้ด้วย

กลไกที่มีบทบาทในการจับสารอนุภาคในเครื่องสครับเบอร์ อาศัยตั้งแต่แรงเฉื่อย แรงโน้มถ่วง การสกัดกั้น (Interception) การแพร่ (Diffusion) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ กลไกของการถ่ายเทมวลระหว่างโมเลกุลที่เป็นก๊าซคือ การแพร่ของโมเลกุลของก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำ ก๊าซที่แพร่ไปถึงหยดหรือฟิล์มของของเหลวจะถูกดูดซึมเชิงเคมีโดยของเหลวอย่างรวดเร็วถ้าเลือกใช้ของเหลวที่เหมาะสมกับก๊าซที่ต้องการกำจัด ดังนั้นกลไกของการแพร่จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซในเครื่องสครับเบอร์

การถ่ายเทความร้อนอาจไม่มีความสำคัญสำหรับเครื่องสครับเบอร์ แต่การถ่ายเทมวลหรือการถ่ายเทโมเมนตัมจะมีความสำคัญเสมอ อัตราการถ่ายเทมวลจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเก็บโมเลกุลก๊าซ ส่วนอัตราการถ่ายเทโมเมนตัมจะกำหนดค่าความดันลดเนื่องจากความเสียดทาน และค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้

ความสามารถ (Capacity) จะถูกกำหนดโดยอัตราการไหลสูงสุดที่เครื่องสครับเบอร์ยังคงสามารถทำงานได้ ซึ่งถ้าอัตราการไหลของอากาศมากกว่าอัตราการไหลสูงสุดแล้ว ของเหลวจะถูกพาออกไปกับอากาศปริมาณในมากเกินไปหรือจนหมด หรือทำให้ความดันลดมีค่ามากเกินไป

หลักทั่วไปก็คือ ถ้าต้องการประสิทธิภาพสูงขึ้น ความสูง (หรือความยาว) ของเส้นทางที่ใช้ในการกักเก็บจะต้องเพิ่มขึ้น ถ้าต้องการความสามารถสูงขึ้น พื้นที่หน้าตัดของเครื่องจะต้องมากขึ้น

3.1 กลไกเบื้องต้นในการกักเก็บอนุภาค

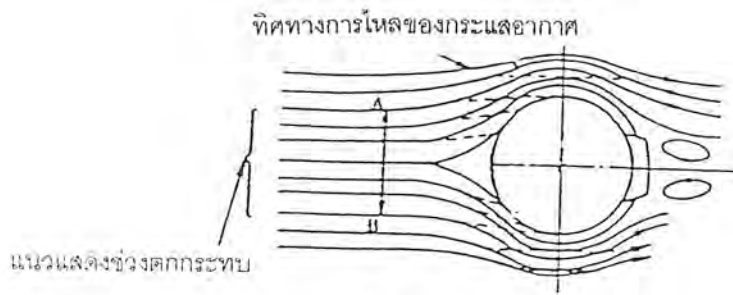
เครื่องสเปกโตรัมเบอริ์โดยทั่วไป จะทำงานโดยกระแสดำอากาศที่มีอนุภาคปะปนอยู่ เคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำหรือของเหลวอื่นที่ใช้เป็นตัวกลางในการกักเก็บอนุภาคเหล่านั้นออกจากกระแสดำอากาศ ซึ่งประกอบด้วยกลไกพื้นฐานที่สำคัญ คือ

3.1.1 การกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial impaction)

หยดของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านกระแสดำอากาศที่มีอนุภาคปะปนอยู่ อนุภาคบางส่วนจะเคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำนี้ไปกับอากาศ แต่จะมีอนุภาคที่ติดอยู่กับผิวหน้าของหยดของเหลว เนื่องจากการกระทบกันด้วยแรงเฉื่อย จากการที่ทั้งสองกระแส (อากาศและหยดของเหลว) เคลื่อนที่สวนทางกัน ทำให้อนุภาคขนาดเล็กนี้ที่ปะปนอยู่ในกระแสดำอากาศถูกพาไปกับหยดของเหลวตามทิศทางการเคลื่อนที่ของหยดของเหลว

จากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคอยู่ในแนว AB ซึ่งเป็นแนวที่สามารถเกิดกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อยนี้ แต่ถ้าอยู่ห่างจากแนว AB นี้ออกไปแล้ว อนุภาคจะผ่านหยดของเหลวไปโดยไม่เกิดการกระทบ แต่อาจเกิดกลไกการสกัดกั้นที่ทำให้อนุภาคถูกยึดติดกับผิวของของเหลวต่อไปได้อีก

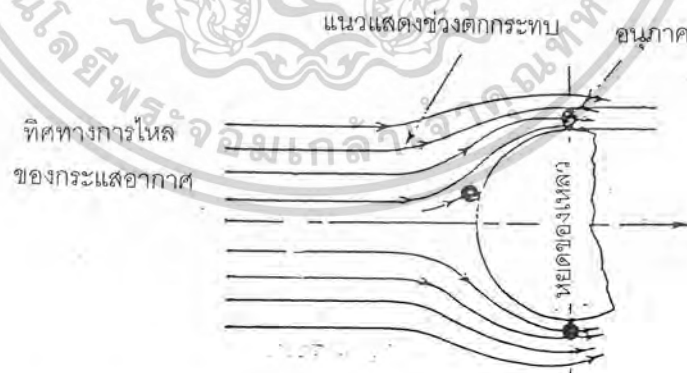
การกระทบด้วยแรงเฉื่อยจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอน ยิ่งอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคมีมากขึ้นและความเร็วสัมพัทธ์เทียบกับหยดของเหลวจะสูงขึ้น ทำให้เกิดโมเมนตัมในการปะทะมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกักเก็บจากกลไกนี้เพิ่มยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.1 กระแสการไหลของอากาศที่ผ่านหยดของเหลว ซึ่งแสดงแนวกระทบ AB ของหยดของเหลว ซึ่งเป็นหลักการของกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย

3.1.2 การสกัดกัน (Interception)

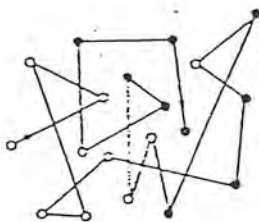
กลไกการสกัดกันและการกระทบด้วยแรงเฉื่อยมีลักษณะกลไกที่คล้ายคลึงกัน และเกิดขึ้นเกือบพร้อม ๆ กัน จากรูปที่ 3.2 แสดงอนุภาคที่ปะปนอยู่ในอากาศเคลื่อนที่ตามทิศทางของกระแสอากาศ ขณะที่เคลื่อนที่ผ่านหยดของเหลว เส้นทางการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศจะโค้งออกจากหยดของเหลว อนุภาคที่อยู่ใกล้หยดของเหลวจะมีความเร็วลดลงและไม่สามารถเร่งความเร็วได้เพียงพอที่จะเคลื่อนที่ตามกระแสอากาศไป อนุภาคจึงสัมผัสกับหยดของเหลวและถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของของเหลวด้วยแรงตึงผิวของหยดของเหลว



รูปที่ 3.2 การเก็บอนุภาคโดยการสกัดกันอย่างเดียว

กลไกการสกัดกันจะช่วยเสริมให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคให้สูงขึ้น นอกเหนือจากกลไกการกระทบด้วยแรงเฉื่อย

3.1.3 การแพร่ (Diffusion)



รูปที่ 3.3 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

อนุภาคที่ปะปนในอากาศจะเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) เพราะจากการถูกชนถี่ ๆ และสม่ำเสมอโดยโมเลกุลของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงปรากฏการณ์นี้ การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาคนขนาดเล็กมาก ๆ เปรียบได้กับการแพร่ของโมเลกุลของก๊าซที่ละลายในก๊าซอีกชนิดหนึ่ง เมื่ออนุภาคที่ละเอียดมาก ๆ หรือโมเลกุลของก๊าซแพร่ไปชนกับสิ่งที่กีดขวาง เช่น ชั้นฟิล์มหรือหยดของเหลวก็就会被ยึดติดที่นั่น การแพร่จึงเป็นกลไกที่สำคัญมากในการจับอนุภาคนขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.1 ไมครอน และในการดูดซึมโมเลกุลก๊าซ

ความเร็วที่อนุภาคจะถูกยึดติดกับผิวของหยดของเหลวโดยการแพร่นั้น จะแปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D) ของอนุภาคนั้น ๆ ดังในตารางที่ 3.1 เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าสูงขึ้น

ถ้าอนุภาคมีขนาดและลักษณะเหมือนกัน ปริมาณที่อนุภาคถูกกักเก็บโดยกลไกการแพร่นี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวและความเร็วของก๊าซมีค่าน้อยลง ในขณะที่เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคและหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคและโมเลกุลของก๊าซในน้ำ

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (ตร.ซม./วินาที)
0.5	6.4×10^{-7}
0.1	6.5×10^{-6}
0.01	4.4×10^{-4}
0.001	4.1×10^{-2}
โมเลกุลของซิลเฟอร์ไดออกไซด์	11.8×10^{-2}

3.2 การหาประสิทธิภาพจากแบบจำลองกลไกการกักเก็บอนุภาค

3.2.1 แบบจำลองของหอสเปรย์ (Spray chamber)

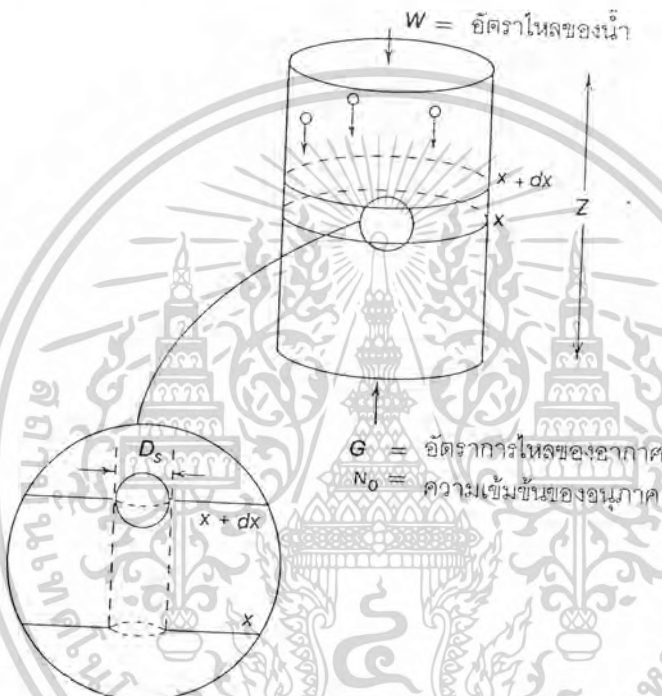
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของหอสเปรย์อย่างง่าย คือ น้ำจะถูกทำให้เป็นฝอยโดยจะเข้าทางด้านบนของหอและตกลงโดยอิสระสวนทางกับกระแสก๊าซที่ไหลขึ้นด้านบน ส่วนน้ำที่ได้จับอนุภาคออกจากก๊าซแล้วจะถูกนำไปบำบัดเพื่อแยกของแข็งออกหรือนำมาใช้หมุนเวียนในเครื่องสครับเบอร์อีก ระบบของหอสเปรย์ ดังรูปที่ 3.4 สมมติให้หยดของเหลวที่ตกลงมามีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_s เท่ากันทั้งหมด มีอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) ที่ทางเข้าด้านบนของหอสเปรย์เท่ากับ W (ลบ.ม. ต่อวินาที) จำนวนหยดของเหลวต่อวินาที ที่ถูกป้อนเข้าทางด้านบนของหอและผ่านที่จุดใด ๆ ในหอคือ $W/[(\pi/6)D_s^3]$ ส่วนความเข้มข้นของของเหลวที่จุดใด ๆ ในหอจะเท่ากับ $W/[(\pi/6)D_s^3 A_c V]$ เมื่อ V คือ ความเร็วที่ตกลง (Fall velocity) ของหยดของเหลว และ A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของหอสเปรย์

ถ้าหยดของเหลวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_s กำลังตกลงในอากาศที่หยุดนิ่งแล้ว จะมีความเร็วปลาย (Terminal velocity , V_t) ของหยดน้ำนั้น จะเป็นแรงต้าน (Drag force) ที่จะถูกทำให้สมดุลโดยแรงโน้มถ่วง (Gravity force) บนหยดของเหลวในหอสเปรย์ ความเร็วที่ตกลงของหยดของเหลว V เป็นความเร็วเมื่อเทียบกับแกนที่อยู่นิ่ง (Fixed coordinate) ในขณะที่ก๊าซ

ไหลขึ้นด้วยความเร็ว V_g ดังนั้น V จึงไม่เหมือนกับ V_r เนื่องจากอิทธิพลของก๊าซที่พุ่งขึ้น ความเร็วที่ตกลงของหยดของเหลว (V) หาได้โดยเท่ากับแรงต้านและแรงโน้มถ่วง

สมการของแรงต้านเขียนได้ดังนี้

$$F_{\text{drag}} = \frac{\pi}{8} C_D \rho_g D_s^2 (V + V_g)^2 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.4 ห่องสเปรย์ส่วนเล็ก ๆ ที่ใช้ในการพิจารณา

โดยที่แรงต้านที่เกิดขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหยดของเหลวกับก๊าซ , $V_g + V$ โดยแรงโน้มถ่วงที่เกิดขึ้นเท่ากับ

$$F_{\text{gravity}} = \frac{\pi}{6} D_s^3 (\rho_p - \rho_g) g \quad (3.2)$$

จะพบว่าผลรวมของความเร็วที่ตกลงค่าใหม่กับความเร็วของก๊าซที่พุ่งขึ้น (Rising gas velocity) จะเท่ากับความเร็วปลายที่ตกลงในอากาศที่หยุดนิ่ง

$$V_g + V = V_r \quad (3.3)$$

เมื่อทราบขนาดของหยดของเหลว จะสามารถคำนวณหา V_t ได้ และเมื่อให้ V_0 เป็นค่าความเร็วของก๊าซ ก็จะสามารถหาค่าความเร็วของหยดของเหลวที่ตกลง V ได้จากสมการ (3.3)

ในการหาประสิทธิภาพของการกักเก็บโดยรวม (Overall collection efficiency) ของหอสเปรย์จำเป็นต้องคำนวณหาประสิทธิภาพการกักเก็บ (Collection efficiency) ของอนุภาคบนแต่ละหยดของเหลว ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรทรงกระบอกของก๊าซที่สมมติขึ้นที่ใช้กักเก็บอนุภาคออกไปต่อพื้นที่ผิวหน้าของหยดของเหลว ดังแสดงในรูป 3.4 ซึ่งพิจารณาส่วนเล็ก ๆ (Differential section) เป็นห้อง ๆ หนึ่ง จำนวนอนุภาคที่ถูกดึงออกต่อวินาทีจากกระแสก๊าซเทียบกับ dx ก็คือ

$$V_0 A_c (N|_x - N|_{x+dx})$$

จำนวนอนุภาคที่คำนวณได้นี้ ใช้ในสมการเพื่อหาผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซที่ผ่าน dx ซึ่งอนุภาคทั้งหมดถูกดึงออกกับจำนวนอนุภาคทั้งหมดในขาเข้าต่อวินาที โดยจำนวนอนุภาคทั้งหมดในขาเข้าต่อวินาทีนี้เท่ากับ $V_0 A_c (N|_x)$ ดังนั้นต้องหาอัตราส่วนของปริมาตรการไหล (volumetric flow) ของก๊าซที่ผ่าน dx ซึ่งอนุภาคทั้งหมดถูกดึงออกไป

ระยะ dx เป็นระยะทางที่หยดของเหลวตกในเวลา dt สัมพันธ์กับห้องทรงกระบอกที่สมมติขึ้น นั่นคือ

$$dx = V dt \quad (3.4)$$

ระหว่างเวลา dt ปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่านห้องทรงกระบอกที่สมมติ ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $\frac{\pi}{4} D_s^2$ พื้นผิวหน้าของหยดของเหลวเท่ากับ

$$\left(\frac{\pi}{4} D_s^2 \right) V_t dt$$

เมื่อ V_t คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหยดของเหลวกับก๊าซ ซึ่งปริมาณนี้สามารถแสดงในเทอมของ dx ได้ว่า

$$\left(\frac{\pi}{4}D_s^2\right)\frac{V_t}{V} dx$$

ปริมาตรอากาศที่อนุภาคถูกกักเก็บออกไปหมดโดยหยดของเหลวหนึ่งหยด มีดังนี้

$$\eta\left(\frac{\pi}{4}D_s^2\right)\frac{V_t}{V} dx$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของหยดของเหลวแต่ละหยด ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดของอากาศที่ถูกกักเก็บอนุภาคออกไปต่อวินาทีโดยหยดของเหลวทั้งหมด ใน dx คือ

$$\eta\left(\frac{\pi}{4}D_s^2\right)\frac{V_t}{V} dx \frac{W}{(\pi/6)D_s^3}$$

อัตราส่วนของปริมาตรทั้งหมดของอากาศที่ถูกกักเก็บอนุภาคออกไปต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ผ่าน dx คือ

$$\frac{[\eta(\pi/4)D_s^2(V_t/V)dx]\{W/[(\pi/6)D_s^3]\}}{V_g A_c}$$

และจำนวนอนุภาคที่ถูกกักเก็บออกไปจาก dx โดยหยดของเหลวต่อวินาที คือ

$$\frac{[\eta(\pi/4)D_s^2(V_t/V)dx]\{W/[(\pi/6)D_s^3]\}}{V_g A_c} \cdot N|_x V_g A_c$$

ดังนั้น

$$N|_x - N|_{x+dx} = \frac{[\eta(\pi/4)D_s^2(V_t/V)dx]\{W/[(\pi/6)D_s^3]\}}{V_g A_c} \cdot N|_x \quad (3.5)$$

เมื่อให้ลิมิต dx เข้าใกล้ศูนย์ ($dx \rightarrow 0$) จะได้

$$\frac{dN}{dx} = - \left[\frac{3}{2} \eta \left(\frac{v_t}{v} \right) \frac{W}{v_g A_c} \frac{1}{D_s} \right] \cdot N \quad (3.6)$$

อินทิเกรตสมการ (3.13) โดยให้ $N(0) = N_0$ จะได้

$$N(Z) = N_0 \exp - \left[\frac{3}{2} \eta \left(\frac{v_t}{v} \right) \frac{W}{v_g A_c} \frac{Z}{D_s} \right] \quad (3.7)$$

ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคโดยรวม คือ

$$\begin{aligned} \eta_i &= 1 - \frac{N(Z)}{N_0} \\ &= 1 - \exp \left[- \frac{3}{2} \eta \left(\frac{v_t}{v} \right) \frac{W}{v_g A_c} \frac{Z}{D_s} \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

พจน์ $W/v_g A_c$ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ อัตราส่วนนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการใช้งานของเครื่องสกรับเบอร์ โดยทั่วไปอัตราส่วนนี้จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 20 แกลลอนของของเหลวต่อ 1,000 ลบ.ฟุตของก๊าซ และอัตราส่วนนี้ยังใช้หาจำนวนของหยดของเหลวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของก๊าซ ซึ่งเท่ากับ $6W/\pi D_s^3 G$

จากสมการที่ (3.15) จะได้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมของของหอสเปรย์เพิ่มขึ้นเมื่อ

- ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาค (η) เพิ่มขึ้น
- ความยาวห้องสเปรย์ (Z) เพิ่มขึ้น
- อัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (W/G) เพิ่มขึ้น
- เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลว (D_s) ลดลง

3.2.2 การกักเก็บอนุภาคบนหยดน้ำทรงกลม

ประสิทธิภาพในการกักเก็บของหยดน้ำทรงกลม (η) พิจารณาได้จากอัตราส่วนจำนวนครั้งของการชนระหว่างหลายอนุภาคกับหยดน้ำทรงกลม 1 หยด กับอนุภาคทั้งหมด/วินาทีที่ไหลเข้าไปในปริมาตรทรงกระบอกที่สมมติขึ้น ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $\pi D_s^2/4$ ค่า η สามารถหาได้จากกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless groups) เมื่อ η ขึ้นกับ 8 ตัวแปรดังนี้ $D_p, D_s, V, V_g, \mu_w, \mu_{air}, D, \rho_{air}$ ซึ่งตัวแปรไร้มิตติดังกล่าว มีดังนี้

$$Re = \frac{D_s V_t \rho_{air}}{\mu_{air}} \quad \text{เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds number)}$$

$$Sc = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air} D} \quad \text{ชมิดท์นัมเบอร์ (Schmidt number)}$$

$$St = \frac{\rho_p D_p^2 V_t}{18 \mu_{air} D_s} \quad \text{สโตกส์นัมเบอร์ (Stokes number)}$$

$$K = \frac{D_p}{D_s} \quad \text{อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคกับหยดน้ำ}$$

$$\omega = \frac{\mu_w}{\mu_{air}} \quad \text{อัตราส่วนของค่าความหนืดของน้ำกับอากาศ}$$

ปี ค.ศ. 1983 Slinn ได้เสนอสมการทั่วไปสำหรับหาประสิทธิภาพในการกักเก็บของหยดน้ำทรงกลม

$$\eta = \frac{8}{Re \cdot Sc} \left[1 + \frac{0.4}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/3} + \frac{0.16}{\sqrt{2}} Re^{1/2} Sc^{1/2} \right] + 4K \left[\omega^{-1} + (1 + \sqrt{2} \cdot Re^{1/2}) K \right] + \left[\frac{2 \cdot St - S.}{2 \cdot St - S. + \frac{2}{3}} \right] \quad (3.9)$$

$$\text{โดย } S. = \frac{1.2 + (1/12) \cdot \ln(1 + Re/2)}{1 + \ln(1 + Re/2)}$$

พจน์แรกของสมการที่ (3.9) เป็นผลมาจากการแพร่แบบบราวเนียน พจน์ที่สองเป็นผลเนื่องมาจากการสกัตกัน และพจน์ที่สามอธิบายถึงการกระทบ สมการที่ (3.9) นั้นได้สมมติว่าทั้งหยดน้ำและอนุภาคมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อ ลบ.ซม. สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากับ 1.0 กรัม/ลบ.ซม. พจน์สุดท้ายในสมการที่ (3.9) จะต้องคูณด้วย $(\rho_w / \rho_p)^{1/2}$

จากรูปที่ 3.5 แสดงประสิทธิภาพในการกักเก็บของหยดน้ำทรงกลม η เป็นฟังก์ชันกับ D_p ที่ $D_s = 0.5, 1.0, 2.0$ และ 4.0 มม. ซึ่งได้จากสมการที่ (3.9)

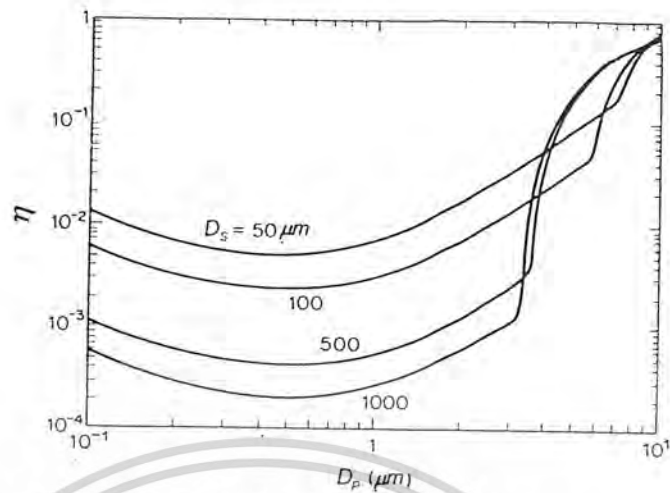
ที่ D_s คงที่ค่าหนึ่ง ในช่วงที่ D_p ต่ำ ๆ η จะลดลงเมื่อ D_p เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสำคัญของการแพร่แบบบราวเนียนลดลง ในขณะที่ขนาดอนุภาคใหญ่ η จะเพิ่มขึ้นเมื่อ D_p เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัตกัน ค่าต่ำสุดของประสิทธิภาพในการกักเก็บอยู่ในช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1.0 ไมครอน

ที่ D_p คงที่ค่าหนึ่ง η จะลดลงเมื่อ D_s เพิ่มขึ้นเนื่องจากความสำคัญของการสกัตกันลดลง และจะเห็นว่า η เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดที่ D_p ประมาณ 4 ไมครอน เนื่องจากผลของการกระทบด้วยแรงเฉื่อย

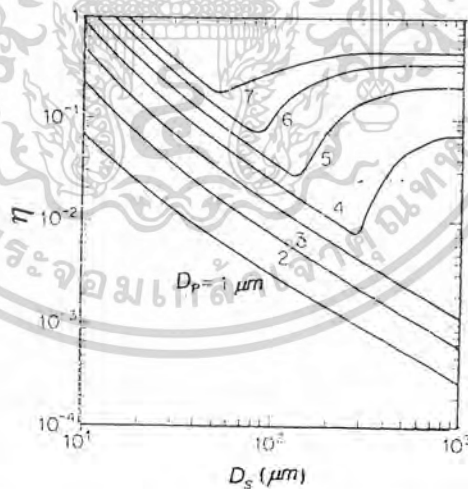
จากรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดง η เป็นฟังก์ชันของ D_s สำหรับ D_p ในช่วง 1 ถึง 7 ไมครอน จะได้ว่า η ที่เพิ่มขึ้นสำหรับ D_p ที่ใหญ่กว่า 4 ไมครอนนั้นเนื่องมาจากผลของการกระทบด้วยแรงเฉื่อย ซึ่งเห็นได้จากสมการที่ (3.9)

สมการที่ (3.9) เป็นสมการทั่วไปในการอธิบายสำหรับกลไกการกักเก็บอนุภาค (Collection mechanism) ทั้ง 3 แบบ แต่ในการใช้เครื่องสครับเบอร์นั้น การกระทบด้วยแรงเฉื่อยมักเป็นกลไกที่มีอิทธิพลในการแยกเอาอนุภาคออก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 1 ไมครอน ในปี ค.ศ. 1984 Calvert ได้แนะนำสมการที่เป็นทางเลือกของสมการที่ (3.9) สำหรับประสิทธิภาพในการกักเก็บ เนื่องจากการกระทบอย่างเดียวว่า

$$\eta = \left(\frac{St}{St + 0.35} \right)^2 \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.5 ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (η) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของอนุภาค (D_p) จากสมการที่ (3.9) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ (D_s) เท่ากับ 50, 100, 500 และ 1,000 ไมครอน สภาพของหยดน้ำตกลงในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อลบ.ซม.



รูปที่ 3.6 ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (η) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของหยดน้ำ (D_s) จากสมการที่ (3.9) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D_p) เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 ไมครอน สภาพของหยดน้ำตกลงในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อลบ.ซม.

จากรูปที่ 3.7 แสดง η จากสมการที่ (3.10) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ D_s สำหรับ D_p ช่วง 1 ถึง 7 ไมครอน และ $\rho_p = 1$ กรัมต่อ ลบ.ซม.

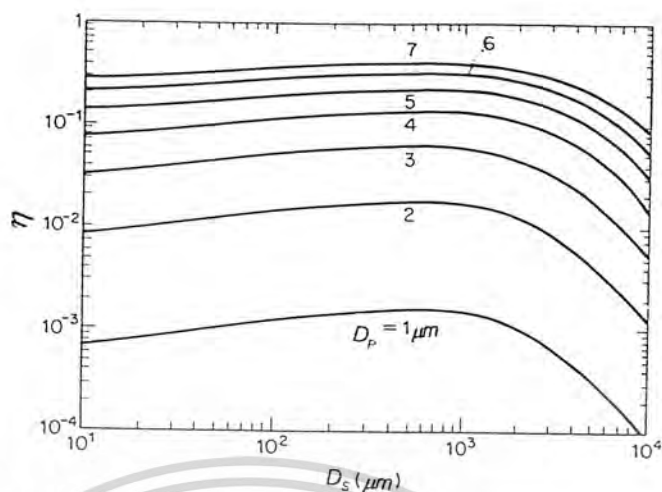
สำหรับหยดน้ำขนาดเล็ก จาก Stokes law regime จะได้ $V_t \approx D_s^2$ ดังนั้นถ้า D_s เพิ่มขึ้น ค่าสโตกส์นัมเบอร์ (St) จะเพิ่มขึ้นด้วย (แปรผันตาม D_s) จากสมการที่ (3.10) จะเห็นได้ว่าถ้า D_s เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า η เพิ่มขึ้นไปด้วย

สำหรับหยดน้ำขนาดกลาง (Intermediate) $V_t \approx D_s$ ทำให้ St คงที่ และ η ก็คงที่ด้วย

สำหรับหยดน้ำขนาดใหญ่ V_t จะมีค่าเพิ่มขึ้นได้ช้ากว่า D_s ดังนั้นถ้า D_s เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสโตกส์นัมเบอร์ลดลง ซึ่งจะทำให้ค่า η ลดลง ดังนั้นจะมีค่าของขนาดหยดน้ำ D_s ที่ทำให้ได้ค่า η สูงสุด ซึ่งมีค่าประมาณ 600 ไมครอน โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่า D_p ค่าสูงสุดของ η จะมากขึ้นเมื่ออนุภาคใหญ่ขึ้นและค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยอยู่ในช่วง ± 200 ถึง 300 ไมครอน ของ D_s ที่ประมาณ 600 ไมครอน

จากการเปรียบเทียบสมการที่ (3.9) กับสมการที่ (3.10) จะเห็นว่าสมการที่ (3.10) จะถูกต้องกว่าสำหรับขนาดของอนุภาค (D_p) มากกว่า 6 ไมครอน เมื่อขนาดของหยดน้ำอยู่ในช่วง 100 ถึง 1,000 ไมครอน

ผลกระทบทั้งหมดของ D_s ที่มีต่อประสิทธิภาพของหอสเปรย์โดยรวม (η_t) คือ ผลจากการเปลี่ยนแปลงของ V_t และ η โดยดูได้จากสมการที่ (3.8) เนื่องจาก η จะคงที่ด้วย D_s ประมาณ 600 ไมครอน ผลกระทบรวมต่อตัวแปร $\eta V_t / (V_t - V_g) \cdot D_s$ ที่ทำให้ η_t มีค่ามากที่สุดคือ ค่า D_s ในช่วงที่ต่ำ ๆ นั่นคือ ประมาณ 300 ถึง 400 ไมครอน



รูปที่ 3.7 ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดน้ำทรงกลม (η) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับขนาดของหยดน้ำ (D_s) จากสมการที่ (3.10) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D_p) เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 ไมครอน สภาวะของหยดน้ำตกลงในอากาศที่อยู่นิ่ง ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ อนุภาคที่ใช้มีความหนาแน่น 1 กรัมต่อลบ.ซม.

บทที่ 4

การออกแบบ

4.1 การออกแบบหอสเปรย์ (Spray Tower)

ในการคำนวณการออกแบบหอสเปรย์ที่ใช้ในโครงการนี้ ใช้ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. อุณหภูมิคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส
2. ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.165 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
3. อัตราเร็วของอากาศที่เข้าสู่เครื่องสครับเบอร์ประมาณ 20 เมตร/วินาที
4. ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 996 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
5. อัตราการไหลสูงสุดของน้ำในหอสเปรย์ 2.0×10^{-4} ลูกบาศก์เมตร/วินาที

4.1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ (d_c)

สำหรับเครื่องสเปรย์สครับเบอร์แบบไหลสวนทางกัน ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ขึ้นกับความเร็วของอากาศ ซึ่งสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ [1] คือ

$$d_c = \psi(G\rho_g^{0.5})^{0.5} \quad (4.1)$$

4.1.2 ความดันลดในหอสเปรย์ (ΔP)

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความดันลดในเครื่องสเปรย์สครับเบอร์จะมีค่าน้อย สำหรับที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 500 – 1,000 เมตรต่อชั่วโมง สามารถประมาณได้ว่าความดันลดจะมีค่าลดลง 1-2 มิลลิบาร์ต่อเมตร อย่างไรก็ตามสามารถคำนวณค่าความดันลดสูงสุดดังสมการ [1]

$$\Delta P = \frac{W_{\text{nozzle}} \rho_L Z}{(V_t - V_g) A_c} \quad (4.2)$$

สำหรับรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบหอสเปรย์ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และได้สรุปผลการคำนวณที่ได้ไว้ดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ = 0.4 เมตร

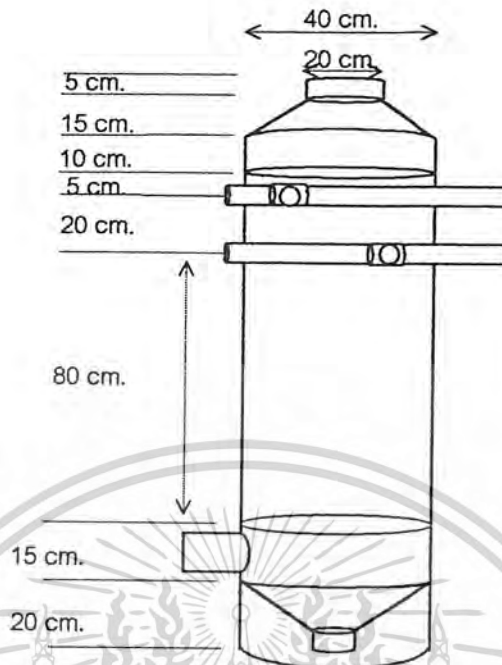
ความดันลดในหอสเปรย์ = 0.17 มิลลิบาร์

หอสเปรย์ที่ใช้ในการทดลองสร้างจากเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อป้องกันปัญหาการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ อากาศเสียจะเข้าสู่ด้านล่างของหอสเปรย์และปล่อยออกสู่บรรยากาศทางด้านบน ส่วนของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมจะถูกสเปรย์จากด้านบนของหอ จากนั้นจึงถูกปล่อยทิ้งออกทางด้านล่างสุดของคอลัมน์ สำหรับรายละเอียดในการออกแบบได้แสดงดังในรูปที่ 4.1

4.2 การออกแบบสเปรย์นอซเชิล

การเลือกใช้สเปรย์นอซเชิลที่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคสูงขึ้น โดยต้องพิจารณาถึงชนิดของสเปรย์นอซเชิล ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำ (Spray drop size) และมุมของการสเปรย์ (Spray angle) จากแนวศูนย์กลางเป็นสำคัญ ซึ่งมุมของการสเปรย์จะแสดงถึงรัศมีการกระจายตัวของหยดน้ำที่ครอบคลุมพื้นที่ในหอสเปรย์ของแต่ละนอซเชิล

ในการออกแบบสเปรย์นอซเชิลที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้เลือกใช้ชนิด Spiral Jet เนื่องจากสเปรย์นอซเชิลแบบนี้จะให้ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำที่สม่ำเสมอ และสามารถเข้ากับอัตราการไหลและความดันที่สภาวะการทดลองได้ ซึ่งลักษณะของหยดน้ำที่ถูกสเปรย์ออกจากนอซเชิล ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การออกแบบหัวสเปรย์



รูปที่ 4.2 นอซเซิลชนิด Spiral Jet และลักษณะของหยดน้ำที่ได้

สำหรับขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำที่ได้จากสเปรย์นอซเซิล สมการที่สามารถใช้ในการคำนวณ [2] คือ

$$D_s = \frac{1920\sqrt{\sigma_L}}{v_g\sqrt{\rho_L/62.3}} + 75.4 \left(\frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma_L\rho_L/62.3}} \right)^{0.45} \left(\frac{1000W_{nozzle}}{G} \right)^{1.5} \quad (4.3)$$

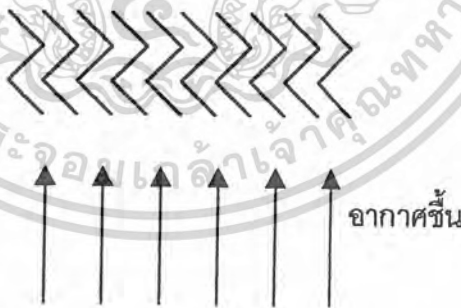
ซึ่งการคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำนี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก-2 และรายละเอียดคุณลักษณะของสเปรย์นอซเซิลที่ใช้ สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 รายละเอียดของนอซเชิล

ชนิดของสเปร์ยนอซเชิล	Spiral Jet
วัสดุที่ใช้ (material)	ทองเหลือง
ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำที่อัตราการไหลของน้ำที่กำหนดไว้	2476 ไมครอน
มุมนสเปร์ยที่ 0.7 บาร์	170 องศา
เส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ฟิส	4.0 มม.
จำนวนที่ใช้	2 ตัว

4.3 การออกแบบส่วนกำจัดละออง

ส่วนกำจัดละอองจะติดตั้งไว้บริเวณส่วนบนของหอสเปร์ย เพื่อให้กำจัดละอองของเหลวที่ปะปนออกมากับกระแสก๊าซที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยในการออกแบบ วัสดุที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งส่วนกำจัดละอองจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะของส่วนกำจัดละออง

4.4 การออกแบบระบบท่อและวาล์ว

ระบบท่อและวาล์วที่ใช้ในชุดทดลองเครื่องสเปร์ยสครับเบอร์ สามารถแยกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ระบบท่อและวาล์วที่ใช้ส่งผ่านอากาศเข้าสู่เครื่องสเปร์ยสครับเบอร์ และระบบท่อ

และวาล์วที่ใช้ส่งผ่านของเหลวที่เป็นตัวดูดซึมจากถังป้อนของเหลว ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนมีดังนี้

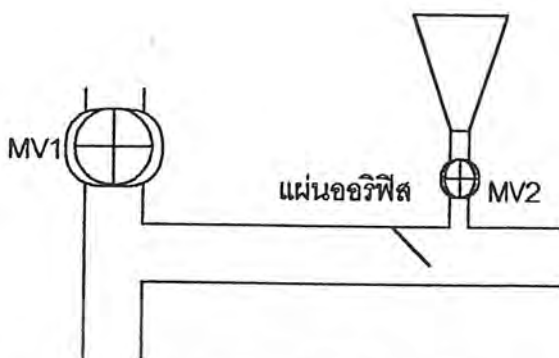
4.4.1 ระบบท่อและวาล์วของอากาศ

อากาศที่ออกมาจากเครื่องเป่าอากาศผ่านออกมาตามท่อขนาด 5.08 เซนติเมตร ยาว 1 เมตร ท่อ PVC ขนาด 5.08 เซนติเมตร ซึ่งมีข้อต่อ 3 ทาง เพื่อแยกกระแสของอากาศให้ไหลไปเป็น 2 ทาง อากาศที่จะเข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์จะไหลผ่านในแนวตรง และอากาศอีกส่วนหนึ่งจะถูกปล่อยขึ้นด้านบน ซึ่งติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลของอากาศ (MV1) โดยวาล์วที่ใช้เป็นแบบบอลวาล์วขนาด 3.81 เซนติเมตร การควบคุมความเร็วของอากาศที่เข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์ สามารถกระทำได้โดยปรับการปิด - เปิดของวาล์ว MV1 ในชุดทดลอง

ก่อนที่อากาศจะเข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์จะผ่านข้อต่อ 3 ทาง ซึ่งมีการติดตั้งแผ่นอริฟิตเพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ และได้ติดตั้งอุปกรณ์บ่อนสาร เข้ากับทางแยกด้านบนของข้อต่อ เพื่อให้อากาศที่เข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์มีความเข้มข้นของอนุภาคที่ต้องการ โดยระบบท่อและวาล์วควบคุมการไหลของอากาศได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4

4.4.2 ระบบท่อและวาล์วของตัวดูดซึม

ของเหลวที่ใช้เป็นตัวดูดซึมถูกสูบจากถังป้อนของเหลวด้วยเครื่องสูบน้ำ ท่อที่ส่งผ่านของเหลวทั้งในด้านการเข้า (Suction) และทางออก (Discharge) ของเครื่องสูบน้ำประกอบด้วยท่อ PVC ขนาด 2.54 เซนติเมตร ซึ่งก่อนที่ของเหลวเข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์ จะถูกแบ่งการไหลจากท่อส่งหลักไปเป็น 2 กระแส โดยติดตั้งข้อต่อ 3 ทางไว้ 2 ส่วน เพื่อแยกกระแสของเหลวจากท่อส่งหลัก ท่อ PVC ที่ใช้ส่งผ่านของไหลทั้งสองกระแสนั้นจะใช้ขนาด 1.27 เซนติเมตร และวาล์วควบคุมอัตราการไหลของของเหลวติดตั้งไว้ (MV3 และ MV4) วาล์วที่ใช้เป็นชนิดบอลวาล์วขนาด 1.27 เซนติเมตร สำหรับท่อส่งหลักนั้นเมื่อผ่านการแบ่งกระแสแล้วจะผ่านข้อต่อ 90 องศาเพื่อส่งผ่านของเหลวกลับเข้าสู่ถังป้อนของเหลวได้ โดยจะติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหลของของเหลว (MV5) ไว้เช่นเดียวกัน วาล์วที่ใช้เป็นชนิดบอลวาล์วขนาด 1.27 เซนติเมตร ซึ่งระบบท่อและวาล์วที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ส่วนของระบบท่อและวาล์วของอากาศ

การควบคุมอัตราการไหลของของเหลวที่เข้าสู่เครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในแต่ละกระแส กระทำได้โดยปรับการปิด - เปิดวาล์วที่ติดตั้งไว้ทั้ง 3 ตัวในชุดทดลอง

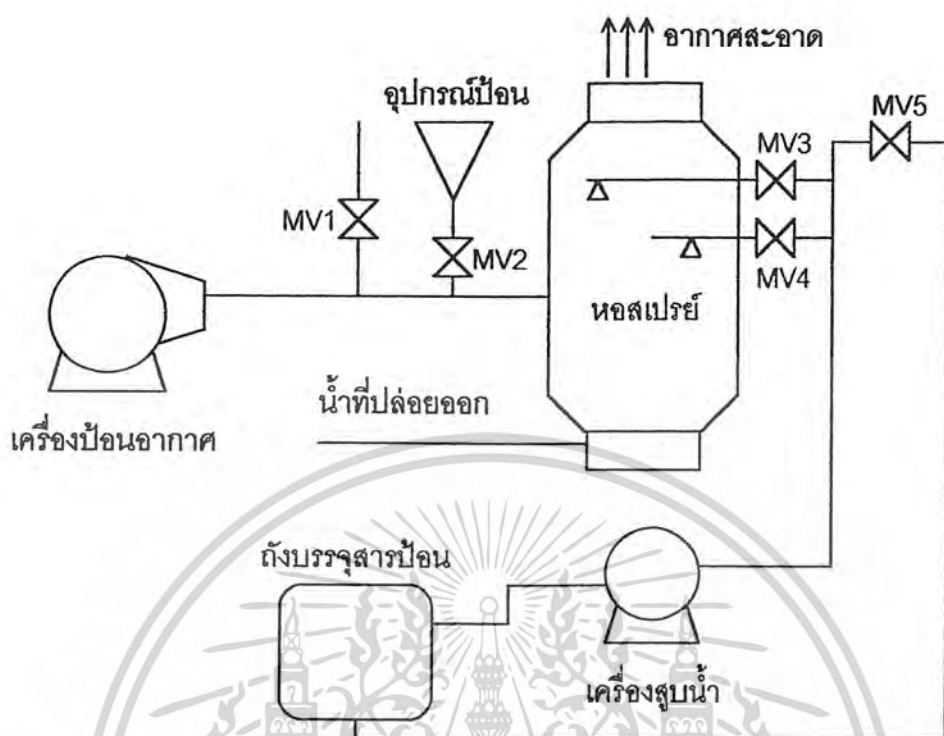
ของเหลวที่ผ่านการสเปรย์ในเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ จะถูกปล่อยทิ้งในส่วนล่างสุดของหอสเปรย์ โดยผ่านท่อ PVC ขนาด 3.81 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยข้อต่อลดขนาดท่อจาก 3.81 เซนติเมตร เป็น 2.54 เซนติเมตร ข้องอ 90 องศา และสายยางขนาด 2.54 เซนติเมตร เพื่อช่วยในการส่งผ่านของเหลว

4.5 การใช้พลังงาน

เครื่องสเปรย์สครับเบอร์ที่ใช้ในการทดลองมีแหล่งกำเนิดพลังงานกล 2 อย่างคือเครื่องสูบน้ำ (Pump) และเครื่องเป่าอากาศ (Blower) แต่ละเครื่องได้ทำการคำนวณและออกแบบ มีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 เครื่องสูบน้ำ

การคำนวณหา กำลังงานที่ใช้จริงของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน จึงคำนวณให้กำลังงานที่ใช้งานจริงเป็น 60% ของประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ จากข้อมูลเบื้องต้นและค่าที่ได้กำหนดขึ้นใช้นั้น สามารถทำการหา กำลังงานที่ใช้จริง ซึ่งในการทดลองใช้ 0.5 แรงม้า รายละเอียดการคำนวณจะแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.5 ส่วนของระบบท่อและวาล์วควบคุมในเครื่องสเปรย์สครับเบอร์

เครื่องสูบน้ำที่ใช้เป็นของ Polo มีคุณสมบัติดังนี้

- | | |
|------------------------------------|--------------|
| 1) อัตราการไหลสูงสุด | 40 ลิตร/นาที |
| 2) ความต่างศักย์ไฟฟ้า | 220 โวลต์ |
| 3) ความถี่ | 50 เฮิรตซ์ |
| 4) กำลังงาน | 0.5 แรงม้า |
| 5) ระดับของน้ำที่ออกจากปั๊ม (head) | 40 เมตร |

4.5.2 เครื่องเป่าอากาศ

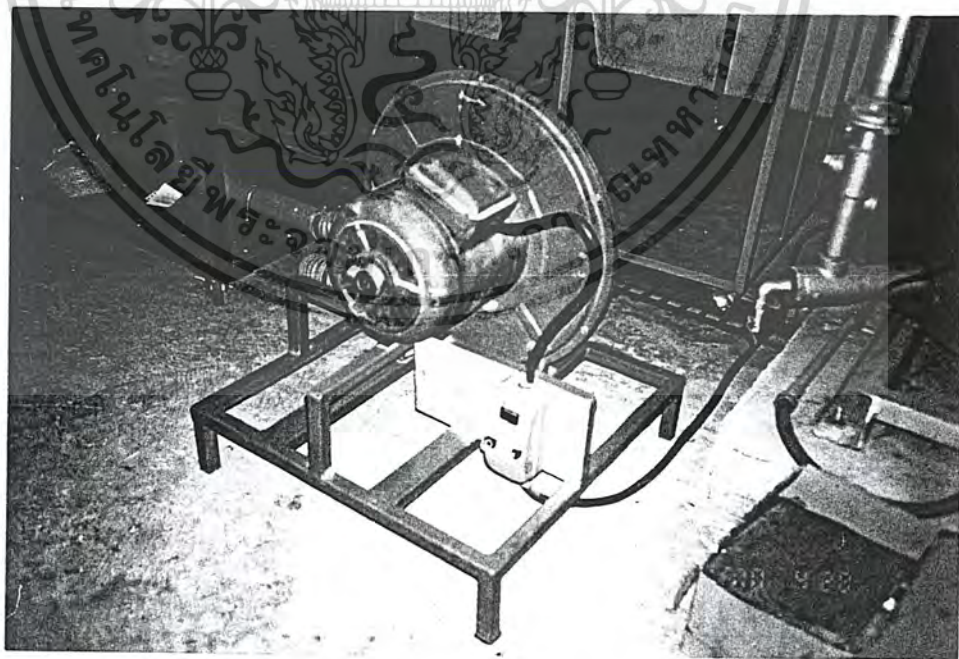
เครื่องเป่าอากาศที่ใช้เป็นเครื่องเป่าอากาศแบบ Centrifugal Blower ซึ่งได้ใช้ในเครื่องมือทดลองฟลูอิดไดเซชันเป็นหลัก ที่ได้ติดตั้งไว้แล้ว ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลต่าง ๆ มาใช้ได้ โดยให้ประสิทธิภาพการเป่าอากาศเท่ากับ 60% และมอเตอร์มีประสิทธิภาพ 80% ขนาดกำลัง

ที่ใช้จริงของมอเตอร์เท่ากับ 1 แรงม้า สำหรับเครื่องมือทดลองนี้ เครื่องเป่าอากาศที่ใช้เป็นของ บริษัท KEITH BLACKMAN LTD., LONDON โดยมีคุณลักษณะดังนี้

1) ชนิด (Type)	S.E.
2) ความต่างศักย์	400/440 โวลต์ 3 เฟส 50 เฮิร์ตซ์
3) กระแสไฟฟ้า	1.8 แอมแปร์
4) กำลังงาน	1 แรงม้า
5) จำนวนรอบต่อนาที	2850
6) Winding Rating	C.M.R

4.6 โครงสร้างภายนอก

เครื่องมือทดลองสเปย์สกรับเบอร์ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนคือ โครงสร้างของเครื่องเป่าอากาศและโครงสร้างของเครื่องสเปย์สกรับเบอร์ ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบโครงสร้างมีดังนี้



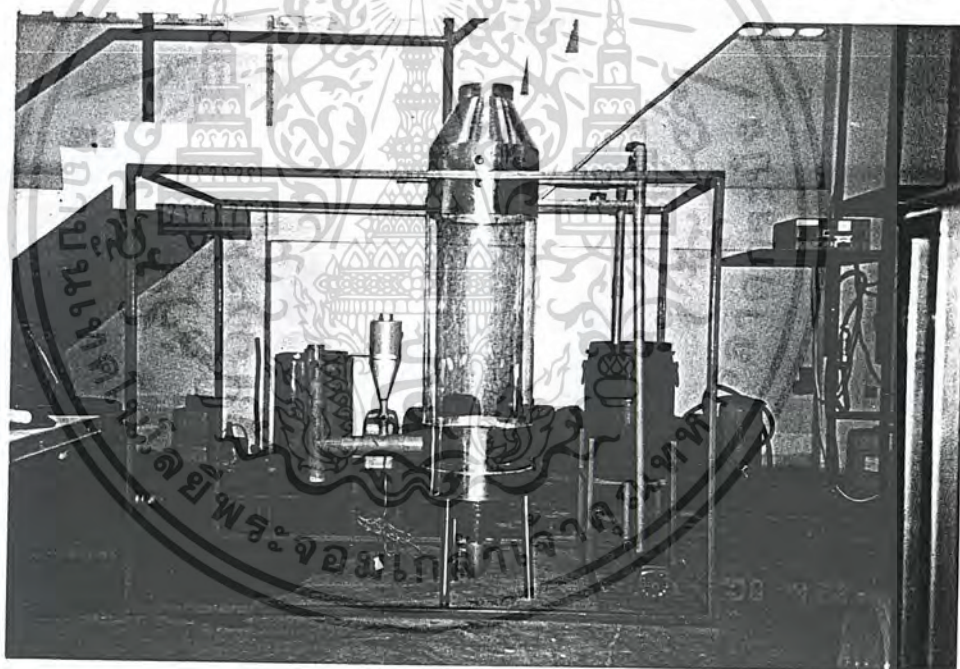
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของเครื่องเป่าอากาศ

4.6.1 โครงสร้างของเครื่องเป่าอากาศ

โครงสร้างของเครื่องเป่าอากาศจากเครื่องมือทดลองฟลูอิดไดเซชัน ที่ได้ออกแบบมีมิติ 60 ซม. $\times$ 60 ซม. $\times$ 65 ซม. ซึ่งวัสดุที่ใช้ประกอบโครงสร้างเป็นเหล็กกล่องขนาด 2.54 เซนติเมตร เชื่อมยึดติดกันโดยออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักของเครื่องเป่าอากาศได้ ดังรูปที่ 4.6

4.6.2 โครงสร้างของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์และเครื่องสูบน้ำ

โครงสร้างนี้มีมิติ 2 ม. $\times$ 1 ม. $\times$ 1.5 ม. วัสดุที่ใช้ประกอบโครงสร้างเป็นเหล็กกล่องขนาด 2.54 เซนติเมตร เชื่อมยึดติดกันโดยมีส่วนรองรับน้ำหนักอยู่ 3 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนของตัวเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ส่วนของเครื่องสูบน้ำ และส่วนของถังป้อนของเหลว ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์และเครื่องสูบน้ำ

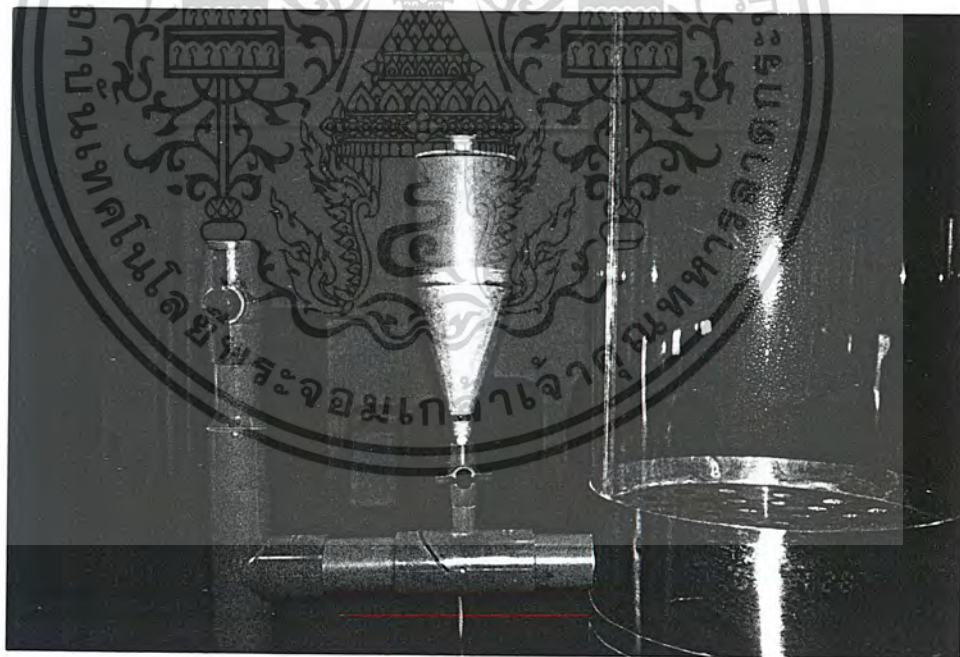
4.7 อุปกรณ์ป้อนสาร

อุปกรณ์ป้อนสารเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อบรรจุอนุภาคที่ต้องการให้เข้าสู่ระบบของท่ออากาศแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องสครับเบอร์ หลักการที่ใช้ในการป้อนสารคือการทำให้ระบบท่อของสารป้อนเป็นระบบสุญญากาศมากที่สุด โดยการติดตั้งแผ่นอริฟิสบริเวณหน้าช่องทางการไหลของ

อนุภาคก่อนเข้าสู่ระบบของท่ออากาศ เมื่อระบบท่อเป็นสุญญากาศแล้วจะสามารถดึงอนุภาคให้ผ่านเข้าสู่ระบบท่ออากาศได้

ตัวอุปกรณ์ป้อนสารมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วยท่อ PVC ขนาด 10.16 เซนติเมตร และวาล์ว MV2 เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอนุภาคได้ วาล์วดังกล่าวเป็นชนิดบอลวาล์วขนาด 1.27 เซนติเมตร นอกจากนี้ในตัวอุปกรณ์ป้อนสารได้ติดตั้งใบกวนซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เพื่อช่วยให้อนุภาคมีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น มอเตอร์ที่ใช้มีลักษณะดังนี้

- | | | |
|-----------------------|-------|------------|
| 1) ความเร็วรอบ | 5-6 | รอบต่อนาที |
| 2) กำลังงาน | 3 | วัตต์ |
| 3) ความต่างศักย์ไฟฟ้า | 240 | โวลต์ |
| 4) ความถี่ | 50/60 | เฮิรตซ์ |



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ป้อนสาร

บทที่ 5

การทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานของสเปรย์สครับเบอร์ ส่วนประกอบของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลอง มีลักษณะดังรูปที่ 4.5

5.1 การทดลองศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดผง ถั่ว

การดำเนินการทดลองใช้น้ำเป็นตัวจับอนุภาคผงถั่วขนาดต่างๆ ในกระแสดำช โดยจะพิจารณาถึงความเข้มข้นของผงถั่วในกระแสดำชและน้ำทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ เพื่อสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ได้

สำหรับอนุภาคตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ อนุภาคผงถั่วขนาด 60 ถึง 100 mesh, 100 ถึง 140 mesh และ มากกว่า 140 mesh ซึ่งในปฏิบัตินี้จะเรียกเป็น อนุภาคผงถั่วขนาด 60, 100 และ 140 mesh ตามลำดับ

5.1.1 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคที่มีขนาดอนุภาค (particle size) ที่แตกต่างกัน
- 2) สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ได้
- 3) ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค

5.1.2 อุปกรณ์และสารเคมี

- 1) ชุดทดลองเครื่องสเปรย์สครับเบอร์

- 2) น้ำ
- 3) ผงเถ้าขนาด 60, 100, และ 140 mesh
- 4) กระดาษกรอง (Filter paper) เบอร์ 2
- 5) กรวยแก้ว
- 6) บีกเกอร์ขนาด 50 มล.
- 7) นาฬิกาจับเวลา
- 8) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

5.1.3 วิธีทำการทดลอง

- 1) ก่อนการทดลองทุกครั้ง ต้องทำการตรวจสอบสถานะของวาล์วควบคุมของไหลทั้งของก๊าซและของน้ำ สำหรับระบบของอากาศ สถานะของวาล์ว MV1 อยู่ในสถานะเปิดสุด และ สถานะของวาล์ว MV2 อยู่ในสถานะปิดสุด ส่วนระบบของเหลว สถานะของวาล์วทุกตัวจะต้องเปิดสุด จึงจะสามารถเดินเครื่องเป่าอากาศเพื่อเริ่มทำการทดลองได้
- 2) เตรียมสารป้อนอนุภาคผงเถ้าขนาด 60 mesh โดยบันทึกน้ำหนักของอนุภาคก่อนทำการทดลอง
- 3) เตรียมป้อนของเหลวโดยการเติมน้ำลงในถังป้อนของเหลว จากนั้นจึงเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเข้าสู่หอสเปรย์ แล้วปรับสถานะของวาล์ว MV5 เพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำ พร้อมทั้งวัดอัตราการไหลของน้ำขาออก จากนั้นเดินเครื่องเป่าอากาศเพื่อเป่าอากาศเข้าสู่หอสเปรย์
- 4) ป้อนอนุภาคผงเถ้า โดยเปิดมอเตอร์ของใบพัดกวนและวาล์ว MV2 พร้อมทั้งเริ่มต้นจับเวลาการทดลอง
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านออกมาจากเครื่องสเปรย์สับเบอร์เมื่อพบว่าอัตราการป้อนอนุภาคผงเถ้าคงที่ และวัดอัตราการไหลก๊าซขาออก

6) หยุดการป้อนสารโดยการปิดวาล์ว MV2 บันทึกน้ำหนักของอนุภาคที่เหลือหลังจากทำการทดลอง และเวลาที่ใช้ในการป้อนสารอนุภาค

7) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 4 โดยทำการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำครึ่งละประมาณ 1 ลิตรต่อนาที

8) นำน้ำที่เก็บได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอนุภาคผงเถ้าโดยการกรองด้วยกระดาษกรอง วัดปริมาตรส่วนของน้ำที่กรองได้ จากนั้นนำส่วนผงเถ้าที่กรองได้อบในตู้อบให้แห้ง แล้วบันทึกน้ำหนักของส่วนที่กรองได้

9) ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอนุภาคผงเถ้าเป็นขนาด 100 และ 140 mesh ตามลำดับ

5.1.4 การคำนวณผลการทดลอง

1) คำนวณอัตราการป้อนอนุภาคในแต่ละการทดลองจาก

$$\text{อัตราการป้อนอนุภาค} = \frac{\text{น้ำหนักอนุภาคก่อนการทดลอง} - \text{น้ำหนักอนุภาคหลังการทดลอง}}{\text{เวลาในการทดลอง}}$$

(5.1)

2) คำนวณอัตราการเก็บอนุภาคในแต่ละการทดลองจาก

$$\text{อัตราการเก็บอนุภาค} = \frac{\text{น้ำหนักอนุภาค} \times \text{อัตราการไหลของของเหลว}}{\text{ปริมาตรของเหลวจากการกรอง}}$$

(5.2)

3) คำนวณค่าประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{อัตราการเก็บอนุภาค}}{\text{อัตราการป้อนอนุภาค}} \times 100 \%$$

(5.3)

5.2 การทดลองใช้เครื่องสเปกโตรสโคปเบอร์เพื่อกำหนดอนุภาคแป้ง

5.2.1 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโคปเบอร์ในการกำหนดอนุภาคแป้ง
- 2) คำนวณประสิทธิภาพของเครื่องสเปกโตรสโคปเบอร์
- 3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำหนดอนุภาคแป้งและอนุภาคผงถั่ว

5.2.2 อุปกรณ์และสารเคมี

- 1) ชุดทดลองเครื่องสเปกโตรสโคปเบอร์
- 2) น้ำ
- 3) แป้งข้าวเจ้า
- 4) สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.1% (ใน 0.3% KI) เก็บในขวดสีชา
- 5) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) 5 M
- 6) บีกเกอร์ขนาด 50 มล.
- 7) นาฬิกาจับเวลา
- 8) ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

5.2.3 วิธีทำการทดลอง

- 1) ทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1.3 แต่เปลี่ยนจากการใช้สารป้อนคืออนุภาคผงถั่วเป็นอนุภาคแป้งที่มีขนาดอนุภาค 100 mesh
- 2) นำน้ำที่เก็บได้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแป้งด้วยวิธี ใช้การไฮโดรไลสโดยการอุ่นสารละลายแป้งพร้อมคนตลอดเวลา
- 3) แบ่งสารละลายแป้ง 15 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 5 M ปริมาณ 5 มล. คนให้ทั่ว
- 4) นำบีกเกอร์ต้มในน้ำร้อนที่ได้ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90°C ทุก ๆ 1 นาที ให้แบ่งสารละลายมา 0.5 มล. ใส่ในหลอดทดลองและทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการนำหลอดแช่น้ำเย็น

แล้วเติมสารละลายไอโอดีนลงไป 1 หยด สังเกตสี ทำจนกระทั่งสารละลายที่แบ่งมาไม่ให้สีกับไอโอดีน (ให้ทำสารละลายเปรียบเทียบโดยใช้น้ำกลั่น 0.5 มล. เติมไอโอดีน 1 หยด) บันทึกเวลาที่สารละลายไม่ให้สีกับไอโอดีน

5) หาความเข้มข้นของสารละลายแป้ง โดยการนำข้อมูลเวลาที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานของสารละลายแป้งในภาคผนวก ค

5.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) คำนวณอัตราการป้อนอนุภาคในแต่ละการทดลองจากสมการที่ (5.1)

2) คำนวณอัตราการเก็บอนุภาคในแต่ละการทดลองจาก

$$\text{อัตราการเก็บอนุภาค} = \frac{\% \text{ ความเข้มข้นของสารละลายแป้ง} \times \text{อัตราการไหลของของเหลว}}{\text{อัตราการไหลของของเหลว}} \quad (5.4)$$

3) คำนวณค่าประสิทธิภาพในการทำัดอนุภาคของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์จากสมการที่ (5.3)

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 ผลการทดลอง

1) ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคผงถ่านขนาด 60 mesh

ตารางที่ 6.1 อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคผงถ่านขนาด 60 mesh

อัตราการไหล ของน้ำ (มล./วินาที)	อัตราการป้อน อนุภาค (กรัม/วินาที)	ปริมาตรของ น้ำที่กรองได้ (มล.)	น้ำหนักของ อนุภาค (กรัม)	อัตราการเก็บ อนุภาค (กรัม/วินาที)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด อนุภาค (%)
44.61	3.15	38.54	0.0596	0.07	2.19
55.49	3.47	45.06	0.3743	0.46	13.28
76.08	0.92	30.60	0.1053	0.26	28.46
88.23	5.08	45.00	0.9098	1.78	35.08
108.55	3.47	26.15	0.3812	1.58	45.60
132.07	0.92	33.41	0.1391	0.55	59.77
148.21	3.05	30.56	0.4028	1.95	64.05
160.38	3.16	29.80	0.4151	2.23	70.70
184.77	3.05	33.20	0.3962	2.21	72.30

2) ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัด
อนุภาคผงแก้วขนาด 100 mesh

ตารางที่ 6.2 อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการ
กำจัดอนุภาคผงแก้วขนาด 100 mesh

อัตราการไหล ของน้ำ (มล./วินาที)	อัตราการป้อน อนุภาค (กรัม/วินาที)	ปริมาตรของ น้ำที่กรองได้ (มล.)	น้ำหนักของ อนุภาค (กรัม)	อัตราการเก็บ อนุภาค (กรัม/วินาที)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด อนุภาค (%)
50.90	2.90	35.67	0.1764	0.25	8.68
64.06	3.89	36.80	0.2443	0.43	10.90
83.96	3.44	29.00	0.8056	2.33	67.85
107.57	3.16	37.00	0.8416	2.44	77.21
118.25	3.08	34.20	0.7097	2.45	79.67
136.48	2.95	32.15	0.5727	2.43	82.41
152.62	3.15	23.30	0.4173	2.73	86.67
173.77	2.12	35.20	0.4138	2.04	96.36
190.64	2.00	33.50	0.3450	1.96	98.16

3) ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัด
อนุภาคผงเถ้าขนาด 140 mesh

ตารางที่ 6.3 อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการ
กำจัดอนุภาคผงเถ้าขนาด 140 mesh

อัตราการไหล ของน้ำ (มล./วินาที)	อัตราการป้อน อนุภาค (กรัม/วินาที)	ปริมาตรของ น้ำที่กรองได้ (มล.)	น้ำหนักของ อนุภาค (กรัม)	อัตราการเก็บ อนุภาค (กรัม/วินาที)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด อนุภาค (%)
45.10	3.52	22.38	0.0402	0.08	2.30
59.03	2.93	26.01	0.1078	0.24	8.35
69.92	4.05	27.66	1.1300	2.85	70.53
84.02	3.41	22.05	0.7191	2.74	80.35
101.47	3.41	33.10	0.9003	2.77	81.23
118.36	3.72	30.86	0.8213	3.15	84.68
141.96	2.12	37.95	0.4894	1.83	86.35
174.31	2.05	36.20	0.4112	1.98	96.58
200.51	2.05	39.54	0.4007	2.03	99.12

4) ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคแป้ง

ตารางที่ 6.4 อัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคแป้ง

อัตราการไหล ของน้ำ (มล./วินาที)	อัตราการป้อน อนุภาค (กรัม/วินาที)	เวลาที่ใช้ในการไฮโดร- ไลส์ (นาที)	ความเข้มข้น ของแป้ง (กรัม/100 มล.)	อัตราการ เก็บอนุภาค (กรัม/วินาที)	ประสิทธิภาพ ในการกำจัด อนุภาค (%)
52.26	3.45	10.0	0.69	0.36	10.52
61.24	3.79	13.0	1.40	0.86	22.62
74.89	3.45	21.5	3.47	2.59	75.31
91.04	3.79	21.0	3.32	3.03	79.85
111.89	5.65	25.0	4.10	4.59	81.23
132.05	5.65	22.5	3.58	4.79	83.62
151.38	2.76	14.0	1.60	2.42	87.75
175.92	2.62	13.5	1.48	2.60	99.37
200.43	2.62	12.5	1.30	2.61	99.45

6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

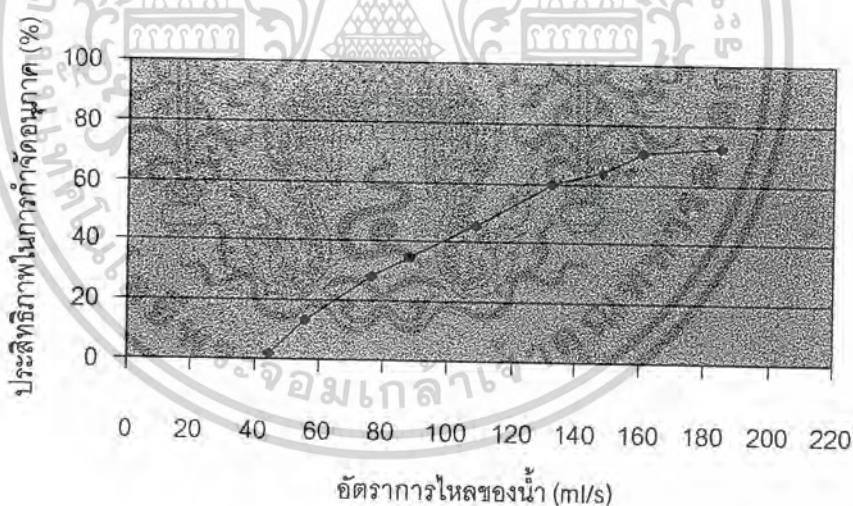
1) พิจารณาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคผงแป้งขนาด 60 mesh ดังรูปที่ 6.1 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าอัตราการไหลของน้ำ ความดันของน้ำจะสูงขึ้น ทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดของน้ำเล็กลงและส่งผลให้เครื่องสเปรย์สครับเบอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2) พิจารณาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคผงแป้งขนาด 100 mesh และ 140 mesh ดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำมีค่าต่ำ ประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และจะเพิ่มขึ้น

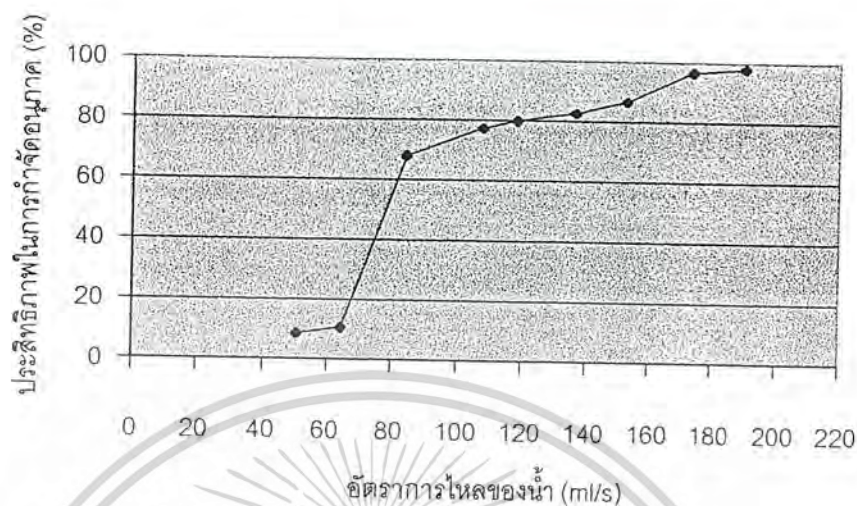
อย่างรวดเร็ว เมื่ออัตราการไหลของของเหลวอยู่ในช่วง 62-80 และ 60-75 มิลลิลิตร/วินาที ตามลำดับ จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่

3) จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.6 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบอนุภาคแบ่งกับผงเก่าที่มีขนาดเท่ากัน คือ 100 mesh ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคแบ่งจะสูงกว่าผงเก่า

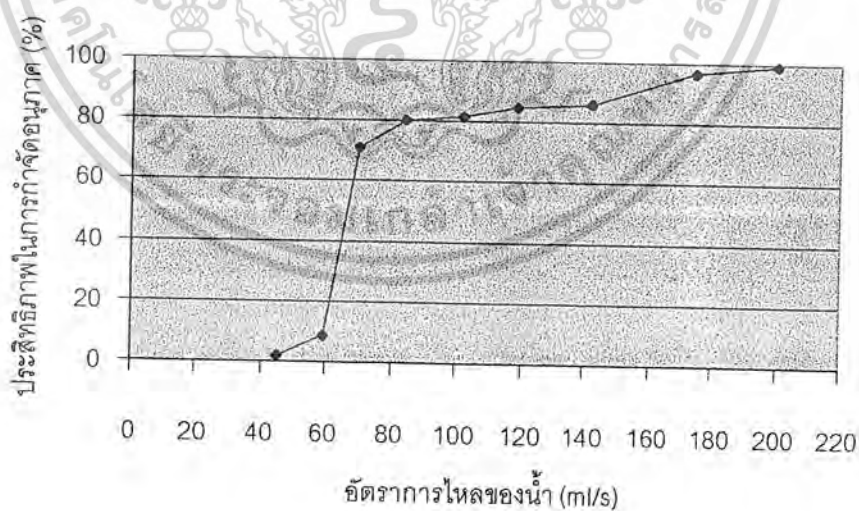
4) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการกักเก็บแบ่งทางทฤษฎีกับการทดลอง จะพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากทฤษฎีจะต่ำกว่าที่ได้จากการทดลอง โดยผลจากการทดลองได้เท่ากับ 98.5% แต่ทางด้านทฤษฎีได้เพียง 45% (คิดที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 200 มิลลิลิตร/วินาที)



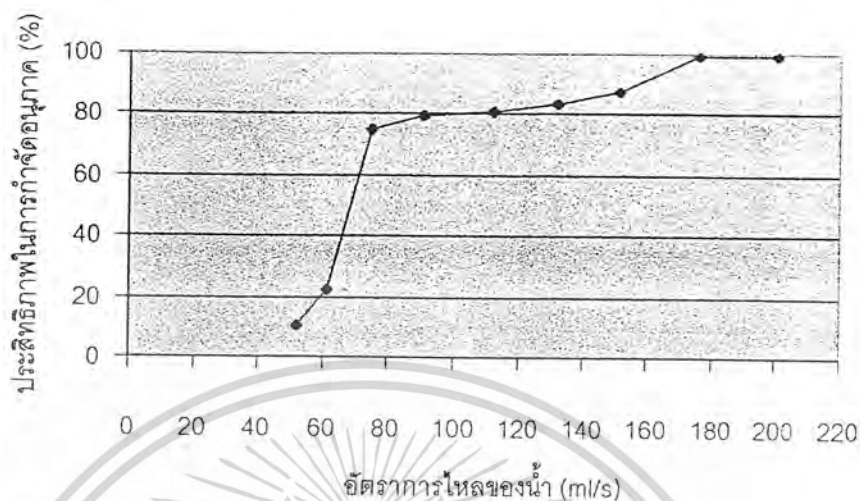
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคผงเก่าขนาด 60 mesh



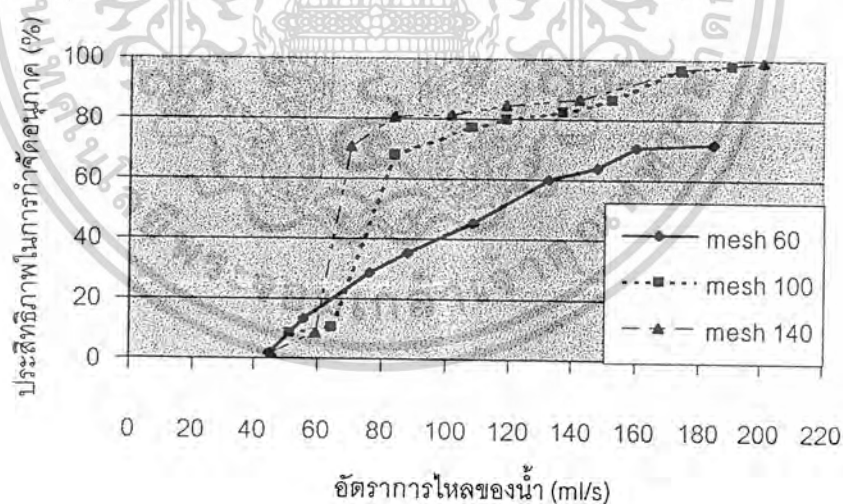
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคผงเข้าขนาด 100 mesh



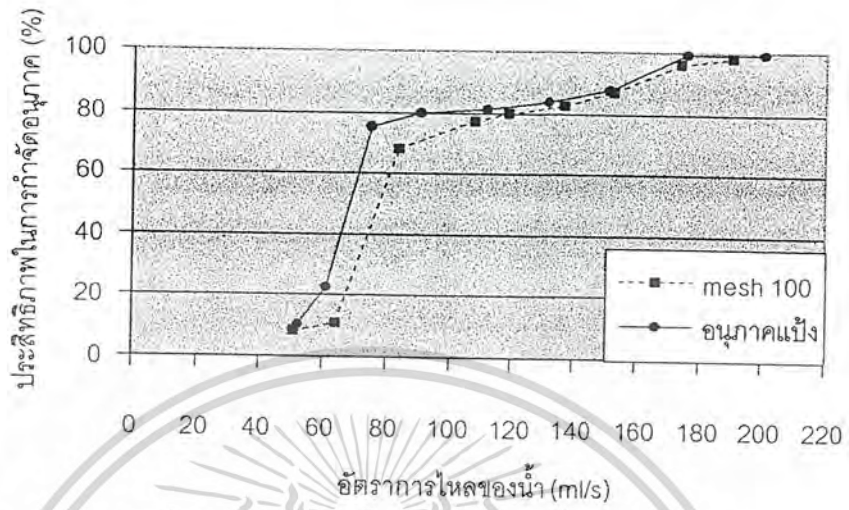
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคผงเข้าขนาด 140 mesh



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคแป้ง



รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคผงแป้งแต่ละขนาด



รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสเปร์ยสครับเบอรี่ในการกำจัดอนุภาค
แบ่งกับอนุภาคผงเท่านั้น 100 mesh

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการได้ออกแบบและสร้างเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ พบว่าเมื่อนำเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ที่ได้มาทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้เป็น 2 ส่วนสำคัญคือ การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคนาขนาดต่างกัน และในส่วนของ การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคระหว่างแบ่งกับผงเก่าของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์

7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ในการกำจัดอนุภาคนาขนาดต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ ดังรูปที่ 6.5 พบว่าในช่วงอัตราการไหลของของเหลวต่ำ ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคคืออนุภาคมีขนาดยิ่งโต ความหนาแน่นยิ่งมาก ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคยิ่งสูง เพราะกลไกในการกักเก็บอนุภาคด้วยหยดของเหลวที่ช่วงอัตราการไหลต่ำเป็นแบบการกระทบด้วยแรงเฉื่อย แต่ที่ช่วงอัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคยิ่งสูง เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง เพราะกลไกในการกักเก็บอนุภาคในช่วงนี้คือกลไกการแพร่ ซึ่งประสิทธิภาพในการกักเก็บขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแพร่และขนาดเฉลี่ยของหยดของเหลว จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ที่สร้างขึ้นเป็นไปตามกลไกหลักในการกักเก็บอนุภาค

7.1.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคระหว่างแบ่งกับผงเก่าของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ดังรูปที่ 6.6 พบว่า ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคแบ่งสูงกว่าอนุภาคผงเก่า เนื่องจากอนุภาคแบ่งสามารถแพร่เข้าไปในหยดของเหลวได้ดีกว่าอนุภาคผงเก่า ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นคอลลอยด์ของแบ่ง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บแบ่งระหว่างทางทฤษฎีกับการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากทฤษฎีต่ำกว่าที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้น คำนวณจากความเข้มข้นของอนุภาคเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคที่เก็บได้ต่อปริมาณอนุภาคเริ่มต้น โดยไม่ได้พิจารณาถึงตัวแปรอื่น แต่ทางทฤษฎีจะพิจารณาค่าตัวแปรต่าง ๆ ด้วย ได้แก่ D_p , D_s , V_g , V_l , μ_w , μ_{air} , W , G , Z เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วตัวแปรที่มีส่วนสำคัญในที่นี้ที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสครับเบอร์ต่ำ คือ ความสูงของเครื่องสครับเบอร์ ยิ่งความสูงเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และนอกจากนี้ประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคที่คำนวณจากทฤษฎีโดยสมการที่ (3.10) พิจารณาเฉพาะผลของการกระทบด้วยแรงเฉื่อยเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ในทางปฏิบัตินั้นจะมีผลของการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นผลที่ได้ทางทฤษฎีจึงแตกต่างไปจากผลทางการทดลอง

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการทดลองการกำจัดอนุภาคโดยเครื่องสครับเบอร์ ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริงนั้น อนุภาคที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ อนุภาคผงเก่าขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งต้องผ่านการคัดขนาดเพื่อให้ได้ขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอในแต่ละการทดลอง แต่การคัดขนาดอนุภาคที่ใช้นี้ ทำโดยใช้เครื่องคัดขนาดแบบ sieve trays ที่ขนาดรูเปิดต่าง ๆ กัน อนุภาคที่ผ่านแต่ละ mesh ได้ ก็ยังมีขนาดที่แตกต่างกันอยู่ ซึ่งเกิดจาก sieve trays ที่ใช้มีขนาดรูเปิดห่างกันมากเกินไป ทำให้อนุภาคที่นำมาทดลองมีขนาดไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร จึงควรเลือกอนุภาควัตถุอย่างที่ไม่มา

ใช้ในการทดลองใหม่ให้มีขนาดที่สม่ำเสมอขึ้น หรืออาจนำอนุภาคผงเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการอื่น ๆ อีก ให้มีขนาดสม่ำเสมอขึ้น

2) การป้อนอนุภาคที่ใช้ในการทดลองผ่านเครื่องป้อนสารก่อนเข้าเครื่องสเปกโตรัมเบอร์ ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นผงเก่าในแต่ละขนาดหรืออนุภาคแป้งนั้น อัตราการป้อนอนุภาคที่ใช้ในการทดลองไม่คงที่ในแต่ละครั้งของการทดลอง เนื่องมาจากการบรรจุอนุภาคแต่ละชนิดใส่ในอุปกรณ์การป้อนสารมีการจัดตัวของอนุภาคแตกต่างกัน ทำให้อัตราการป้อนอนุภาคผ่านอุปกรณ์ป้อนสารไม่แน่นอน เป็นผลทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคในกระแสอากาศไม่คงที่ด้วย ซึ่งความเข้มข้นของอนุภาคในกระแสอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องสเปกโตรัมเบอร์โดยรวมที่คำนวณได้ ดังนั้นควรจะเปลี่ยน หรือดัดแปลงอุปกรณ์ป้อนสารเป็นลักษณะอื่น เช่น แบบฮอปเปอร์ (Hopper) ที่ใช้ในอุตสาหกรรม หรือ ทำให้อนุภาคไม่มีความชื้นมากเกินไป เพื่อลดการจัดตัวของอนุภาค

3) การวิเคราะห์หาปริมาณแป้งในน้ำที่ได้จากการทดลองนั้น ต้องควบคุมอุณหภูมิของสารละลายแป้ง เพื่อให้เกิดการไฮโดรไลสแบ่งเป็นน้ำตาลซึ่งไม่ให้ออกซิเจน (คือ ไม่ปรากฏสีน้ำตาลของไอโอดีน) แต่จากการทดลองไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ตลอดการทดลอง เป็นผลให้เวลาที่ใช้ในการเกิดไฮโดรไลสน้ำแป้งได้ทั้งหมด เพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลช้าหรือเร็วกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงควรมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งให้คงที่ เพื่อให้ได้ผลการทดลองและค่าในกราฟมาตรฐาน (ในภาคผนวก ค-2) ที่ถูกต้องกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- 
- [1] Calvert, . *Wet scrubber System Study: Scrubber Handbook* Ambient Purification Technology, Inc., 1972.
- [2] Perry, R. H., and Chilton, C. H. *Chemical Engineer's Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1999.
- [3] Welty, J. R., Wicks, C. E.; and Wilson, R. E. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1984.
- [4] Geankoplis, C. J. *Transport Process and Unit Operation*, 3rd ed., Singapore: Prentice Hall International Editions, 1995.
- [5] สิริภักดิ์ สระตันต์. *ปฏิบัติการชีวเคมีเบื้องต้น* .ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] จิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล. *มลภาวะอากาศ พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น)*, 2535.
- [7] McCabe, W.L., and Smith, J.C., *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5th ed., Chemical Engineering Series, McGraw – Hill, New York, 1976.
- [8] Noel De Nevers. *Air Pollution Control Engineering*, McGraw – Hill, New York, 1980.

- [9] Richard C. Flangan, John H. Seinfeld *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1988.
- [10] Martin Crawford *Air Pollution Control Theory*, McGraw - Hill, New York, 1976.
- [11] William Licht *Air Pollution Control Engineering: basic calculations for particulate collection*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1988.
- [12] เจษฎาพันธ์ โอทอง, วุฒิพงศ์ โสมรักษ์, อัสฎา บุญศรีรัตน์. *ก๊าซฟลูอิดไดเซชัน*, ประโยชน์ นิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.





ภาคผนวก ก

การคำนวณออกแบบหอสเปรย์

ก-1 การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์

จากสมการ (4.1)

$$d_c = \psi (G \rho_G^{0.5})^{0.5}$$

เมื่อ

$$\psi = 0.0308$$

จาก

$$G = u_G A_i$$

จากหัวข้อ 4.1

$$u_G = 20 \text{ m/s}$$

และ

$$A_i = 20.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ดังนั้น

$$G = 20 \times 20.65 \times 10^{-4} \times 3600 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$= 155.88 \text{ m}^3/\text{h}$$

จะได้

$$d_c = 0.0308 \times (155.88 \times \sqrt{1.165})^{0.5}$$

$$= 0.38 \text{ m}$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสเปรย์ที่ใช้ในการทดลองจึงเท่ากับ 0.4 เมตร

ก-2 การคำนวณการออกแบบสเปรย์นอซเซิล

การคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำ (D_s) ที่อัตราการไหลของน้ำในแต่ละสเปรย์นอซเซิลเท่ากับ 0.1 L/s ใช้สมการที่ (4.3) คือ

$$D_s = \frac{1920 \sqrt{\sigma_L}}{v_G \sqrt{\rho_L / 62.3}} + 75.4 \left(\frac{\mu_L}{\sqrt{\sigma_L \rho_L / 62.3}} \right)^{0.45} \left(\frac{1000 W_{\text{nozzle}}}{G} \right)^{1.5}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1920 \times 71.2^{0.5}}{2 \times 3.28} + 75.4 \left(\frac{0.8}{71.2^{0.5}} \right)^{0.45} \left(\frac{1000 \times 10^{-4}}{0.25} \right)^{1.5} \\
 &= 2476 \text{ } \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำ โดยประมาณเท่ากับ 2476 ไมครอน

ก-3 การคำนวณความดันลดในหอสเปรย์

จากสมการที่ (4.4)
$$\Delta P = \frac{w \rho_L Z}{(V_i - V_g) A_c}$$

จาก [3] เมื่อ
$$V_i = D_s \left[\frac{(4/255)(\rho_L - \rho_g)^2 g^2}{\mu_g \rho_g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{ก.1})$$

$$= 2476 \times 10^{-6} \left[\frac{(4/255)(996 - 1.165)^2 \times 9.8^2}{1.8 \times 10^{-5} \times 1.165} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$V_i = 10.27 \text{ m/s}$$

$$V_g = 2.0 \text{ m/s}$$

ดังนั้น
$$\Delta P = \frac{2 \times 10^{-4} \times 996 \times 0.9}{(10.27 - 2.0) \times \pi \times 0.4^2 / 4}$$

$$= 0.17 \text{ mbar}$$

ภาคผนวก ข

การหาค่าความสูญเสียรวมในระบบท่อน้ำและพลังงานของเครื่องสูบน้ำ

ข-1 การหาค่าความสูญเสียรวมจากระบบท่อน้ำและพลังงานของเครื่องสูบน้ำ

1) การสูญเสียพลังงานที่ปากทางออกของถังป้อน [4]

$$K_c = 0.55 (1 - A_t/A_r)^2 \quad (ข.1)$$

$$= 0.55 \left(1 - \frac{5.574 \times 10^{-4}}{\pi \times 0.5^2 / 4} \right)^2$$

$$= 0.55$$

$$\text{จาก } h_c = \frac{K_c u_L^2}{2g_c} \quad (ข.2)$$

$$\text{จาก } u_L = \frac{W/A_t}{}$$

$$\text{จะได้ } u_L = \frac{7.058 \times 10^{-4}}{5.574 \times 10^{-4}}$$

$$= 1.266 \text{ m/s}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } h_c = 0.55 \times \left(\frac{1.266^2}{2} \right)$$

$$= 0.440 \text{ J/kg}$$

2) การสูญเสียพลังงานเนื่องจากข้อต่อของท่อและวาล์ว

วาล์วมีจำนวน 1 ตัว มีค่า $K_f = 4.5$

ข้อต่อ 3 ทาง มีจำนวน 2 ตัว มีค่า $K_f = 1$

ข้องอ 90° มีจำนวน 3 ตัว มีค่า $K_f = 0.751$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น } h_f &= (4.5 + 1 \times 2 + 0.751 \times 3) \times 1.266^2 \\ &= 7.012 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

3) การสูญเสียหลักเนื่องจากท่อ PVC

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Re &= \frac{d_i \cdot \rho_L \cdot u_L}{\mu_L} \\ \text{เพราะฉะนั้น } &= \frac{0.0266 \times 996 \times 1.266}{0.798 \times 10^{-3}} \\ &= 42031 \end{aligned}$$

เนื่องจากท่อ PVC เป็นท่อชนิดผิวเรียบ (Smooth tube) ดังนั้นสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Fanning friction factor, f) ได้จาก [4]

สำหรับการไหลแบบ turbulent

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = [4 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{f})] - 0.4 \quad (ข.3)$$

$$= [4 \cdot \log(42031 \cdot \sqrt{f})] - 0.4$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } f = 5.45 \times 10^{-3}$$

เมื่อค่าความยาวรวมของท่อ PVC ประมาณ 4 เมตร สามารถหาค่าการสูญเสียได้

ดังนี้

$$\begin{aligned}
 h_L &= \frac{2 \cdot f \cdot u_L^2 \cdot L_1}{g_c \cdot d_t} \\
 &= \frac{2 \times 5.45 \times 10^{-3} \times 1.266^2 \times 4}{0.0266} \\
 &= 2.627 \text{ J/kg}
 \end{aligned}
 \tag{ข.4}$$

เพราะฉะนั้นค่าการสูญเสียรวมของท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 h_{rt} &= h_c + h_f + h_L \\
 h_{rt} &= 0.440 + 7.012 + 2.627 \\
 &= 10.079 \text{ J/kg}
 \end{aligned}$$

ข-2 การหาค่าความสูญเสียเนื่องจากท่อ PVC ขนาด 1.27 เซนติเมตร

1) การหาค่าความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อ PVC

ในการทดลอง อัตราการไหลสูงสุดของน้ำที่ผ่านออกมาจากหอสเปรย์มีค่าประมาณ

0.2 ลิตร/วินาที

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } W_{\text{nozzle}} &= 0.1 \text{ L/s} \\
 &= 1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

สำหรับท่อขนาด 0.5 นิ้ว

$$A_t = 1.980 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$u_{L\text{nozzle}} = \frac{1 \times 10^{-4}}{1.980 \times 10^{-4}}$$

$$\therefore u_{L\text{nozzle}} = 0.510 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{d_t \cdot u_{L\text{nozzle}} \cdot \rho_L}{\mu_L}$$

$$= \frac{0.0158 \times 0.510 \times 996}{0.798 \times 10^{-3}}$$

$$= 10060$$

เนื่องจากท่อ PVC เป็นท่อชนิดผิวเรียบ สำหรับการไหลแบบ turbulent ดังนั้นสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียได้จาก

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = [4 \cdot \log(\text{Re} \cdot \sqrt{f})] - 0.4 \quad (\text{ข-3})$$

$$= [4 \cdot \log(10060 \cdot \sqrt{f})] - 0.4$$

เพราะฉะนั้น

f

$$= 7.72 \times 10^{-3}$$

h_L

$$= \frac{2 \cdot f \cdot u^2 \cdot L}{g \cdot d}$$

$$= \frac{2 \times 7.72 \times 10^{-3} \times 0.510^2 \times 1}{0.0158}$$

$$= 0.254 \text{ J/kg}$$

2) การสูญเสียพลังงานเนื่องจากข้อต่อของท่อและวาล์ว

วาล์วมีจำนวน 1 ตัว ซึ่งมีค่า $K_r = 4.5$

$$\text{ดังนั้น} \quad h_r = \frac{4.5 \times 0.510^2}{2}$$

$$= 0.585 \text{ J/kg}$$

เนื่องจากท่อ PVC ที่แบ่งกระแสน้ำไหลจากกระแสน้ำนั้น มี 2 ท่อ จึงคำนวณค่าการสูญเสียรวมได้ดังนี้

$$h_2 = 2 \times (h_L + h_r)$$

$$h_2 = 2 \times (0.254 + 0.585)$$

$$= 1.68 \text{ J/kg}$$

3) การคำนวณพลังงานที่ใช้จริงของเครื่องสูบน้ำ

$$\begin{aligned} h_i &= (h_n + h_o) \\ &= (10.079 + 1.68) \\ &= 11.759 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

สมการที่ใช้เพื่อหาพลังงานที่ใช้จริงของเครื่องสูบน้ำ [4] จะมีการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \eta_p W_p &= \frac{g}{g_c} (z_1 - z_2) + \frac{(u_1^2 - u_2^2)}{2g_c} + \frac{(P_1 - P_2)}{\rho} - h_i \quad (ข.4) \\ &= 9.81 \times (0 - 0.5) + (0 - 1.266^2) + 0 - 11.759 \\ &= -18.267 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ = 60 %

$$\begin{aligned} W_p &= -18.267 / (-0.6) \\ &= 30.445 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

กำลังงานที่ใช้จริงของเครื่องสูบน้ำ = $\dot{m} W_p$

$$\text{เมื่อ } \dot{m} = \rho_L W$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 996 \times 7.058 \times 10^{-4} \\ &= 0.70 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น กำลังงานที่ใช้จริงของเครื่องสูบน้ำ} = 0.70 \times 30.445$$

$$= 21.312 \text{ W (0.03 แรงม้า)}$$

กำลังงานที่ใช้จริงสำหรับการทดลองต้องมีกำลังอย่างต่ำเท่ากับ 0.03 แรงม้า ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงเลือกใช้เครื่องสูบน้ำที่มีกำลังเท่ากับ 0.5 แรงม้า

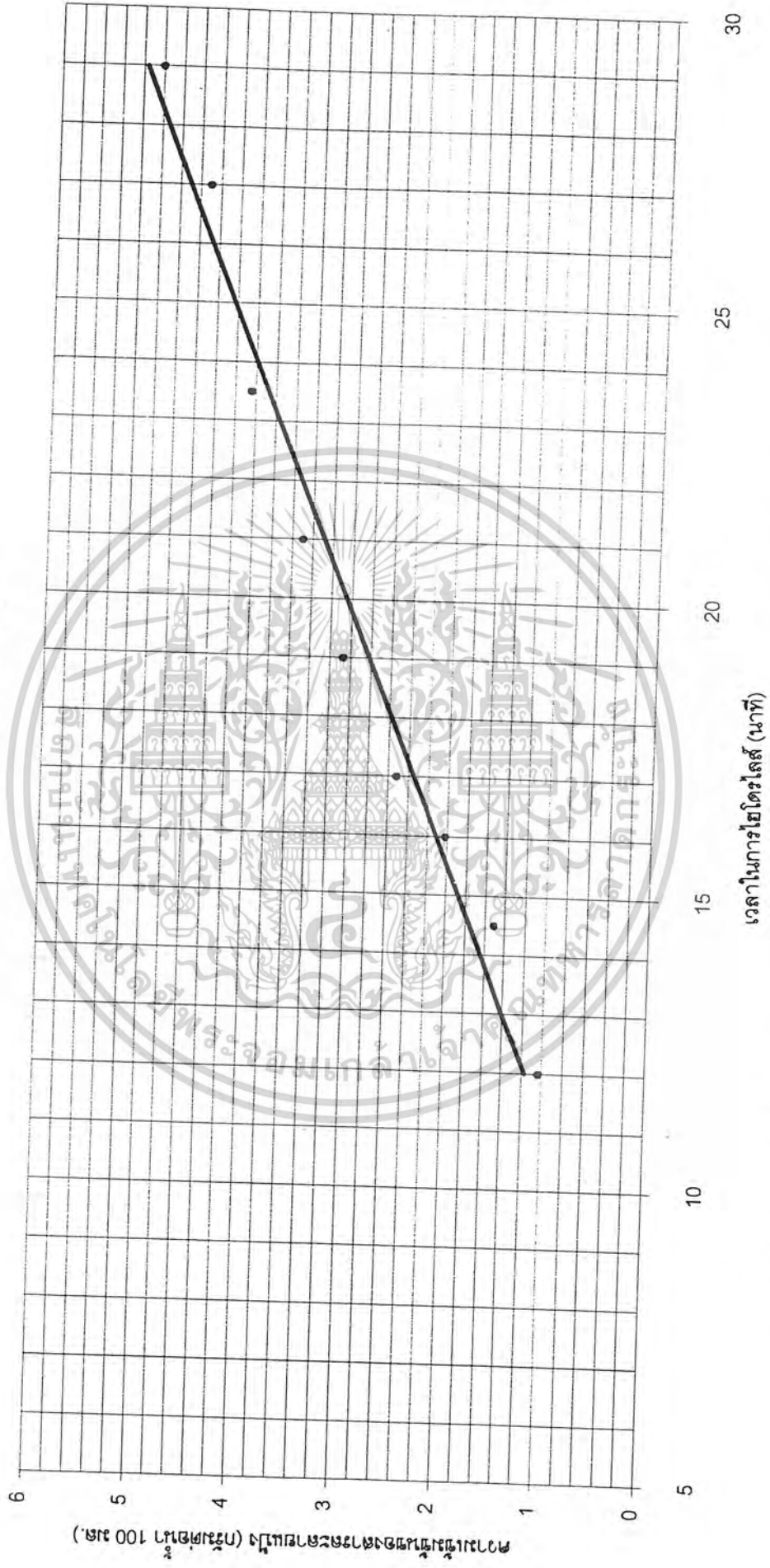
ภาคผนวก ค

สารละลายมาตรฐานแบ่ง

ค-1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแบ่ง [5]

- 1) เตรียมสารละลายแบ่งที่ความเข้มข้นประมาณ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 กรัมต่อน้ำอุ่น 100 มล. ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล.
- 2) แบ่งสารละลายแบ่ง 15 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 M ปริมาตร 5 มล. คนให้ทั่ว
- 3) นำบีกเกอร์ต้มในน้ำร้อนที่ได้ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90°C . ทุก ๆ 1 นาทีแบ่งสารละลายมา 0.5 มล. ใส่ในหลอดทดลองและทำให้เย็นโดยเร็ว (นำหลอดแช่น้ำเย็น) แล้วเติมสารละลายไอโอดีนลงไป 1 หยด สังเกตสีที่ได้ ทำจนกระทั่งสารละลายที่แบ่งมาไม่ให้สีกับไอโอดีน (ให้ทำสารละลายเปรียบเทียบโดยใช้น้ำกลั่น 0.5 มล. เติมไอโอดีน 1 หยด) บันทึกเวลาที่สารละลายไม่ให้สีกับไอโอดีน
- 4) นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแบ่งกับเวลาที่ใช้ในการไอโอดิไลส์ เส้นกราฟที่ได้จะใช้เป็นค่าเทียบมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายแบ่งเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ค-2 กราฟมาตรฐานสารละลายแป้ง



รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแป้งกับเวลาในการไฮโดรไลส

ภาคผนวก ง

การคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสเปรย์สครับเบอร์ทาง ทฤษฎี

จาก $\eta_t = 1 - \frac{N_t}{N_0}$

และจากสมการ (3.8) จะได้

$$\eta_t = 1 - \exp \left[-\frac{3}{2} \eta \left(\frac{v_r}{v} \right) \left(\frac{W}{A_c v_G} \right) \left(\frac{Z}{D_s} \right) \right]$$

เมื่อ

$$v_G = 2.0 \text{ m/s}$$

$$G = v_G A_c$$

$$= 2 \times \pi \times \frac{(40 \times 10^{-2})^2}{4}$$

$$= 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W = 200 \text{ ml/s}$$

$$= 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$W_{\text{nozzle}} = \frac{W}{2}$$

$$= 1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_p = 0.61 \text{ g/cm}^3.$$

$$D_p = 0.178 \text{ mm} \quad (\text{อนุภาคนาต 100 mesh})$$

ค่าที่ต้องคำนวณคือ D_s , v_i , St , η , η_i ตามลำดับ

$$D_s = 2476 \text{ } \mu\text{m}$$

$$= 2.476 \text{ mm}$$

v_i หาจากสมการ (ก.1) จะได้

$$v_i = 10.27 \text{ m/s}$$

St หาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} St &= \frac{\rho_p D_p^2 v_i}{18 \mu_g D_s} \\ &= \frac{0.61 \times 0.178^2 \times 10.27 \times 10^3}{18 \times 0.018 \times 2.47} \\ &= 247 \end{aligned}$$

η หาได้จากสมการที่ (3.10)

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\frac{St}{St + 0.35} \right)^2 \\ &= \left(\frac{247}{247 + 0.35} \right)^2 \\ &= 0.997 \end{aligned}$$

η_i หาได้จากสมการที่ (3.8)

$$\begin{aligned} \eta_i &= 1 - \exp \left[-\frac{3}{2} (0.997) \left(\frac{10.27}{10.27 - 2} \right) \left(\frac{2 \times 10^{-4}}{0.25} \right) \times \frac{1}{2.476 \times 10^{-3}} \right] \\ &= 0.45 \end{aligned}$$

$$= \left(\frac{247}{247 + 0.35} \right)^2$$

$$= 0.997$$

η_i หาได้จากสมการที่ (3.8)

$$\eta_i = 1 - \exp \left[-\frac{3}{2} (0.997) \left(\frac{10.27}{10.27 - 2} \right) \left(\frac{2 \times 10^{-4}}{0.25} \right) \times \frac{1}{2.476 \times 10^{-3}} \right]$$

$$= 0.45$$

