



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ ประดิษฐ์ และทดสอบความเที่ยงตรง
ของการจำแนกขนาดฝุ่นของ **Lundgren Impactor** ในการเก็บตัวอย่าง
ฝุ่นละออง เพื่อการวิเคราะห์ในประเทศไทย

โดย

ดร. ภารดี ช่วยบำรุง

19 มกราคม 2547

ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบ ประดิษฐ์ และทดสอบความเที่ยงตรง
ของการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง เพื่อการวิเคราะห์
ในประเทศไทย

ดร. ภารดี ช่วยบำรุง
คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชุดโครงการวิจัยคุณภาพอากาศ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

ชื่อโครงการ การออกแบบ ประดิษฐ์ และทดสอบความเที่ยงตรงของการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองเพื่อการวิเคราะห์ในประเทศไทย

ผู้วิจัย ดร. ภารดี ช่วยบำรุง¹

ที่ปรึกษาโครงการ Dale A. Lundgren, Ph.D, P.E.²
Chang-Yu Wu, Ph.D, P.E.²

หน่วยงานที่สังกัด ¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์อณูสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง ขอนแก่น 40002
โทรศัพท์ (043) 362-076 โทรสาร (043) 347-058
²University of Florida, Department of Environmental Engineering Sciences,
P.O. Box 116450, Gainesville, FL. 32611-6450, USA.
Tel: 001-1-352-392-8094, Fax: 001-1-352-392-3076

ระยะเวลาดำเนินงาน 1 กรกฎาคม 2544 - 31 ธันวาคม 2544

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยกำลังประสบกับปัญหามลพิษอากาศและฝุ่นละอองในบรรยากาศ อันส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน การบดบังทัศนวิสัยของการมองเห็น การเปลี่ยนแปลงสถานะการกระจายและดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์ (scattering and absorbing solar radiation) การเกิดฝนกรด รวมทั้งการแปดเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม (environmental fouling) ปัญหาดังกล่าวมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ประการ คือ ขนาด และ องค์ประกอบของฝุ่นละออง โดยความรุนแรงจะขึ้นกับปริมาณในแต่ละท้องถิ่น

เครื่องมือเก็บตัวอย่างที่สามารถแยกขนาดของฝุ่นละอองและนำไปวิเคราะห์ถึงปริมาณและองค์ประกอบที่เรียกว่า Cascade Impactor นั้นมีใช้ในประเทศไทยน้อยมาก เมื่อเทียบกับปัญหาที่มีและความต้องการในประเทศ โดยอาจมีสาเหตุมาจากราคาที่แพง และจำเป็นต้องซื้อจากต่างประเทศ

โครงการวิจัยนี้เสนอการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นใช้เอง โดยหนึ่งในที่ปรึกษาโครงการ (Professor Lundgren) มีความเชี่ยวชาญในเรื่องของ Cascade Impactor เป็นอย่างสูง

Prof. Lundgren เป็นบุคคลแรกที่ประดิษฐ์ Cascade Impactor ชนิดหมุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ในการรองรับปริมาณฝุ่นและลดปัญหาการกระเด็นกลับ (bounce-off) ของฝุ่นที่ใหม่เมื่อตกกระทบลงบนชั้นฝุ่นที่มีอยู่เดิมอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ตั้งแต่ปี ค.ศ.1967 ทั้งนี้ Prof. Lundgren ตระหนักดีว่า ประเทศไทยยังคงขาดแคลนในเรื่องของความรู้และความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีที่จะประดิษฐ์เครื่องมือขึ้นใช้เอง ท่านจึงเอื้อเฟื้อที่จะถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์กว่า 40 ปีผ่านผู้วิจัย รวมทั้งอนุญาตให้ใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ ณ Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida ในการทดสอบความเที่ยงตรงของการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor โดยไม่คิดมูลค่าใดๆทั้งสิ้น

ประโยชน์โดยตรงที่จะได้จากโครงการนี้ ได้แก่ การมีเครื่องมือที่เหมาะสมต่องานวิจัยพื้นฐานที่จำเป็นในประเทศ ทั้งในด้านระบาดวิทยา การศึกษาอัตราการเสี่ยงต่อสุขภาพ การเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ และการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของมลพิษ (ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในแง่ของความสัมพันธ์ของขนาด ปริมาณ และองค์ประกอบของฝุ่นละอองกับระยะเวลา ทั้งนี้ Lundgren Impactor มีการออกแบบพิเศษที่ต่างจาก Cascade Impactor ชนิดอื่น กล่าวคือ ฝุ่นละอองจะไม่สะสมลงบนตำแหน่งพื้นที่ผิวเดียวกัน ตลอดช่วงระยะเวลาที่เก็บตัวอย่าง ฉะนั้น เครื่องมือนี้สามารถจำแนกข้อมูลเป็นรายชั่วโมงหรือนาทีตามความสนใจได้ง่าย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาถึง Peak Hour ของมลพิษแต่ละชนิด รวมถึงการดักเตือน เพื่อการหลีกเลี่ยงของประชากรกลุ่มเสี่ยงในท้องที่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือ Lundgren Impactor สำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองเพื่อการวิเคราะห์ในประเทศไทย
2. ส่งเสริมและรองรับการศึกษาทางด้านระบาดวิทยา การศึกษาอัตราการเสี่ยงต่อสุขภาพ การเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ และการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของมลพิษ (ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์)
3. ถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ประเทศไทย

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการนี้เริ่มจากการออกแบบเครื่องมือโดย Prof. Lundgren โดยใช้หลักการและทฤษฎีของ Cascade Impactor ซึ่งประสงค์จะจำแนกฝุ่นให้ได้ 8 ขนาด (>10, 10-5, 5-2.5, 2.5-1.2, 1.2-0.6, 0.6-0.4, 0.4-0.2 และ 0.2-0.1 ไมครอน) หลังจากนั้นเป็นการประดิษฐ์และประกอบเครื่องมือภายใต้การควบคุมของผู้วิจัย การประดิษฐ์แผ่น impaction plate สำหรับจำแนกฝุ่นขนาด 1.2-0.6, 0.6-0.4, 0.4-0.2 และ 0.2-0.1 ไมครอนนั้น จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยี micro electro-discharge

machining ในประเทศสหรัฐอเมริกา ดำเนินการโดย Specialty Tool & Engineering ที่ Minnesota, USA (www.specialtytool-eng.com) เนื่องจากขนาดของช่องอากาศผ่านมีขนาดเล็กมาก (0.032, 0.023, 0.013, 0.010 เซนติเมตร) ส่วนงานตัด งานกลึงโลหะทั่วไป และการประกอบตัวเครื่องมือกระทำภายในประเทศโดยบริษัท KS Master ปทุมธานี สุดท้ายเป็นการทดสอบความเที่ยงตรงของการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor ที่ได้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการของ Dept. of Environmental Engineering Sciences, University of Florida ซึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการทุกชนิดนั้นได้รับความสนับสนุนจาก Dr.Lungren และ Dr.Wu

การนำไปใช้ประโยชน์

1. มีเครื่องมือเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในบรรยากาศที่สามารถจำแนกขนาดฝุ่นได้ 8 ขนาด และนำไปวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบทางเคมี ชีวะ และ ฟิสิกส์ตามความสนใจต่อไปได้
2. มีเครื่องมือเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในบรรยากาศ ที่สามารถให้ข้อมูลถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลากับขนาดของฝุ่น ปริมาณ และองค์ประกอบในแต่ละขนาดนั้น
3. ส่งเสริม สนับสนุน และรองรับงานวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับฝุ่นละออง
4. เสริมสร้างการพึ่งพาตนเอง

บทคัดย่อ

เครื่องมือ Lundgren Impactor ในรายงานฉบับนี้ ถูกออกแบบและประดิษฐ์ขึ้น เพื่อใช้เก็บฝุ่นละอองในบรรยากาศของประเทศไทย โดยต้องการให้จำแนกฝุ่นได้ 8 ขนาด cut size คือ 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.4, 0.2 และ 0.1 ไมครอน เมื่อใช้อัตราเร็วในการดูดอากาศเข้าเครื่อง 30 ลิตรต่อนาที ฝุ่นที่เก็บได้สามารถใช้เป็นตัวแทนของฝุ่นรายชั่วโมงได้ ทั้งในด้านขนาด ความเข้มข้น และองค์ประกอบของฝุ่น(เมื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป) เนื่องจากการออกแบบให้ใช้แท่งทรงกระบอกหมุนรอบตัวเองเป็นตัวรองรับฝุ่น ซึ่งฝุ่นละอองที่ได้จะไม่ทับถมลงบนที่เดิม แต่จะกระจายอย่างสม่ำเสมอในรอบ 24 ชั่วโมงที่เก็บตัวอย่าง

การทดสอบความเที่ยงตรงของการจำแนกขนาดของฝุ่นที่ได้ออกแบบไว้ ใช้วิธีสังเคราะห์อนุภาค polystyrene latex และ ammonium fluorescein ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง collision atomizer และ Vibrating Orifice Monodispersed Aerosol Generator (VOAG) อนุภาคที่ได้ หลังจากถูกทำให้แห้ง กลายเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดต่างๆกัน ถูกส่งผ่านไปยัง Lundgren Impactor ในอัตราเร็วตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยขนาดและปริมาณของอนุภาคสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง aerosizer, electrostatic classifier, aerosol electrometer รวมถึงการใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งสัดส่วนของจำนวนอนุภาคที่ทราบขนาดแน่นอนที่สะสมอยู่ในชั้นต่างๆของ impactor ต่อจำนวนอนุภาคทั้งหมดที่ผ่านเข้าเครื่อง impactor นำมาใช้คำนวณถึงประสิทธิภาพการเก็บกักของเครื่องมือในแต่ละชั้น

ผลการทดสอบพบว่า เครื่องมือนี้สามารถเก็บกักฝุ่นสังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ค่อนข้างมาก คือขนาด 11, 5.0, 2.48, 1.15, 0.63, 0.38, 0.18 และ 0.11 ไมครอน ในชั้นที่ 1 ถึง 8 ตามลำดับ อัตราการสูญเสียฝุ่นให้กับผนังของเครื่องมือของฝุ่นขนาดตั้งแต่ 3 ไมครอน ถึง 14.3 ไมครอน มีปริมาณ 7.6% ถึง 45.7% ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่จะพบการสูญเสียมากในชั้นที่ 1 และ 2

Abstract

The Lundgren impactor in this report was designed for an aerosol sampling and analysis in Thailand. The unit is comprised of 8 stages with the cutsize of 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.4, 0.2, and 0.1 μm , respectively, when operates at 30 liter/minute. It was designed to have enough surface area to collect particle continuously without accumulating into the same spot within 24 hours by using a rotating drum as a particle collector. Therefore, this unit can provide information of particle size and mass concentration at any particular time of interest from the whole interval time of sampling. Particle compositions of each interval size can be further analyzed if interested.

An instrument calibration was conducted in a laboratory by using polystyrene latex and ammonium fluorescein as synthetic particles. Particle generating was done by using a collision atomizer and a Vibrating Orifice Monodispersed Aerosol Generator (VOAG) to provide spherical particles when they were dry. These generated particles were passed into the Lundgren impactor at 30 L/min. Particle sizes and quantities were monitored by using an aerosizer, electrostatic classifier, aerosol electrometer, and an optical microscope. A collection efficiency of the Lundgren impactor in each stage was obtained by a ratio of particles collected on each stage to total particles that passed through the impactor.

It was found that the instrument could collect the synthetic particles in the sizes of 11, 5.0, 2.48, 1.15, 0.63, 0.38, 0.18, and 0.11 μm at 50% collection efficiency in stage 1 through stage 8, respectively. Wall losses of particles were found in a range of 7.6-45.7% when particle sizes were 3-14.3 μm , respectively. The loss was significantly high in stage 1 and 2 for large particles.

สารบัญ

	หน้า
หน้าสรุปโครงการ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	v
สารบัญ	vi
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูป	viii
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 Cascade Impactor	3
2.1 หลักการทำงานของ Cascade Impactor	3
2.2 การออกแบบและประดิษฐ์ Lundgren Impactor	12
2.3 วิธีการทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor	21
2.3.1 ฝุ่นขนาด $>10.0-3.0 \mu\text{m}$	21
2.3.2 ฝุ่นขนาด $3.0-1.0 \mu\text{m}$	27
2.3.3 ฝุ่นขนาด $<1.0 \mu\text{m}$	30
บทที่ 3 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor	34
3.1 ฝุ่นขนาด $>10.0-3.0 \mu\text{m}$	34
3.2 ฝุ่นขนาด $3.0-1.0 \mu\text{m}$	36
3.3 ฝุ่นขนาด $<1.0 \mu\text{m}$	37
3.4 ประสิทธิภาพการเก็บกักฝุ่นโดยรวมของ Lundgren Impactor	38
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก ก	48
ภาคผนวก ข	57
ภาคผนวก ค	59
สรุปรายงานความก้าวหน้าฉบับสมบูรณ์	62

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขนาดสัดส่วนของ nozzle ใน Lundgren Impactor	17
2	ผลการทดสอบ leak test ของ Lundgren impactor	21
3	ร้อยละของปริมาณสาร fluorescein ขนาดต่างๆที่พบโดยรวม (จากผนังและแท่งทรงกระบอก) ในแต่ละชั้นของ Lundgren Impactor	34
4	ร้อยละของสาร fluorescein ที่พบบนแท่งทรงกระบอกและบนผนัง ของเครื่องมือของ อนุภาคขนาดต่างๆ	35
5	ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค polystyrene latex ขนาด 2.63 μm ในชั้นต่างๆ	36
6	ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.92 μm ในชั้นต่างๆ	36
7	ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.73 μm ในชั้นต่างๆ	36
8	ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.05 μm ในชั้นต่างๆ	37
9	ประสิทธิภาพการเก็บกักอนุภาคขนาดเล็ก ในแต่ละชั้นของ Lundgren Impactor	37
10	ประสิทธิภาพการเก็บกักฝุ่นโดยรวมของ Lundgren Impactor	38

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 องค์ประกอบของ Cascade impactor	3
2 อนุภาครูปทรงผิดปกติและขนาดเทียบเท่าแบบต่างๆ	4
3 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นขนาดต่างๆของเยื่อกรองขนาดรูพรุน 0.8 μm อัตราเร็วของ กระแส 7.5 cm/sec	6
4 Porous membrane filter (cellulose ester) ขนาดรูพรุน 0.8 μm	6
5 Capillary pore membrane filter ขนาดรูพรุน 0.8 μm	6
6 แรง impaction	7
7 แรง interception	7
8 แรง diffusion	7
9 แรงหลักที่ใช้ในการดักจับอนุภาคนขนาดต่างๆของเส้นใยเยื่อกรองขนาดเส้นผ่า ศูนย์กลาง 2 μm หน้า 1 mm ความเร็วของกระแส 1 cm/sec และ 10 cm/sec	8
10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของ impactor ในทางทฤษฎี และปฏิบัติ	9
11 ลักษณะการไหลของกระแสที่ผ่านช่อง nozzle ของ impactor	10
12 ลักษณะการไหลของกระแสรอบอนุภาคแบบต่างๆ	12
13 Lundgren Impactor ตัวดั้งเดิม	14
14 แบบร่าง Lundgren Impactor ตัวปัจจุบัน	15
15 Lundgren Impactor ตัวปัจจุบัน	16
16 Dry gas meter ขนาด 175 CFH	19
17 Stack sampler meter box	19
18 ผังแสดงการทดสอบ leak test ของ Lundgren impactor	20
19 องค์ประกอบของเครื่อง VOAG	22
20 อนุภาค Ammonium fluorescein ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่อง VOAG	23
21 ผังการทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือสำหรับฝุ่นขนาด >10.0-3.0 μm	24
22 Porton eyepiece graticule	25
23 ไม้นับเม็ดที่ใช้เทียบมาตรฐานของขนาดวงกลมจากกล้องจุลทรรศน์	26
24 เครื่อง Aerosizer®DSP Particle Size Analyzer	28
25 เครื่อง Collision Atomizer	28
26 ผังการทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือสำหรับฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
27 เครื่อง Electrostatic Classifier model 3071A	31
28 องค์ประกอบของเครื่อง Electrostatic Classifier	31
29 เครื่อง Aerosol Electrometer model 3068	32
30 องค์ประกอบของเครื่อง Aerosol Electrometer	32
31 ประสิทธิภาพการเก็บกักฝุ่นของ Lundgren Impactor	39
32 Wall loss ใน impactor ชนิดต่างๆ	42
33 Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI)	43
34 Particle loss ใน MOUDI	43

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องมือ Impactor นั้นสามารถใช้ประโยชน์ในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองทั้งในบรรยากาศทั่วไป (ambient particulate matter) และในสถานประกอบการ ในแง่ของอาชีวอนามัย (workplace particulate matter) โดยอาศัยหลักการทำงานเดียวกัน ฝุ่นละอองที่ได้นิยมแสดงผลในรูปของน้ำหนักฝุ่นต่อปริมาตรอากาศ เช่น มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นต้น

ในปัจจุบัน ผู้ศึกษาวิจัยในเรื่องของฝุ่นละอองได้ให้ความสำคัญต่อขนาดของฝุ่นละอองมากขึ้น โดยพบว่าฝุ่นขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมครอน (μm) (Patterson and Wagman, 1977) หรือกล่าวให้เฉพาะเจาะจงลงไป คือ 0.3-1.0 μm (EPA, 1996) ก่อปัญหาในเรื่องของการบดบังทัศนวิสัยและการมองเห็น ส่วนฝุ่นขนาด 0.001-2.0 μm ก่อปัญหาในเรื่องของการเกิดฝนกรด (Ning et al, 1996) ทั้งนี้เพราะเมื่อขนาดของฝุ่นเล็กลง ปริมาณของซัลเฟตและแอมโมเนียมในฝุ่นนั้นจะเข้มข้นมากขึ้น และเมื่อรวมตัวกับไฮโดรเจน ออกซิเจนและออกไซด์ของไนโตรเจนในบรรยากาศ กลายเป็นกรดซัลฟูริกและไนตริก ค่าความเป็นกรด-ด่างของอนุภาคจะลดลง

ในด้านของสุขภาพอนามัย ฝุ่นละอองขนาด 10 μm พบว่าถูกกักไว้ที่จมูก 100% ส่วนฝุ่นขนาด 5 μm จะถูกกักไว้ 75% เมื่อหายใจปกติทางจมูก (Hinds, 1982) ฝุ่นที่สามารถหลบหนีกลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมของระบบทางเดินหายใจส่วนต้นและเข้าสู่ปอดได้ ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กกว่า 6 μm (Hidy, 1984) ฝุ่นที่เข้าสู่ถุงลมปอดจะมีขนาด 0.1 μm หรือเล็กกว่านั้น โดยพบว่า ฝุ่นขนาด 0.01 μm สะสมอยู่ที่ถุงลมปอด 50% ขณะที่พบที่จมูกเพียง 15% (Newhouse and Ruffin, 1978)

ฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไป มีขนาดตั้งแต่ 0.002-100 μm (Finlayson-Pitts and Pitts, 1986) แต่ฝุ่นขนาดใหญ่มักจะไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน แต่จะตกตัวลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก การจำแนกขนาดของฝุ่นละอองนิยมแบ่งเป็น fine particle (<2.5 μm) และ coarse particle (>2.5 μm) แต่บางครั้งก็อาจแบ่งเป็น fume (0.001-1 μm) ซึ่งเกิดจากการกลั่นตัว ระเหิด หรือปฏิกิริยาทางเคมีที่ก่อให้เกิดเห็นเป็นควัน หรือ mist (0.1-10 μm) ที่เกิดจากการกลั่นตัวเป็นละอองอนุภาคของเหลวขึ้นมา (Wark et al, 1998) ทั้งนี้แหล่งกำเนิดของฝุ่นแต่ละขนาดนั้นมีที่มาต่างกัน โดยทั่วไป ฝุ่นขนาดใหญ่ จะเกิดขึ้นโดยสาเหตุทางธรรมชาติ เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ การกัดกร่อนดิน-หินโดยลม-ฝน ละอองน้ำทะเล ละอองเกษร แบคทีเรียชนิดต่างๆ และเข้าสู่บรรยากาศโดยการพัดพาของลม เป็นต้น ขณะที่ฝุ่นขนาดเล็กมักเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น กิจกรรมในกระบวนการอุตสาหกรรม อาทิ การกลึง การเจียรนัย การเชื่อม เป็นต้น (Hinds, 1982)

การเก็บฝุ่นละอองในบรรยากาศสามารถทำได้ด้วยเครื่องมือหลากหลายชนิด เช่น วิธีการกรองผ่านเยื่อกรอง (filters) สามารถเก็บฝุ่นได้เล็กถึงประมาณ $0.003\ \mu\text{m}$ วิธีตกตัวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถเก็บฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า $10\ \mu\text{m}$ ได้ หรือถ้าเป็นแบบหมุนด้วยแรงเหวี่ยง (centrifugal collector) จะเก็บฝุ่นขนาด $0.1\text{-}10\ \mu\text{m}$ ได้ดี ส่วนการใช้ impactor นั้นเหมาะกับฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ $0.5\ \mu\text{m}$ ขึ้นไป เว้นแต่เครื่อง impactor นั้นถูกออกแบบให้ทำงานที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งจะใช้เก็บฝุ่นได้ขนาดเล็กถึง $0.05\ \mu\text{m}$ ขึ้นไป วิธีตกตัวด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) สามารถเก็บฝุ่นในขนาดของ $0.05\text{-}5\ \mu\text{m}$ ได้ และประสิทธิภาพจะดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ความร้อนร่วมด้วย (thermal precipitator) โดยสามารถเก็บฝุ่นได้ละเอียดถึงขนาด $0.005\text{-}5\ \mu\text{m}$ (Finlayson-Pitts and Pitts, 1986)

เครื่องมือ impactor นั้นมีประโยชน์กว่าเครื่องมือชนิดอื่นที่กล่าวมาในแง่ที่สามารถเก็บ ฝุ่นโดยจำแนกเป็นขนาดต่างๆ ได้ ขณะที่เครื่องมืออื่นนั้นเก็บรวบรวมฝุ่นในทุกขนาดไว้ด้วยกัน ซึ่งไม่เอื้อประโยชน์ต่องานศึกษาวิจัยที่มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาฝุ่นละอองหรืออนุภาคเฉพาะขนาดตามความสนใจได้ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่อง impactor นั้นมีราคาค่อนข้างแพงและต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยอาจสูงถึง 13,400 เหรียญสหรัฐสำหรับเครื่อง Micro-orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI) ชนิดหมุนได้ 8 ชั้น (MSP Corp, ราคาเมื่อเดือนมีนาคม 2544) หรือราคา 6,018 เหรียญสหรัฐสำหรับเครื่อง Anderson Impactor ชนิดหมุนไม่ได้ 8 ชั้น (Anderson Instruments Incorp, ราคาเมื่อเดือนมีนาคม 2544)

รายงานวิจัยฉบับนี้ จึงได้นำเสนอการออกแบบและประดิษฐ์เครื่อง impactor ชนิดหมุนได้ 8 ชั้น เพื่อใช้ในประเทศในวงเงินประมาณ 4,400 เหรียญสหรัฐ (เฉพาะค่าเครื่องมือและการทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาด ไม่รวมค่าตอบแทนและค่าเดินทาง) โดยคาดหวังว่างานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบ และมีส่วนช่วยในการส่งเสริมการประดิษฐ์ impactor เครื่องอื่นขึ้นใช้ได้อย่างภายในประเทศต่อไปได้

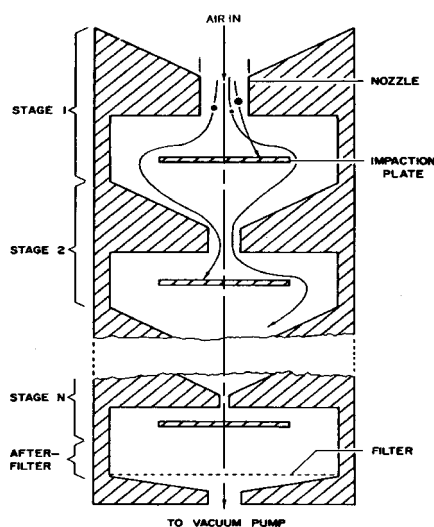
บทที่ 2

Cascade Impactor

2.1 หลักการทำงานของ Cascade Impactor

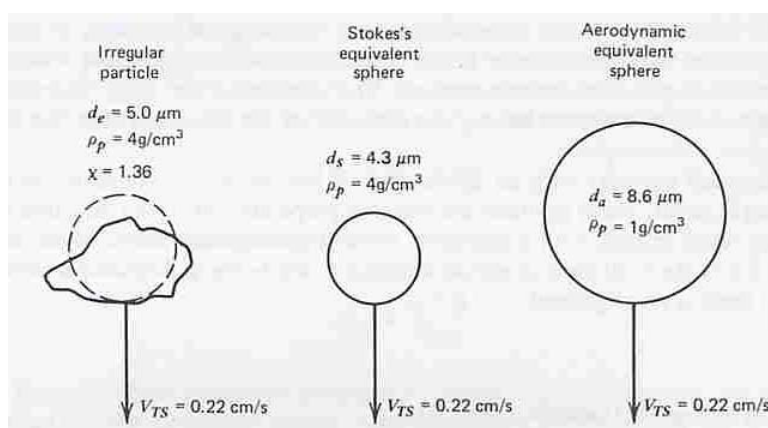
เครื่องมือ impactor สามารถใช้เก็บกักอนุภาคของฝุ่นละอองในบรรยากาศได้โดยใช้หลักของแรงเฉื่อยของอนุภาค กล่าวคือ เมื่ออากาศพร้อมฝุ่นละอองถูกดูดเข้าเครื่องมือมาพร้อมกัน อากาศและฝุ่นนั้นจะพุ่งเข้าปะทะกับแผ่นรองรับ ที่เรียกว่า impaction plate เฉพาะอากาศเท่านั้น ที่สามารถไหลหักเหทิศทางโค้งรอบแผ่น impaction plate ออกไปได้ ส่วนฝุ่นละอองที่มีน้ำหนักมากกว่าจะมีแรงเฉื่อยของการเคลื่อนที่และวิ่งเข้าปะทะกับแผ่นรองรับโดยตรง โดยไม่สามารถหักเหทิศทางเคลื่อนที่ตามกระแสของอากาศออกไปได้ ถ้าแผ่นรองรับนั้นเคลือบสารที่มีความหนืดเอาไว้ หรือความชื้นในบรรยากาศมีมากพอ ฝุ่นละอองก็จะติดอยู่บนแผ่นรองรับนั้น ทำให้สามารถแยกหรือเก็บกักอนุภาคของฝุ่นละอองออกจากบรรยากาศได้

ในกรณีที่เครื่องมือ impactor นั้นมีหลายชั้น และใช้เก็บกักอนุภาคของฝุ่นละอองได้หลายขนาดลดหลั่นกันลงไป เรียกว่า cascade impactor เฉพาะฝุ่นขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถหักเหทิศทางเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอากาศเท่านั้นที่จะถูกเก็บกักไว้บนชั้นบน ส่วนฝุ่นขนาดเล็กที่สามารถติดตามไปกับกระแสการหักเหของอากาศได้จะยังเคลื่อนที่ไปยังชั้นต่อไป ช่องทางไหลเข้า (inlet หรือ nozzle) ของกระแสนั้นชั้นถัดๆ ไปจะเล็กลงไปเรื่อยๆ ทำให้ความเร็วของการเคลื่อนที่และการหักเหเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน อนุภาคของฝุ่นละอองใดที่ไม่สามารถติดตามกระแสการหักเหอันรวดเร็วของอากาศได้ ก็จะตกกระทบบนแผ่นรองรับและถูกเก็บกักในชั้นต่างๆ ทำให้จำแนกขนาดของฝุ่นละอองตามที่ออกแบบไว้ได้ และในชั้นสุดท้ายที่เรียกว่า after-filter จะใส่แผ่นเยื่อกรองไว้เพื่อเก็บกักฝุ่นที่มีขนาดเล็กที่สุดที่หลุดรอดจากการเก็บกักในชั้นต่างๆ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 องค์ประกอบของ Cascade impactor (Marple and Willeke, 1979)

ขนาดของฝุ่นละอองที่ถูกเก็บกักในชั้นต่าง ๆ นั้นเป็นขนาดของ aerodynamic diameter ซึ่งเป็นขนาดที่เทียบเท่า ไม่ใช่ขนาดที่แท้จริงตามสภาพที่ปรากฏ เนื่องจากอนุภาคในบรรยากาศนั้นมีหลากหลายรูปร่าง รวมถึงเส้นใยต่างๆ ยากที่จะบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ชัดเจนได้ มีน้อยมากที่อนุภาคนั้นจะเป็นทรงกลม การกำหนดขนาดจึงใช้วิธีเทียบเท่า กล่าวคือ เมื่อปล่อยให้อนุภาคใดก็ตามที่ไม่ทราบขนาด หรืออนุภาคนั้นมีรูปร่างที่ผิดปกติยากต่อการบอกขนาดได้ ตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในสภาวะของอากาศนิ่ง พร้อมกับอนุภาคทรงกลมที่มีความหนาแน่น 1 กรัม/ลบ.ซม. ถ้าความเร็วในการเคลื่อนที่นั้นเท่ากัน จะถือว่าอนุภาคที่ไม่ทราบขนาดนั้นมีค่าเทียบเท่ากับขนาดของอนุภาครูปทรงกลมที่มีความหนาแน่น 1 กรัม/ลบ.ซม. ทั้งนี้ นอกจากขนาดของ aerodynamic diameter แล้ว ขนาดของ Stokes diameter ก็เป็นที่นิยมใช้เช่นกัน โดยขนาดของ Stokes diameter กำหนดด้วยความหนาแน่นที่เท่ากันระหว่างอนุภาคทรงกลมกับอนุภาคใดๆ กล่าวคือ อนุภาคใดก็ตามที่ไม่ทราบขนาดที่มีความหนาแน่นเท่ากับอนุภาคทรงกลมเมื่อตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในสภาวะของอากาศนิ่งพร้อมๆ กัน อนุภาคนั้นจะมีขนาดเทียบเท่ากับขนาดของอนุภาคทรงกลม (Hind, 1982)(รูปที่ 2)

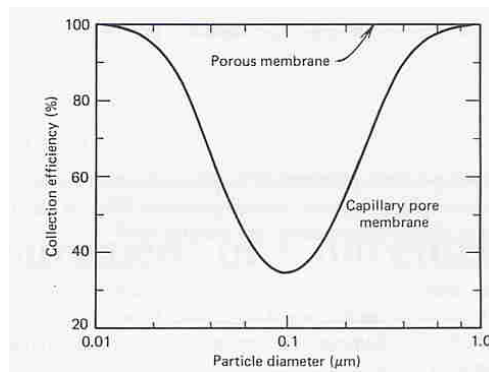


รูปที่ 2 อนุภาครูปทรงผิดปกติและขนาดเทียบเท่าแบบต่างๆ (Hind, 1982)

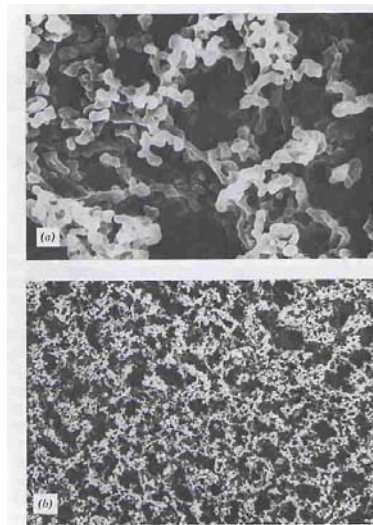
ในรูปที่ 2 สมมติถ้านำอนุภาคที่มีรูปร่างที่ผิดปกติมาป้อนให้เป็นรูปทรงกลมให้มีปริมาตรเท่าเดิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคที่ได้จะเป็น equivalent volume diameter (d_e) โดย χ คือ ค่า dynamic shape factor ซึ่งเป็นตัวแปรที่มาจากทดสอบความเร็วในการตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยเทียบให้อนุภาคทรงกลมมีค่า dynamic shape factor เท่ากับ 1 อนุภาครูปทรงอื่นที่ตกตัวช้ากว่าจะมีค่ามากกว่า 1 เช่น อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกเต๋า มีค่า dynamic shape factor เท่ากับ 1.08 อนุภาคทรงกระบอก (ที่มีความยาวเป็น 4 เท่าของความกว้าง) มีค่า dynamic shape factor เท่ากับ 1.32 (วัดในแนวนอน) และ 1.07 (วัดในแนวตั้ง) เป็นต้น (Hind, 1982) ส่วน ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาค V_{TS} คือ ความเร็วที่อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในสภาวะของอากาศนิ่ง ซึ่งในรูป อนุภาครูปทรงผิดปกติเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันกับอนุภาค

ขนาด $4.3 \mu\text{m}$ ที่มีความหนาแน่นเท่ากัน (4 g/cm^3) ดังนั้นอนุภาครูปทรงพิคติกจึงมีขนาด Stokes diameter (d_s) เท่ากับ $4.3 \mu\text{m}$ ในทำนองเดียวกัน อนุภาครูปทรงพิคติกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันกับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 1 g/cm^3 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $8.6 \mu\text{m}$ ดังนั้นมันจึงมีขนาด aerodynamic diameter (d_a) เท่ากับ $8.6 \mu\text{m}$ ทั้งนี้ ในรายงานฉบับนี้ ขนาดของอนุภาคที่กล่าวถึงทั้งหมดจะเป็นขนาดของ aerodynamic diameter ซึ่งเป็นการใช้พฤติกรรมในการตกตัวที่เหมือนกับอนุภาคขนาดความหนาแน่น 1 g/cm^3 มากกว่าจะใช้ขนาดที่แท้จริงหรือความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาค

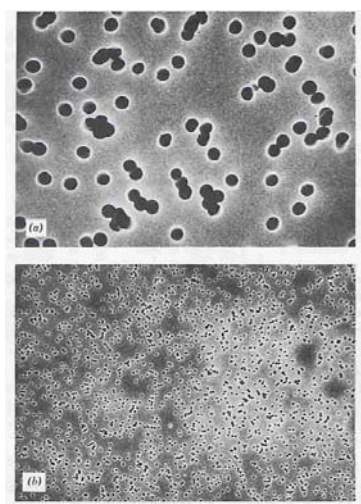
สำหรับในชั้นของ after-filter แผ่นเยื่อกรองที่ใช้กันโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นแบบเส้นใยและแบบรูพรุน ซึ่งประสิทธิภาพการดักจับขนาดของอนุภาคของฝุ่นละอองนั้น ไม่ได้ขึ้นกับขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อกรองดังเช่นที่เข้าใจกันตั้งในการกรองของแข็งหรือของเหลว การกำหนดขนาดของ รูพรุนนั้นเป็นการกำหนดจากการกรองของเหลว แต่ในการดักจับอนุภาคในอากาศจะขึ้นกับการชนและเกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองเป็นสำคัญ ทำให้ขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนมากๆ ยังคงสามารถถูกดักจับไว้ได้ (รูปที่ 3) โดยเฉพาะเมื่อใช้ porous membrane filter (รูปที่ 4) (เช่น cellulose esters, sintered metals, polyvinyl chloride, Teflon และพลาสติกชนิดอื่นๆ) แต่ประสิทธิภาพการจับอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดรูพรุนของ capillary pore membrane filter (เช่น polycarbonate film) (รูปที่ 5) จะไม่ดีเท่า ในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการจับฝุ่นของ porous membrane filter ขนาดรูพรุน $0.8 \mu\text{m}$ นั้นสามารถจับอนุภาคฝุ่นได้ทุกขนาดตั้งแต่ $0.01 \mu\text{m}$ จนถึง $1 \mu\text{m}$ (หรือใหญ่กว่า) 100% ขณะที่ capillary pore membrane filter ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมากเมื่ออนุภาคฝุ่นมีขนาด $0.1 \mu\text{m}$ ทั้งนี้ กลไกในการดักจับฝุ่นของเยื่อกรองประกอบไปด้วยแรง inertial impaction แรง interception แรง diffusion แรงโน้มถ่วงของโลก และแรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิตย์ โดยแรง inertial impaction หมายถึง แรงปะทะที่อนุภาคนั้นวิ่งเข้าชนเยื่อกรองด้วยแรงเฉื่อยของตัวเอง (รูปที่ 6) แรง interception หมายถึงการเกาะติดของอนุภาคบนเยื่อกรอง เมื่ออนุภาคนั้นปนไปกับกระแสของอากาศและเคลื่อนผ่านเส้นใยของเยื่อกรองด้วยระยะห่างที่แคบไปกว่าขนาดรัศมีของอนุภาค (รูปที่ 7) แรง diffusion หมายถึงการแพร่หรือฟุ้งกระจายของอนุภาคขนาดเล็กที่เคลื่อนที่แบบ Brownian จนไปชนและเกาะติดอยู่บนเส้นใยเยื่อกรอง (รูปที่ 8) ส่วนแรงดึงดูดเชิงไฟฟ้าสถิตย์เกิดขึ้นเมื่อประจุทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคและเส้นใยตรงกันข้ามกันและเกิดแรงดึงดูดกันขึ้น โดยแรงใดจะเป็นแรงหลักก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาคในเรื่องของขนาด ความหนาแน่น รูปทรง และประจุทางไฟฟ้า รวมถึงคุณสมบัติของเยื่อกรองและความเร็วของอากาศที่ผ่านเยื่อกรอง (Lehtimaki and Willeke, 1993) ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่ ($>0.5 \mu\text{m}$) ที่มีอัตราเร็วของการไหลผ่านสูง แรง impaction และ interception จะเป็นแรงหลัก ส่วนอนุภาคขนาดเล็ก ($<0.2 \mu\text{m}$) ที่มีอัตราการไหลผ่านต่ำ แรง diffusion จะเป็นแรงหลัก ดังแสดงในรูปที่ 9



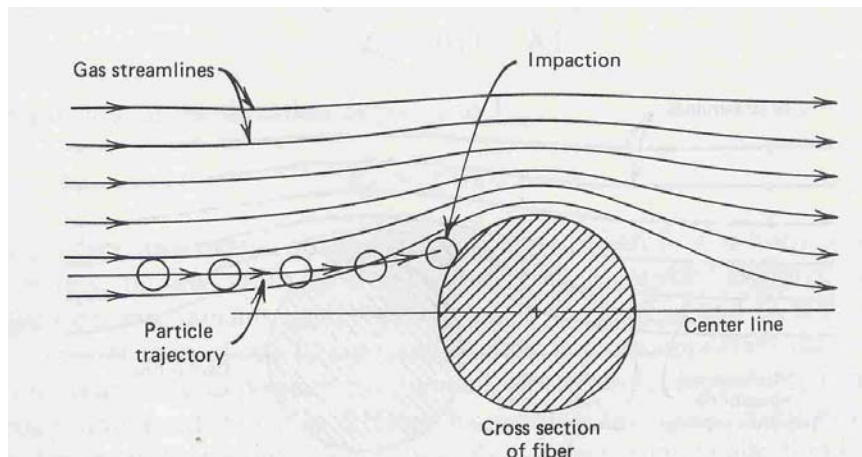
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นขนาดต่างๆของเยื่อกรองขนาดรูพรุน 0.8 μm
อัตราเร็วของกระแส 7.5 cm/sec (Hind, 1982)



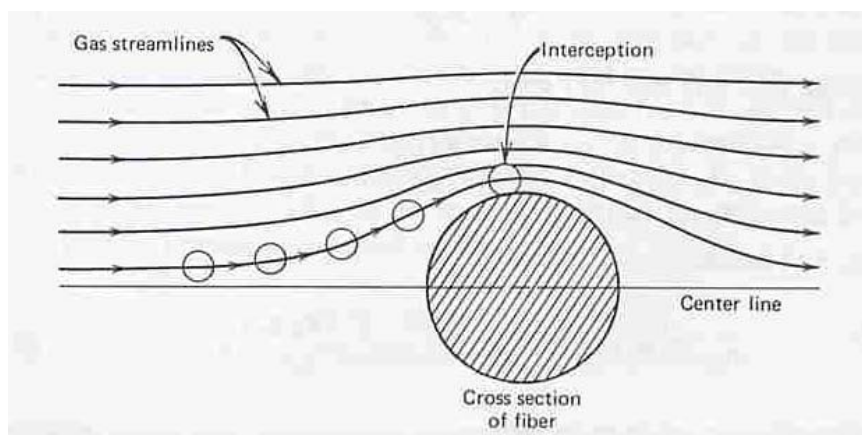
รูปที่ 4 Porous membrane filter (cellulose ester) ขนาดรูพรุน 0.8 μm a) กำลังขยาย 4150X
b) กำลังขยาย 800X (Hind, 1982)



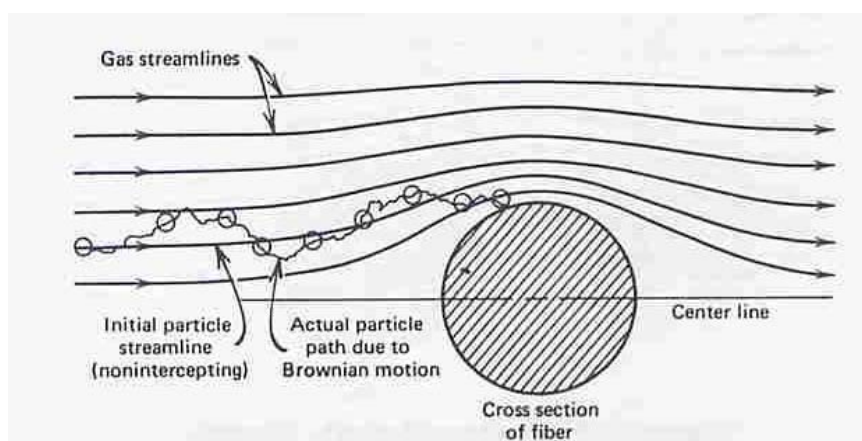
รูปที่ 5 Capillary pore membrane filter ขนาดรูพรุน $0.8\ \mu\text{m}$ a) กำลังขยาย 4150X b) กำลังขยาย 800X (Hind, 1982)



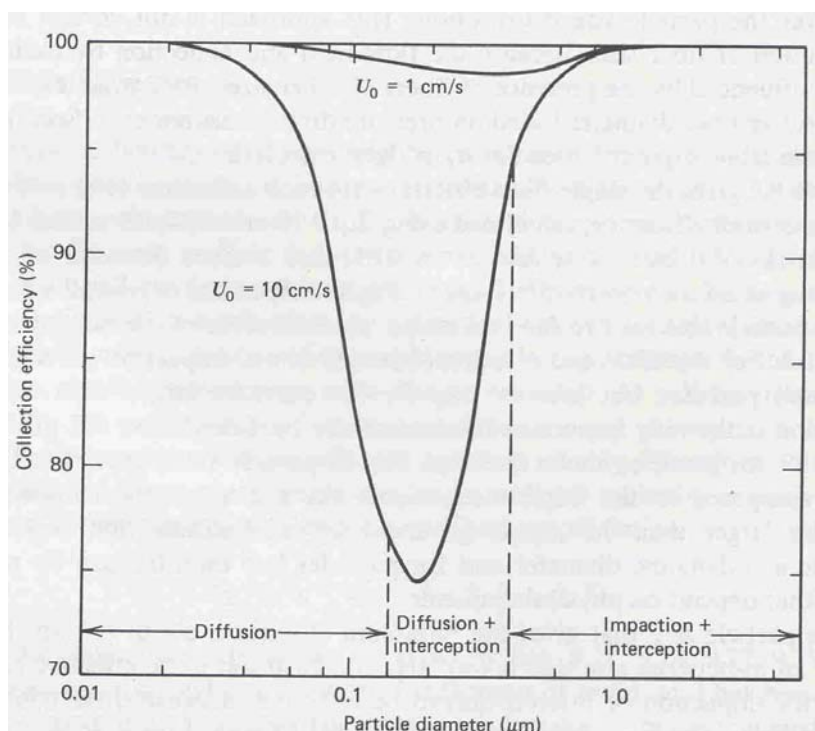
รูปที่ 6 แรง impaction (Hind, 1982)



รูปที่ 7 แรง interception (Hind, 1982)



รูปที่ 8 แรง diffusion (Hind, 1982)

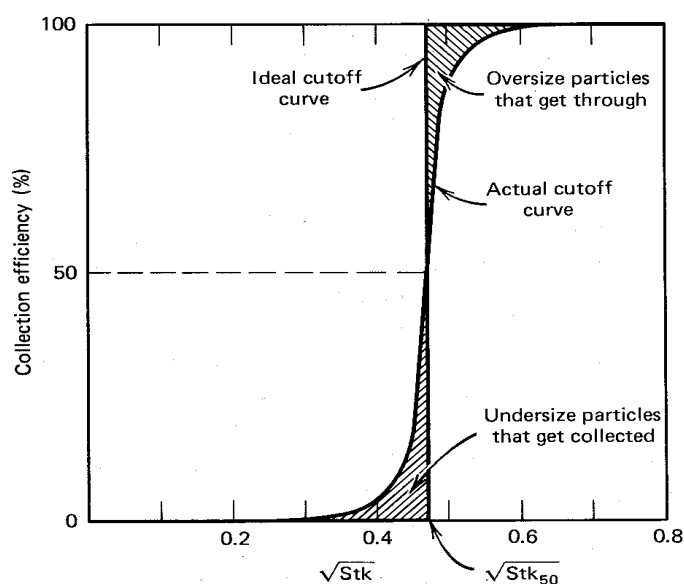


รูปที่ 9 แรงหลักที่ใช้ในการดักจับอนุภาคนขนาดต่างๆของเส้นใยเยื่อกรองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 μm หน้า 1 mm ความเร็วของกระแส 1 cm/sec และ 10 cm/sec (Hind, 1982)

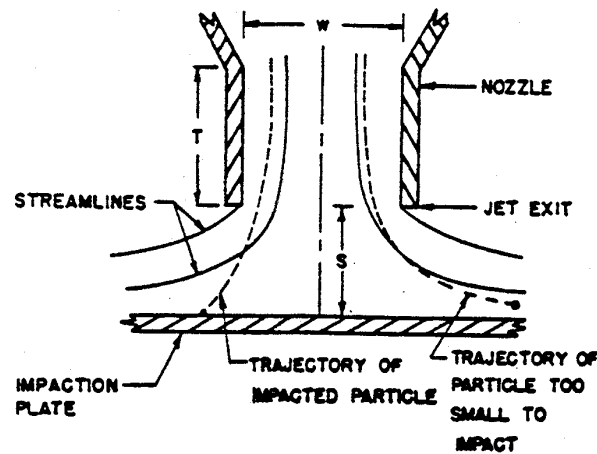
การเลือกใช้เยื่อกรองจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการเก็บตัวอย่าง ถ้าต้องการวิเคราะห์น้ำหนักของฝุ่น เยื่อกรองที่ใช้ควรมีน้ำหนักที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมของอุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลา ซึ่ง cellulose fiber นั้นไม่เหมาะที่จะใช้เนื่องจากดูดความชื้นได้ดี glass fiber และ cellulose ester มีผลกระทบจากความชื้นและระยะเวลาบ้างในระดับหนึ่ง ส่วน polycarbonate, polyvinyl chloride และ Teflon นั้นมีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมน้อยที่สุด แต่ถ้าต้องการนำฝุ่นละอองไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของอินทรีย์สาร glass fiber ไม่ควรจะใช้ เนื่องจากมีส่วนประกอบเป็นสารอินทรีย์อยู่ 5% โดยน้ำหนัก (Hinds, 1982) แต่ถ้าต้องการวิเคราะห์ลักษณะฝุ่นด้วยกล้อง scanning electron microscope หรือวิเคราะห์องค์ประกอบของฝุ่นด้วยวิธี Proton Induce X-Ray Emission (PIXE) polycarbonate film จะเหมาะสมกว่าชนิดอื่น เพราะมีสภาพผิวที่เรียบลื่น บาง และมีสารปนเปื้อนต่ำ เป็นต้น (Chuaybamroong, 2002)

เครื่องมือ impactor ปกติจะถูกกำหนด cutoff diameter ในแต่ละชั้นเอาไว้ ซึ่งหมายถึงขนาดของอนุภาคที่ชั้นนั้นสามารถกักเก็บไว้ได้ ในทางทฤษฎี แต่ละชั้นควรจะกักเก็บอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า cutoff diameter ไว้ได้ทั้งหมด 100% และปล่อยให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหลุดลอดไปยังชั้นถัดไป แต่ในทางปฏิบัติ impactor โดยทั่วไปจะสามารถกักเก็บอนุภาคในขนาดของ cutoff diameter ไว้ได้เพียงจำนวน 50% จากทั้งหมด (D_{p50}) โดยประมาณว่าได้สูญเสียมวล

อนุภาคขนาดใหญ่กว่า cutoff diameter ให้กับชั้นถัดไปในจำนวนเท่ากับที่ได้รับมวลอนุภาคขนาดเล็กกว่า cutoff diameter มาจากชั้นก่อนหน้า (รูปที่ 10) ทั้งนี้ ปัจจัยที่กำหนดประสิทธิภาพการกักเก็บจะขึ้นอยู่กับลักษณะและความเร็วในการไหลของกระแสที่ผ่านช่อง nozzle (รูปที่ 11) ซึ่งการที่อนุภาคนั้นจะตกกระทบและถูกเก็บกักบนแผ่นรองรับหรือไม่ ขึ้นกับแนวโค้งหักเหของมัน (trajectory line) โดยตัวแปรที่สำคัญคือค่า Stokes number (Stk) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะหยุดยั้ง (stopping distance, τV_0) ต่อรัศมีของช่อง nozzle ($W/2$) (สมการที่ 1) โดยระยะหยุดยั้งหมายถึงระยะทางไกลที่สุดที่อนุภาค aerodynamic diameter (D_p) เคลื่อนที่ออกมาจากช่อง nozzle ด้วยแรงโมเมนตัมของมันเอง (เนื่องจากไม่สามารถติดตามกระแสของอากาศที่หักเหอย่างเฉียบพลัน 90 องศาได้) ด้วยความเร็วเฉลี่ย V_0 ในสภาวะอากาศนิ่งและปราศจากแรงจากภายนอกมาเกี่ยวข้อง ซึ่งค่า Stokes number ยิ่งต่ำเพียงใด อนุภาคนั้นมีแนวโน้มจะติดตามกระแสอากาศไปได้มากเพียงนั้น หรือในทางกลับกัน ค่า Stokes number ยิ่งสูงเท่าใดอนุภาคนั้นยิ่งแยกตัวออกมาจากกระแสเมื่อเกิดการหักเหทิศทางได้มากเท่านั้น กล่าวคือ ค่า Stokes number จะสูงได้เมื่อระยะหยุดยั้งมีค่ามาก (ความเร็ว V_0 สูงๆ) และรัศมีของช่อง nozzle มีค่าน้อยๆ โดยค่า Stk_{50} ที่เหมาะสมสำหรับ impactor ที่มี nozzle ชนิดทรงกลม คือ 0.24 และชนิดสี่เหลี่ยม คือ 0.59 ซึ่ง ณ จุดที่ค่าประสิทธิภาพการกักเก็บเท่ากับ 50% ค่า Stokes number จะแสดงผลด้วยตัวแปร Stk_{50} ด้วยเช่นกัน (Hinds, 1982)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคของ impactor ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ (Hinds, 1982)



รูปที่ 11 ลักษณะการไหลของกระแสที่ผ่านช่อง nozzle ของ impactor (Marple and Rubow, 1986)

$$Stk = \frac{\tau V_0}{W/2} = \frac{\rho_p C V_0 D_p^2 / 18 \mu}{W/2} \quad (1)$$

(Marple and Willeke, 1979)

ซึ่ง τ ได้แก่ relaxation time (วินาที) (คือเวลาที่อนุภาคใช้ในการปรับความเร็วให้เข้ากับสถานะใหม่หลังจากหลุดออกมาจากกระแสของอากาศ)

W ได้แก่ ความกว้างของช่อง nozzle (ซม.)

ρ_p ได้แก่ ความหนาแน่นของอนุภาค (กรัม/ลบ.ซม.)

C ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไหลของ Cunningham (ไม่มีหน่วย)

$$C = 1 + \frac{\lambda}{D_p} \left[2.514 + 0.8 \exp(-0.55 \frac{D_p}{\lambda}) \right] \quad (2)$$

λ ได้แก่ mean free path (ซม.) ของโมเลกุลก๊าซ (คือระยะทางโดยเฉลี่ยที่โมเลกุลก๊าซเคลื่อนที่ได้หลังจากชนกับโมเลกุลอื่นก่อนจะเกิดการชนกันอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเท่ากับ $0.066 \mu\text{m}$ ที่ 25°C และ 1 atm)

μ ได้แก่ ค่าความหนืดของอากาศ (กรัม/ซม.-วินาที)

สมการดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของขนาด cutoff diameter ของอนุภาคที่ถูกเก็บกักในแต่ละชั้นได้คือ

$$D_{p50} \sqrt{C} = \sqrt{\frac{9 \mu W Stk_{50}}{V_0 \rho_p}} \quad (3)$$

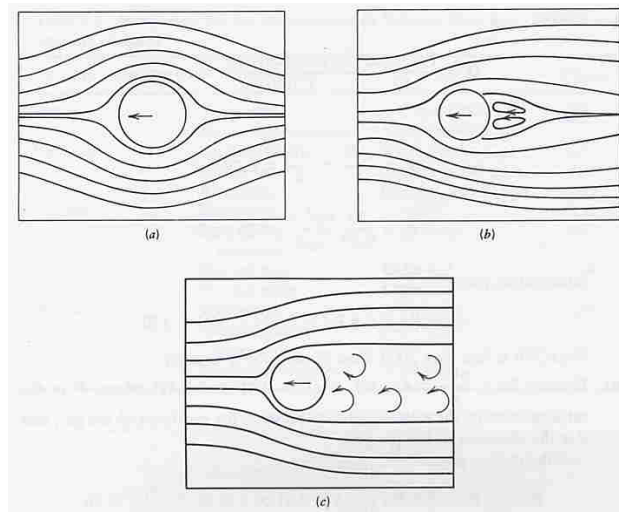
ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนไหลของ Cunningham จำเป็นต้องใช้ในสมการข้างต้นเมื่ออนุภาคมีขนาด $1\ \mu\text{m}$ หรือเล็กไปกว่านั้น เนื่องจากเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กมากๆจนใกล้เคียงกับระยะ mean free path ของโมเลกุลก๊าซ ($0.066\ \mu\text{m}$) อนุภาคจะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วเสมือนว่ามันลื่นไถลไประหว่างโมเลกุลได้ง่าย การตกตัวของอนุภาคจึงเร็วกว่าที่คำนวณจากกฎของ Stokes ที่ไม่ได้รวมค่าสัมประสิทธิ์นี้มาก

สำหรับตัวแปรในเรื่องของความเร็วของกระแสที่ไหลผ่านช่อง nozzle นั้น จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่อง nozzle และค่า Reynolds number (Re) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกถึงลักษณะการไหลของกระแสเมื่อเคลื่อนที่ในเส้นท่อหรือเคลื่อนตัวรอบสิ่งกีดขวาง ซึ่งในที่นี้ก็คืออนุภาคของฝุ่นละออง โดยคำนวณมาจากสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดของกระแสรอบอนุภาค โดยค่า Re ต่ำๆ ($\text{Re} < 1$) (แรงหนืดมีมากกว่าแรงเฉื่อยมากๆ) ลักษณะการไหลจะราบเรียบและเท่าเทียมกันระหว่างต้นกระแสนอนผ่านอนุภาคกับปลายกระแสนหลังผ่านอนุภาค ซึ่งเรียกว่า Laminar flow ถ้า $\text{Re} > 1$ กระแสนั้นจะเริ่มปั่นป่วนที่เบื้องหลังของอนุภาค ซึ่งเรียกว่า Turbulent flow (รูปที่ 12) ทั้งนี้สำหรับการไหลในเส้นท่อ ค่า Re ที่น้อยกว่า 2000 จะจัดว่าเป็น Laminar flow ส่วนค่า Re ที่มากกว่า 4000 จัดว่าเป็น Turbulent flow ซึ่งในการออกแบบ impactor จำเป็นต้องกำหนดให้ความเร็วของกระแสไหลออกจากช่อง nozzle อย่างสม่ำเสมอ ถ้าค่า Reynolds number ต่ำเกินไปจะมีผลให้เกิดความหนืดที่ผนังของ nozzle มากขึ้น ทำให้ความเร็วของกระแสที่อยู่ใกล้กับผนัง nozzle ช้ากว่าความเร็วของกระแสที่อยู่ตรงกลางมาก ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศพร้อมฝุ่นที่ผ่านเข้ามาจะมีลักษณะเป็นรูปโค้ง parabolic การตกกระทบลงบนแผ่นรองรับของอนุภาคฝุ่นก็จะเกิดเฉพาะที่จุดศูนย์กลางของช่อง nozzle เท่านั้น ส่วนอนุภาคของฝุ่นที่ปนอยู่ในกระแสน้ำวนผนัง nozzle ที่มีความเร็วช้ากว่าที่ควรจะเป็น จะยังคงติดตามการเคลื่อนที่ของอากาศออกไปยังขั้นต่อไปได้ การกักเก็บอนุภาคในขนาด cut diameter ที่ออกแบบไว้ก็จะไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร โดยทั่วไป ค่า Reynolds number ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 500-3000 (Marple and Willeke, 1979) โดยขึ้นกับตัวแปรในด้านความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ความเร็วเฉลี่ยของกระแสที่ออกมาจากช่อง nozzle (V_0) ความกว้างของช่อง nozzle (W) และความหนืดของกระแส (μ) นั้น (สมการที่ 4)

$$\text{Re} = \frac{\rho V_0 W}{\mu} \quad (\text{สำหรับ nozzle ทรงกลม}),$$

$$\text{และ} \quad \text{Re} = \frac{\rho V_0 2W}{\mu} \quad (\text{สำหรับ nozzle ทรงสี่เหลี่ยม}) \quad (4)$$

(Marple and Willeke, 1979)



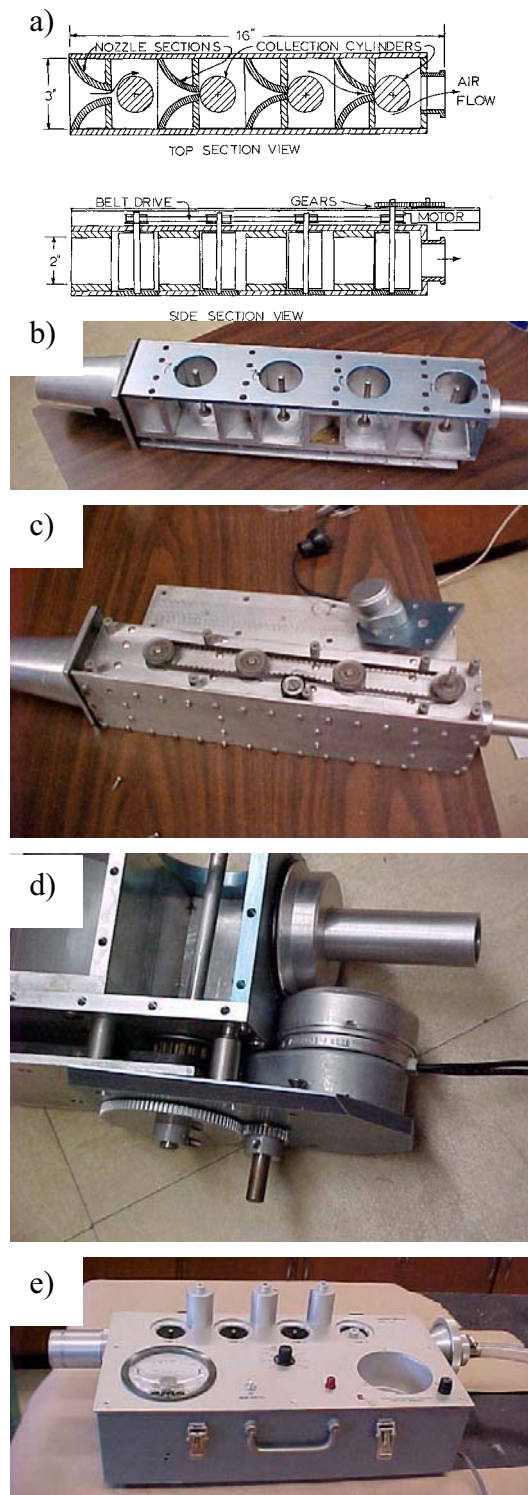
รูปที่ 12 ลักษณะการไหลของกระแสบอนอนุภาคแบบต่างๆ a) Laminar flow, $Re=0.1$
b) Turbulent flow, $Re\approx 2$ c) Turbulent flow, $Re\approx 250$ (Hinds, 1982)

นอกจากค่า Reynolds number แล้ว ปัจจัยที่สามารถกำหนดกระแสการไหลออกจากช่อง nozzle อย่างสม่ำเสมอคือ การควบคุมระยะห่างระหว่าง nozzle กับแผ่นรองรับ ดังในรูปที่ 11 สัญลักษณ์ W คือ ความกว้างของช่อง nozzle สัญลักษณ์ S คือ ระยะห่างระหว่างปลาย nozzle กับแผ่นรองรับ และสัญลักษณ์ T คือ ความหนาของช่อง nozzle สำหรับใน nozzle ทรงสี่เหลี่ยม นั้น ควรกำหนดให้ S/W มีค่าเท่ากับ 1.5 ส่วน nozzle ทรงกลมควรกำหนดให้ S/W มีค่าเท่ากับ 1.0 จึงจะก่อให้เกิดการไหลของกระแสที่สม่ำเสมอได้ (Marple and Rubow, 1986)

2.2 การออกแบบและประดิษฐ์ Lundgren Impactor

Lundgren Impactor ในรายงานฉบับนี้ เป็นการพัฒนามีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นมาเป็น 8 ชั้นจากตัวดั้งเดิมที่มี 4 ชั้น บวกกับชั้น after-filter (รูปที่ 13) โดยยังคงลักษณะเด่นอย่างอื่นไว้ตามเดิม ในตัวดั้งเดิมนั้น nozzle เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยมที่มีความยาว 2 นิ้วในทุกชั้น ส่วนความกว้าง (W) ลดขนาดลงตามลำดับจาก 0.321 นิ้วในชั้นที่ 1 เป็น 0.101 นิ้วในชั้นที่ 2 และ 0.0345 นิ้ว ในชั้นที่ 3 และในชั้นสุดท้าย คือ 0.0115 นิ้ว เมื่อใช้อัตราการดูดอากาศเข้าเครื่องในช่วงของ $<0.5-5.0$ ลบ.ฟุต/นาที จะสามารถเก็บกักฝุ่นอนุภาคทรงกลมที่มีความหนาแน่น 2 กรัม/ลบ.ซม. ในขนาด $>20\ \mu\text{m}$ จนถึง $0.2\ \mu\text{m}$ ได้เป็นอย่างดี โดยแผ่นตกกระทบนั้นออกแบบไว้เป็นลักษณะแท่งทรง กระบอกที่มีพื้นที่ผิวรองรับฝุ่นละอองโดยรอบได้ 10 ตารางนิ้ว สามารถหมุนรอบตัวเองได้โดยการ ดัดตั้งฟันเฟืองและมอเตอร์ที่ปรับขนาดช้า-เร็วได้ การออกแบบให้มีการหมุนรอบอย่างต่อเนื่อง แทนที่จะเป็นแผ่นรองรับอยู่กับที่นั้น เพราะต้องการให้ฝุ่นมีการกระจายตัวเกาะบนผิวรองรับได้ อย่างสม่ำเสมอ และลดปัญหาของการสะสมฝุ่นบนผิวหน้าของแผ่นรองรับไม่ให้ทับถมกันหนาแน่นจนเกินไป อันส่งผลเสียให้ฝุ่นที่ตกกระทบลงมาใหม่ไม่สามารถเกาะติดบนพื้นผิวของแผ่นรองรับ ได้ ทั้งยังก่อให้เกิด

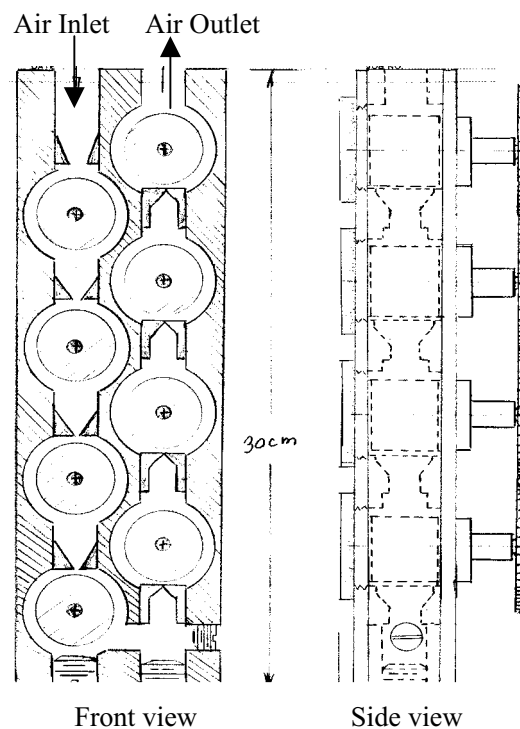
เกิดการกระเด็นกลับของอนุภาคที่มาใหม่กลับเข้าสู่กระแสของอากาศอีกด้วย ส่วน การออกแบบให้เป็นทรงกระบอกสวมลงบนแกนหมุนแทนที่จะเป็นแผ่นราบหมุนได้ ก็เพื่อความ สะดวกในการ ปรับระยะห่างระหว่าง nozzle กับผิวรองรับ ความสะดวกในการเปลี่ยนแท่ง กระบอกรองรับชุด ใหม่ เพิ่มพื้นที่ผิวรองรับอนุภาคฝุ่น สะดวกต่อการควบคุมและปรับเปลี่ยน ฟันเฟืองในการหมุน รอบ ง่ายต่อการประดิษฐ์ การทำความสะอาด และการป้องกันการรั่วซึมของ อากาศ ซึ่งในที่นี้จะใช้ วงยาง o-ring กรูในทุกจุดไม่ให้เกิดการรั่วซึมได้ แท่งทรงกระบอกนั้น สามารถพันรอบด้วยแผ่น aluminum foil กระดาษ หรือเยื่อกรองชนิดต่างๆ พลาสติกใส และอื่นๆ ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของ การนำอนุภาคฝุ่นไปวิเคราะห์ทางเคมี ชีวะ หรือฟิสิกส์ต่อไป ซึ่งระยะเวลา การทำงานของ Lundgren Impactor นั้น สามารถเก็บฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มีฝุ่นหนาแน่น ปกติได้นาน 24 ชั่วโมงโดยไม่มีปัญหาเรื่องการกระเด็นกลับของฝุ่นแต่อย่างใด แต่ในสภาวะที่ ความหนาแน่นของ ฝุ่นมีมาก อาจต้องลดระยะเวลาการเก็บตัวอย่างลง (Lundgren, 1967)



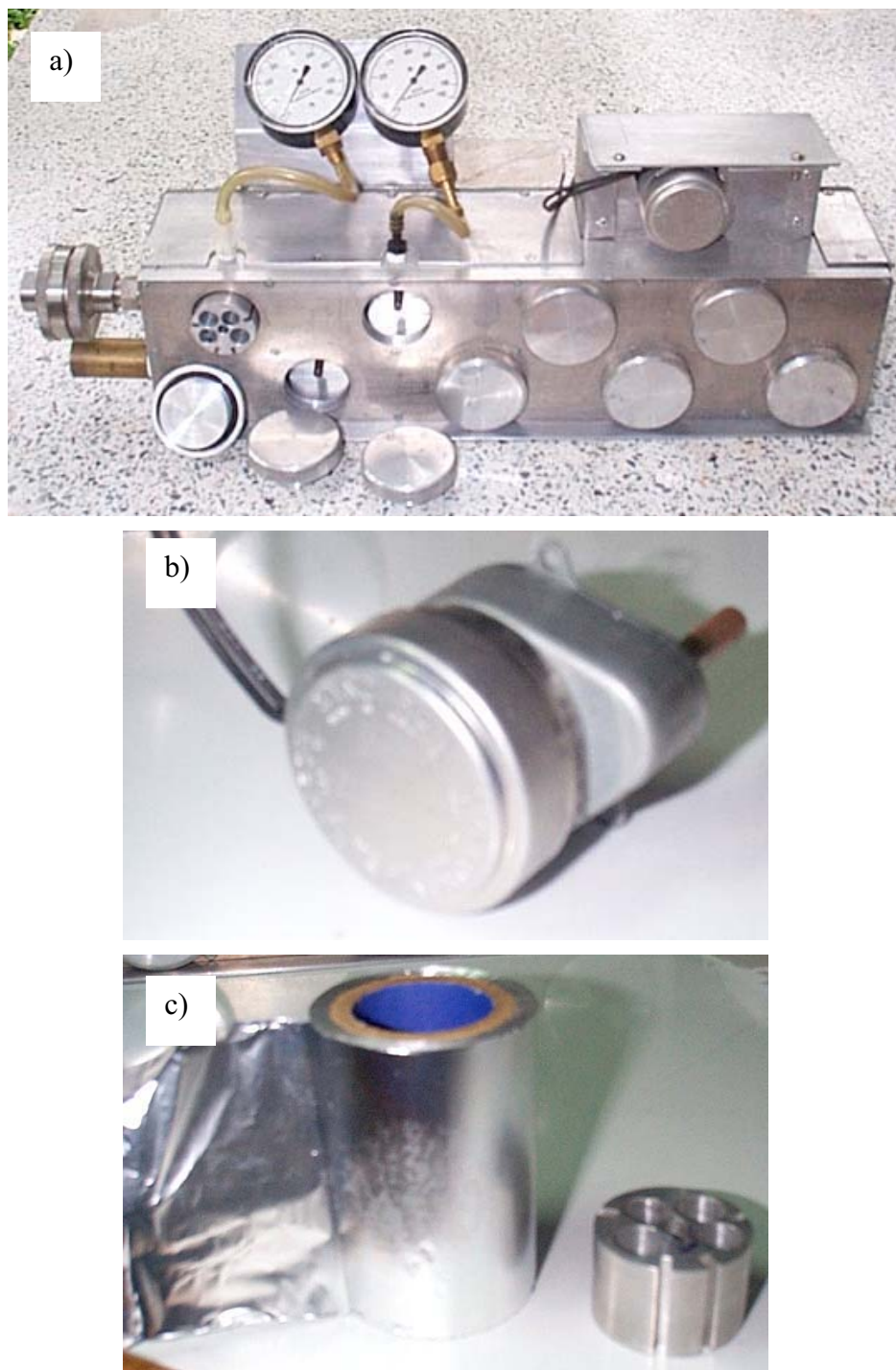
รูปที่ 13 Lundgren Impactor ตัวดั้งเดิม a) แบบร่างแสดงองค์ประกอบ b) แสดงแกนหมุนแท่งทรงกระบอก c) แสดงสายพานขับเคลื่อนแกนหมุนทางด้านล่าง d) แสดงการติดตั้ง ฟันเฟืองและมอเตอร์ e) แสดงแท่งทรงกระบอกรองรับฝุ่น

ลักษณะพิเศษของ Lundgren Impactor ที่เหนือไปกว่า impactor ชนิดอื่นที่ใช้กันอยู่ โดยทั่วไปในปัจจุบัน คือการใช้แท่งทรงกระบอกที่หมุนตัวอยู่ตลอดเวลาเป็นตัวรองรับฝุ่น เมื่อฝุ่นตกกระทบลงบนพื้นผิวที่อาจพันไว้ด้วยแผ่นกรองหรือวัสดุอื่น ฝุ่นนั้นจะไม่ทับถมลงบนจุดเดิม ในกรณีที่ผู้ที่ต้องการจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฝุ่น และ/หรือองค์ประกอบของฝุ่นกับ ช่วงเวลาสามารถกระทำได้ง่าย โดยการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นบนแท่งทรงกระบอกพร้อมเวลา ที่เริ่ม และบันทึกจุดสุดท้ายของการหมุนพร้อมเวลาที่หยุด เมื่อคลี่แผ่นเยื่อกรองออกมา ผู้วิจัยสามารถตัดแบ่งแผ่นรองรับออกเป็นส่วนของช่วงเวลาตามความสนใจ และนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนในแง่ของความสัมพันธ์กับช่วงเวลา ในขณะที่การใช้แผ่นรองรับแบบราบที่ฝุ่นมีการทับถมลงบนจุดเดิมๆอยู่ตลอดเวลาไม่สามารถทำได้

ใน Lundgren Impactor ตัวปัจจุบัน ได้เพิ่มชั้นเก็บกักขึ้นมาเป็น 8 ชั้น (รูปที่ 14-15) เพื่อให้เก็บกักฝุ่นขนาด cutoff diameter ได้ละเอียดมากขึ้นในช่วงระหว่าง $10.0\ \mu\text{m}$ จนถึง $0.1\ \mu\text{m}$ เมื่ออัตราการดูดอากาศเข้าเครื่องกำหนดไว้ที่ 30 ลิตรต่อนาที ค่า Reynolds number เท่ากับ 3000 ค่า $\sqrt{Stk}_{50}$ เท่ากับ 0.7 และความหนาแน่นของฝุ่น 1 กรัม/ลบ.ซม. โดยความยาวของช่อง nozzle (L) กำหนดไว้ที่ 2.5 cm ทุกชั้น ความหนาของช่อง nozzle (T) มีค่าเท่ากับความกว้างของ nozzle (W) ในแต่ละชั้น ส่วนระยะห่างระหว่างช่อง nozzle กับแท่งรองรับฝุ่น (S) มีค่าเป็นสอง เท่าของความกว้างของช่อง nozzle (W) ยกเว้นในชั้นที่ 5 จนถึงชั้นที่ 8 ระยะห่างกำหนดไว้ที่ 0.10 ซม. เนื่องจากถ้าสั้นไปกว่านี้ แท่งรองรับฝุ่นจะไปสัมผัสกับช่อง nozzle ได้ (ตารางที่ 1)



รูปที่ 14 แบบร่าง Lundgren Impactor ตัวปัจจุบัน



รูปที่ 15 Lundgren Impactor ตัวปัจจุบัน a) แสดงเครื่อง impactor พร้อม filter holder ในช่องทางออก b) แสดงมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนฟันเฟือง c) แสดงแท่งทรงกระบอกพร้อมแผ่น aluminum foil ที่ใช้เป็นตัวรองรับฝุ่นในแต่ละชั้น (รูที่เจาะในแท่งทรงกระบอกมีไว้เพื่อต้องการลดน้ำหนักเวลาชั่งในเครื่องซึ่งที่มี sensitivity สูงแต่รับน้ำหนักได้ต่ำ ส่วนร่องที่เจาะไว้ มีเพื่อตรึงแผ่น foil ด้วยเส้นยาง o-ring หรือวัสดุอื่นตามความเหมาะสม โดยวัสดุที่ใช้ทั้งหมดเป็นแท่งอลูมิเนียมแข็ง)

ใน Lundgren Impactor ตัวดั้งเดิม ความเร็วของการหมุนแท่งทรงกระบอกปรับเปลี่ยนได้ด้วยการเปลี่ยนขนาดของฟันเฟือง (รูปที่ 13d) แต่ในตัวปัจจุบัน ความเร็วในการหมุนกำหนดด้วยมอเตอร์ ซึ่งในการนี้ ได้ว่าจ้างบริษัท Hansen Corporation ในประเทศสหรัฐอเมริกา (www.hansen-motor.com) ให้ประดิษฐ์มอเตอร์ขนาด 50 Hz 3 Watt หมุนในอัตราเร็ว 1/24 RPH เป็นตัวขับเคลื่อนฟันเฟือง (รูปที่ 15b) เพื่อให้เก็บตัวอย่างฝุ่นในบรรยากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงโดยที่ฝุ่นไม่ตกกระทบลงบนตำแหน่งเดิม โดยมีพื้นที่รองรับฝุ่น 4.7 ตารางนิ้ว (แท่งทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ส่วนสูง 1 นิ้ว (รูปที่ 15c) พื้นที่รองรับ= $2\pi rh$)

ตารางที่ 1 ขนาดสัดส่วนของ nozzle ใน Lundgren impactor

ชั้นที่	ขนาดฝุ่น (μm)	cutoff size, D_{p50} (μm)	C^a	$D_{p50} \sqrt{C}$ (μm)	L^b (cm)	W^c (cm)	T^d (cm)	S^e (cm)
1	>10	10	1.016	10.08	2.5	0.5	0.5	1.0
2	10-5	5	1.033	5.08	2.5	0.23	0.23	0.46
3	5-2.5	2.5	1.066	2.58	2.5	0.12	0.12	0.24
4	2.5-1.2	1.2	1.138	1.28	2.5	0.06	0.06	0.12
5	1.2-0.6	0.6	1.277	0.68	2.5	0.032	0.032	0.10
6	0.6-0.4	0.4	1.419	0.48	2.5	0.023	0.023	0.10
7	0.4-0.2	0.2	1.879	0.27	2.5	0.013	0.013	0.10
8	0.2-0.1	0.1	2.888	0.17	2.5	0.010	0.010	0.10
After filter	<0.1	-			-	-	-	-

หมายเหตุ: ^aC=ค่าสัมประสิทธิ์การเลื่อนไหลของ Cunningham (สมการที่ 2), ^bL=ความยาวของ nozzle, ^cW=ความกว้างของ nozzle, ^dT=ความหนาของ nozzle, ^eS=ระยะห่างระหว่างช่อง nozzle กับแท่ง รองรับฝุ่น

$$\text{จากสมการที่ 3 } [D_{p50} \sqrt{C} = \sqrt{\frac{9\mu W Stk_{50}}{V_0 \rho_p}}] \text{ ตัวแปรที่กำหนดขนาดของ cutoff size}$$

(D_{p50}) คือค่าของ W และ ความเร็วเฉลี่ย V_0 ที่ออกมาจากช่อง nozzle ในขณะที่ค่าความหนืดของก๊าซ (μ) คือ 1.81×10^{-4} g/cm-sec ที่อุณหภูมิ 20°C ค่าความหนาแน่นของฝุ่น (ρ_p) คือ 1 g/cm³ และ

ค่า $\sqrt{Stk_{50}}$ คือ 0.7 ทั้งนี้ V_0 คำนวณได้จาก อัตราส่วนของอัตราการไหล (30 L/min) ต่อพื้นที่หน้าตัด A โดยในที่นี้ A คือความกว้างคูณความยาวของช่อง nozzle (สมการที่ 5)

$$V_0 = Q/A = Q/LW \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า $V_0=Q/LW$ ในสมการที่ 3 ค่า W สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6)

$$D_{p50} \sqrt{C} = \sqrt{\frac{9 \times 1.81 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{sec} \times 0.7 \times W}{\left(\frac{30 \text{ L/min} \times 60 \text{ sec/min} \times 1000 \text{ cm}^3/\text{L}}{2.5 \text{ cm} \times W} \right)}}$$

$$D_{p50} \sqrt{C} = 0.00219216 \times W \quad (\mu\text{m})$$

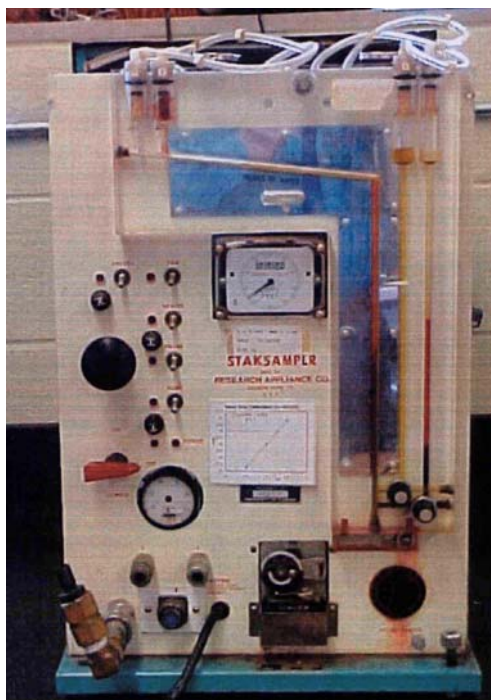
$$W = \frac{D_{p50} \sqrt{C}}{21.9216} \quad (\text{cm}) \quad (6)$$

ซึ่งตัวเลขแสดงไว้ในตารางที่ 1 ทั้งนี้ขนาดของช่อง nozzle ตั้งแต่ชั้นที่ 5 ถึงชั้นที่ 8 ได้ใช้เทคโนโลยี micro electrodischarge machining ในการเจาะช่อง nozzle เพื่อให้ได้ความหนาและความกว้างของช่องตามที่ต้องการ ส่วนรายละเอียดแบบร่างทางวิศวกรรมของการประดิษฐ์เครื่อง มีนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก

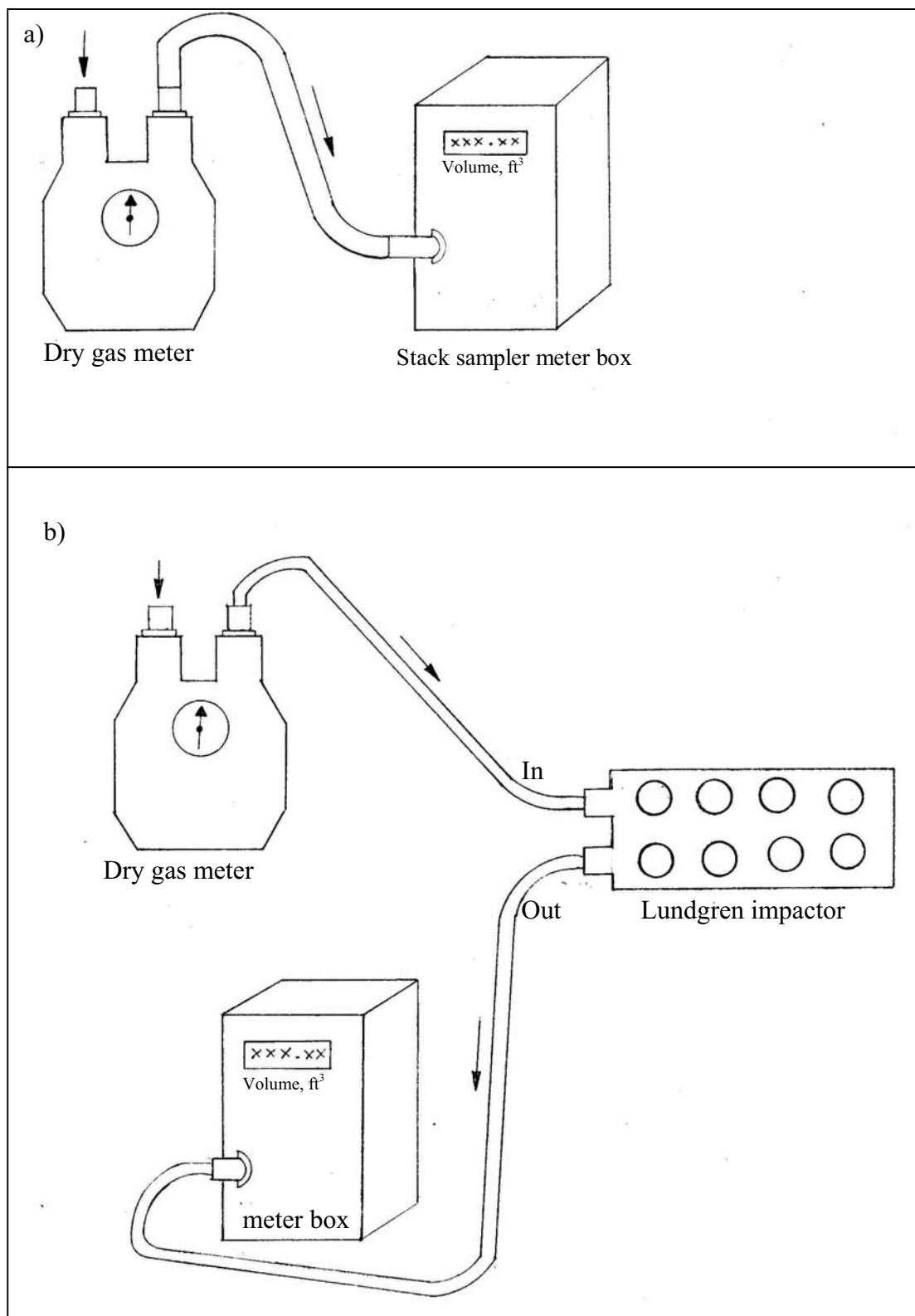
การทดสอบการรั่วซึมของเครื่องมือ (leak test) กระทำโดยใช้ dry gas meter 2 ตัว ตัวหนึ่งเป็น dry gas meter ขนาด 175 CFH (model AL-175, American Meter Company) (รูปที่ 16) ส่วนตัวที่สอง เป็น dry gas meter ที่อยู่ใน stack sampler meter box (model 2343RAC, Research Appliance Co)(รูปที่ 17) โดยในเบื้องต้น ได้ทดสอบความเที่ยงตรงและการรั่วซึมของ dry gas meter ทั้ง 2 ตัวก่อน ด้วยการต่อสายยางจากช่องทางออกของ dry gas meter ตัวที่หนึ่งเข้ากับ stack sampler meter box (รูปที่ 18) โดยปล่อยให้ปั๊มใน meter box ดูดอากาศในอัตรา 30 ลิตร/นาที เป็นการอุ่นเครื่องประมาณครึ่งชั่วโมงก่อนการทดสอบ จากนั้นเริ่มทดสอบโดยกำหนดจุดเริ่มต้นของเข็มบนหน้าปัดขนาด 1 ft³/revolution ของ dry gas meter ตัวที่หนึ่ง พร้อมกับอ่านตัวเลขเริ่มต้นบนหน้าปัดของ meter box ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงปริมาตรของอากาศที่เข้าเครื่องเมื่อปั๊มทำงาน เมื่อเข็มบนหน้าปัด dry gas meter ตัวแรกเคลื่อนที่มาครบหนึ่งรอบจึงอ่านตัวเลขบนหน้าปัดของ meter box อีกครั้ง ถ้าไม่มีการรั่วซึมของอากาศเกิดขึ้น ปริมาตรอากาศใน dry gas meter ควรเท่ากับปริมาตรอากาศที่เข้า meter box ซึ่งก็คือ 1 ft³ จากการทดสอบ 3 ครั้ง พบว่าแทบไม่มีการรั่วซึมของอุปกรณ์เกิดขึ้น (ความคลาดเคลื่อน 1%) จากนั้นเพิ่ม Lundgren impactor เข้าไปในระหว่างกลางของ dry gas meter กับ meter box และทดสอบด้วยวิธีการเช่นเดิม พบว่าความคลาดเคลื่อนหรือการรั่วซึมเกิดขึ้น 8-10% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ผู้วิจัยยอมรับได้ (ตารางที่ 2)



รูปที่ 16 Dry gas meter ขนาด 175 CFH (model AL-175, American Meter Company)



รูปที่ 17 Stack sampler meter box (model 2343RAC, Research Appliance Co)



รูปที่ 18 แสดงการทดสอบ leak test ของ Lundgren impactor a) เฉพาะอุปกรณ์ dry gas meters b) Lundgren impactor กับ dry gas meters

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ leak test ของ Lundgren impactor

Dry gas meter (ft ³)	Stack sampler meter box			Error
	Start (ft ³)	Stop (ft ³)	Volume (ft ³)	
a) เฉพาะ dry gas meters				
1	674.61	675.61	1	-
1	677.11	678.11	1	-
1	678.56	679.55	0.99	1%
b) Lundgren impactor กับ dry gas meters				
1	686.24	687.34	1.1	10%
1	688.44	689.53	1.09	9%
1	690.12	691.21	1.09	9%
1	691.72	692.72	1	-
1	693.38	694.46	1.08	8%
1	696.05	697.13	1.08	8%

2.3 วิธีการทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor

2.3.1 ฝุ่นขนาด >10.0-3.0 μm

ฝุ่นขนาดใหญ่ที่อยู่ในช่วงของ 3.0 μm จนถึงใหญ่กว่า 10 μm ที่ตกกระทบลงบนชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 3 นั้น สามารถทดสอบความเที่ยงตรงของขนาดฝุ่นได้โดยการสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมจากสาร ammonium fluorescein ที่ละลายในสารละลาย ammonium hydroxide (NH₄OH) ในอัตราความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (รายละเอียดของการเตรียมอยู่ในภาคผนวก ข) บรรจุในกระบอกฉีดขนาด 20 ลบ.ซม. และใช้แรงดันอัดสารละลายผ่านช่อง orifice ขนาดเล็กๆ (5-40 μm) จนเกิดเป็นสายของละอองของเหลวพุ่งผ่านช่องนั้นออกมา จากนั้นจะใช้เครื่องกำเนิดคลื่นที่ให้ความถี่คลื่นสูงพอ (30-500 kHz) ที่จะทำให้ละอองของเหลวแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวและมีขนาดเท่าเทียมกัน และขั้นสุดท้ายคือ การปล่อยอากาศแห้งซึ่งประกอบไปด้วย dilution air (5-6 m³/hr) และ dispersion air (15-20 m³/hr) ไปทำให้อนุภาคเดี่ยวนั้นแห้งและกระจายตัว (รูปที่ 19) กลายเป็นอนุภาคทรงกลมสังเคราะห์ดังที่ต้องการได้ (รูปที่ 20) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ กระทำโดยใช้เครื่อง Vibrating Orifice Monodispersed Aerosol Generator (VOAG) (model 3050, TSI Incorporated) ซึ่งขนาดของอนุภาคสังเคราะห์คำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$D_d = \left(\frac{6Q_l}{\pi f} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

$$D_p = D_d \times C^{1/3}$$

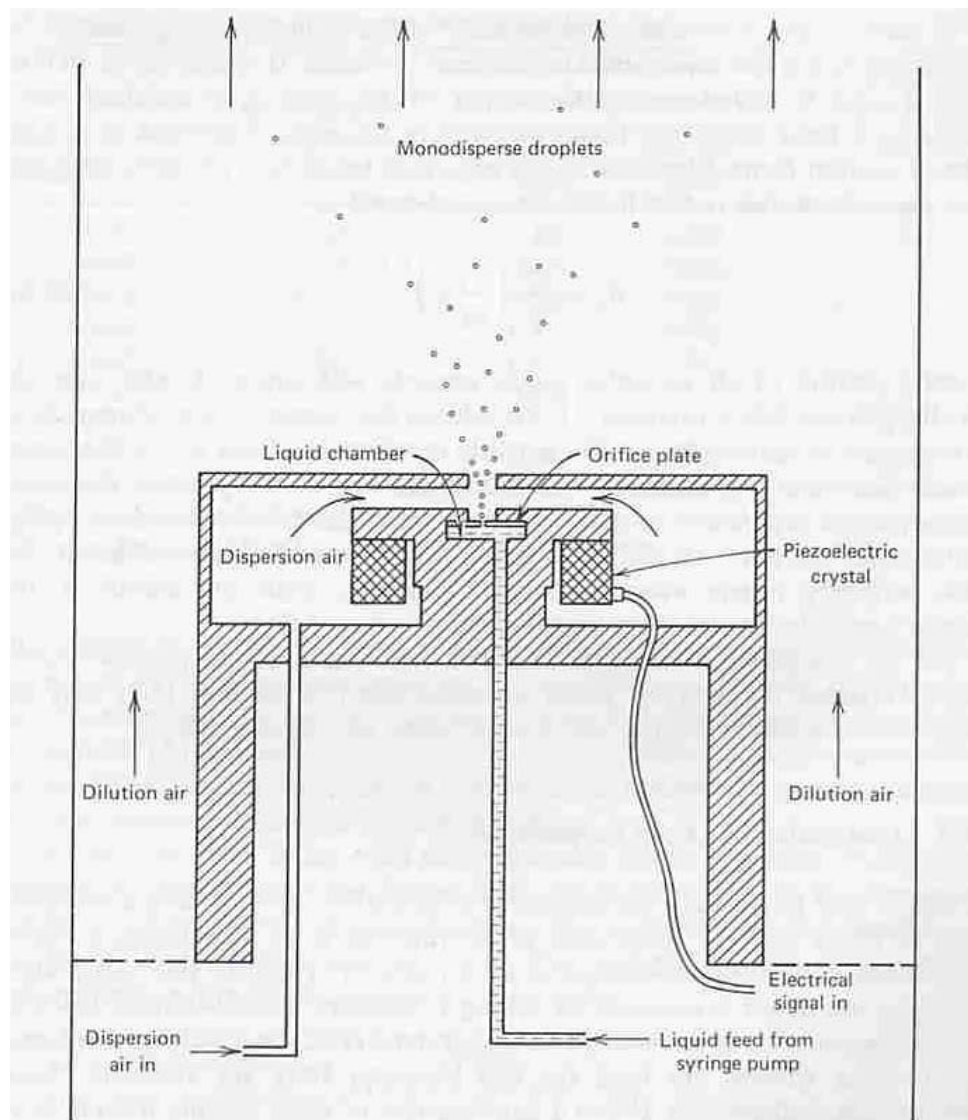
โดยที่ D_d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคเดี่ยวของละอองของเหลว (ชม.)

Q_l คือ อัตราการไหลของของเหลวในกระบอกฉีดยา (ลบ.ชม./วินาที)

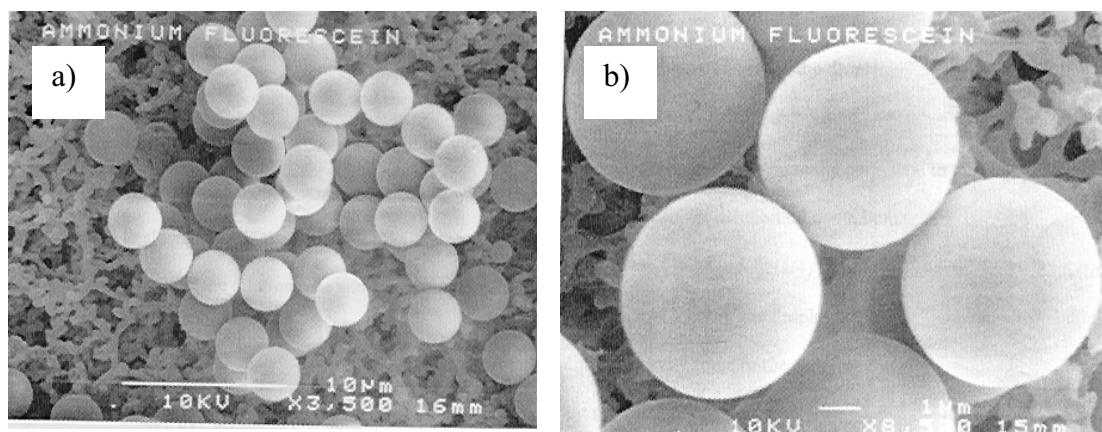
f คือ คลื่นความถี่ที่ใช้ (Hz)

D_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคสังเคราะห์ที่แห้งแล้ว

C คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลาย ammonium fluorescein (TSI, Inc, 1989)

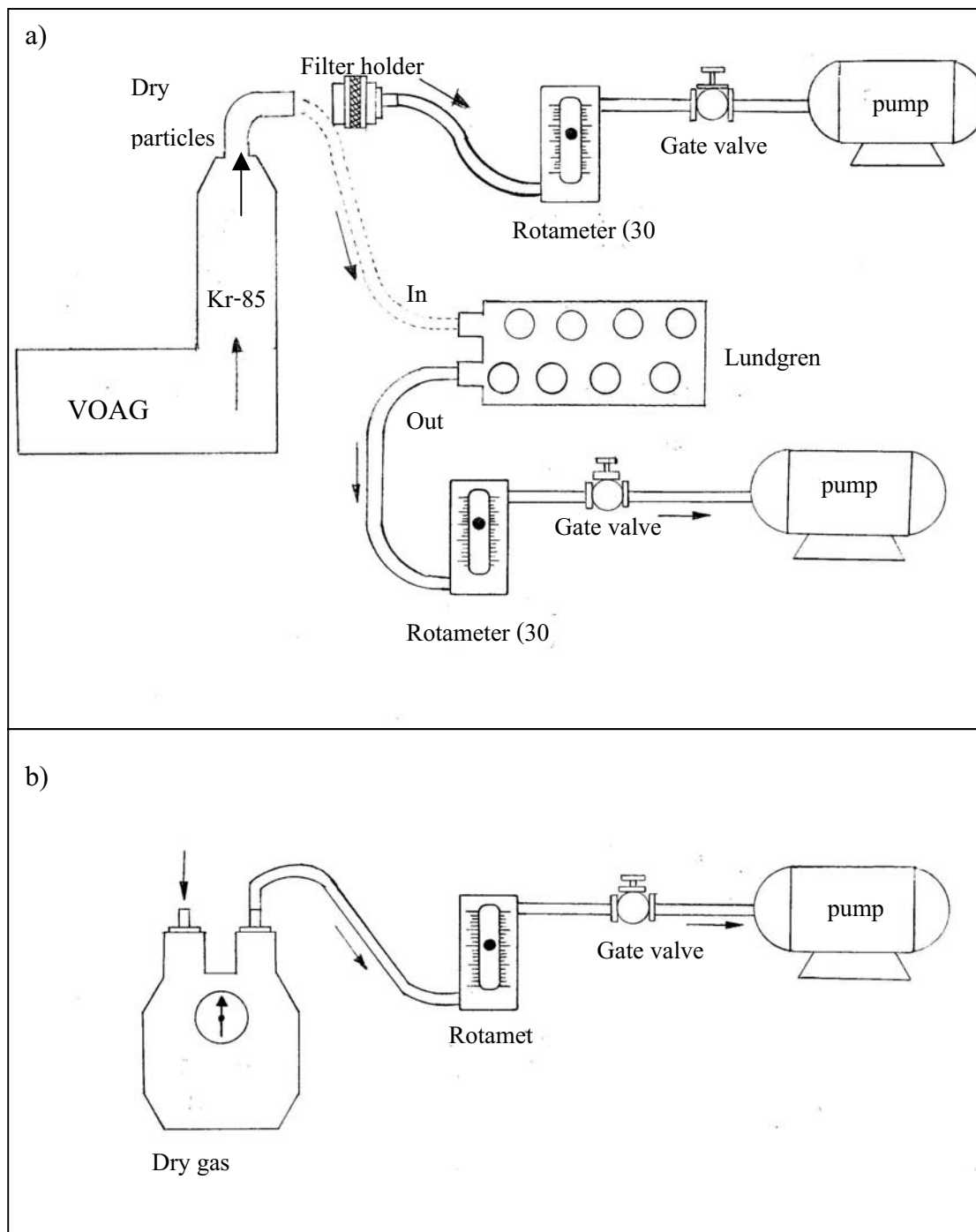


รูปที่ 19 องค์ประกอบของเครื่อง VOAG (Hinds, 1982)



รูปที่ 20 อนุภาค Ammonium fluorescein ที่สังเคราะห์ได้จากเครื่อง VOAG a) อนุภาคขนาด $3.2\ \mu\text{m}$ ขีดเส้นสีขาว=10 μm b) อนุภาคขนาด $4.6\ \mu\text{m}$ ขีดเส้นสีขาว=1 μm (Li, 1999)
(หมายเหตุ อนุภาคในรูปไม่ได้มาจากการสังเคราะห์ในโครงการนี้โดยตรง แต่มาจากการใช้เครื่อง VOAG เครื่องเดียวกันและการปรับแต่งค่าตัวแปรที่เหมือนกันทุกประการกับโครงการนี้)

วิธีนี้ใช้ได้ดีในการสังเคราะห์อนุภาคทรงกลมขนาด $1\text{--}200\ \mu\text{m}$ จากอนุภาคเดี่ยวเริ่มต้นของสารละลายขนาด $20\text{--}400\ \mu\text{m}$ (TSI, Inc., 1989) อนุภาคที่สังเคราะห์ได้จาก VOAG จะถูกส่งผ่านไปยังท่อโลหะที่เคลือบด้วยสารรังสี Kr-85 เพื่อกำจัดประจุไฟฟ้าใดๆที่อาจมีบนอนุภาคนั้นก่อนที่จะผ่านไปยังแผ่นเยื่อกรอง PVC เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน $1\text{--}5\ \mu\text{m}$ (Fisher Scientific) ที่บรรจุอยู่ใน filter holder ชนิด open face ในอัตราเร็ว 30 ลิตร/นาที่ เป็นเวลานาน 5 นาที และผ่านไปยัง Lundgren Impactor ซึ่งแท่งรองรับทรงกระบอกในทุกชั้นถูกหุ้มไว้ด้วยแผ่น aluminum foil ที่เคลือบไว้ด้วย 10% Apiezon grease (โดยน้ำหนัก) (ละลายใน toluene) (Fisher Scientific) ด้วยอัตราเร็ว 30 ลิตร/นาที่ เป็นเวลานาน 5 นาที เช่นเดียวกันทุกประการ (รูปที่ 21) (ทดสอบความเที่ยงตรงของอัตราการดูดอากาศด้วย dry gas meter ตัวเดียวกับที่ใช้ใน leak test) สาร fluorescein บนแผ่นเยื่อกรอง PVC ถูกนำไปตรวจสอบขนาดของอนุภาคที่ได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Nikon, model 71598) ส่วนปริมาณของสาร ammonium fluorescein ที่ได้จากแผ่น aluminum foil ใน Lundgren Impactor แต่ละชั้นนั้นถูกนำไปละลายในสารละลาย NH_4OH ความเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ fluorescein ด้วยเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer (Hitachi, Ltd., model F-2000) โดยสัดส่วน ของปริมาณ fluorescein ซึ่งทราบขนาดอนุภาคที่แน่นอนที่ได้จากแท่งรองรับในแต่ละชั้นต่อ ปริมาณ fluorescein ทั้งหมดที่เข้าเครื่อง impactor ก็คือประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคในแต่ละ ชั้นของเครื่องนั่นเอง



รูปที่ 21 ฟังก์ชันทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือสำหรับฝุ่นขนาด $>10.0-3.0 \mu\text{m}$

a) การสังเคราะห์อนุภาคผ่านไปยังแผ่นเชื้อกรองและ impactor b) การทดสอบความเที่ยงตรงของอัตราการดูดอากาศขนาด 30 ลิตร/นาทีด้วย dry gas meter

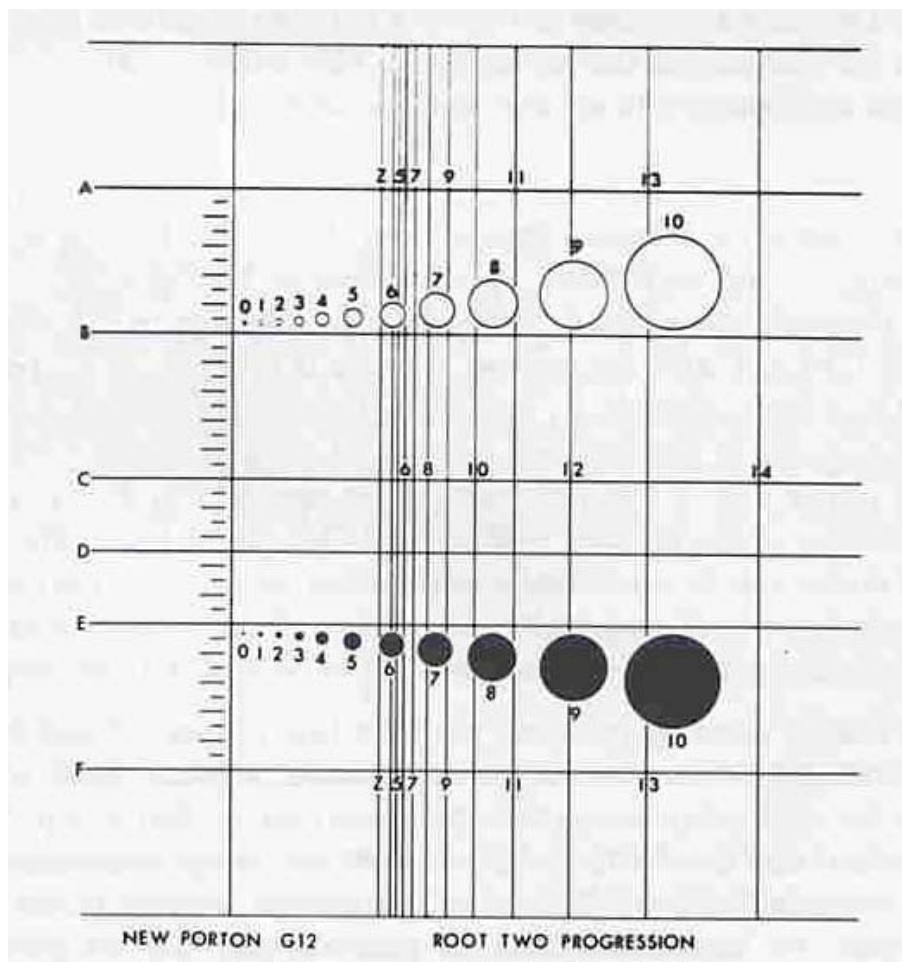
การใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบขนาดของอนุภาค กระทำโดยใช้ eyepiece พิเศษที่มี วงกลมขนาดมาตรฐานหลายๆขนาดพิมพ์ติดอยู่ (Porton eyepiece graticule) (รูปที่ 22) ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมนั้น ทราบด้วยการเทียบขนาดกับมาตราส่วนของไม้บรรทัดที่ติดอยู่บนกระจกสไลด์ที่ละเอียดในระดับไมโครเมตร (รูปที่ 23) ทั้งนี้วงกลมแต่ละวงจะมีขนาดเป็นสองเท่าของวงถัดไป ดังนั้นเพื่อความสะดวกและประหยัดเวลา การเทียบขนาดของวงกลมจึงทำเพียงแค่วงที่ศูนย์ และเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมใดๆ (d_n) คำนวณได้จาก

$$d_n = d_0 \sqrt{2^n} \quad (8)$$

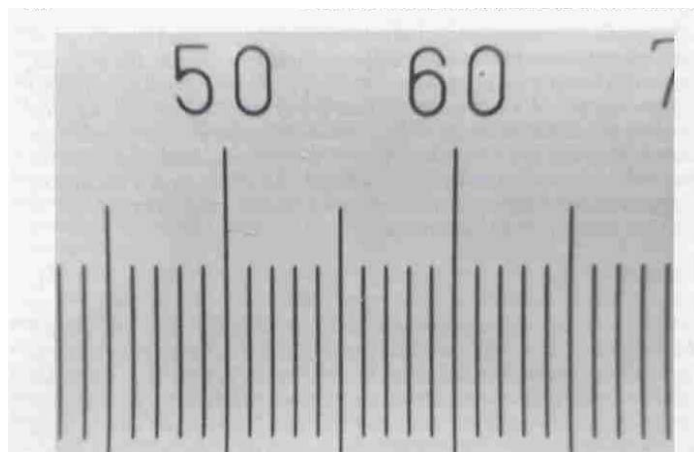
โดย d_0 คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมวงที่ศูนย์

n คือ หมายเลขที่กำกับอยู่ในแต่ละวง

(Hinds, 1982)



รูปที่ 22 Porton eyepiece graticule (Hinds, 1982)



รูปที่ 23 ไม้วัดที่ใช้เทียบมาตราส่วนของขนาดวงกลมจากกล้องจุลทรรศน์ (Hinds, 1982)

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณ fluorescein ด้วยเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer ความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ในช่วง 250-350 nm จาก Xe lamp ขนาด 150 Watt โดย calibration curve เตรียมได้จากสารละลาย ammonium fluorescein ใน NH_4OH 0.1 N ขนาด 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, และ 0.2 mg/L ค่า R^2 ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับค่า absorbance = 0.995 (ภาคผนวก ข) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้เริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปริมาณ fluorescein ในเยื่อกรอง PVC และ aluminum foil เปลา่ๆ เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนหรือความบริสุทธิ์ของวัสดุที่ใช้ ซึ่งความเข้มข้นที่ได้ ถูกนำมาหักออกจากค่าความเข้มข้นจากสารละลายตัวอย่างก่อนที่จะแปลผลในบทที่ 3 โดยวิธีการละลายและวิเคราะห์นั้น กระทำเหมือนการวิเคราะห์สารตัวอย่างทุกประการ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์สารละลายตัวอย่าง ในทุกๆ 10 ตัวอย่างได้ทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือด้วยการนำสารละลายมาตรฐานที่ใช้ใน calibration curve มาวัดค่า absorbance อีกครั้ง และพบว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกิน $\pm 2.5\%$

อนึ่ง ในการวิเคราะห์การสูญเสียฝุ่นให้กับผนังของเครื่องมือ หรือ wall loss นั้น ได้ทำการศึกษาเฉพาะในฝุ่นขนาดใหญ่เท่านั้น เนื่องจากในการทดสอบ Lundgren impactor ตัวดั้งเดิมพบว่าปริมาณการสูญเสียเกิดขึ้นมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ กล่าวคือ การสูญเสียของฝุ่นขนาด 0.8 μm มีเพียง 0.9% ขนาด 1.5 μm มี 2.6% ขนาด 3.0 μm เพิ่มขึ้นเป็น 6.4% ขนาด 5.2 μm มี 18.7% และขนาด 8.4 μm เพิ่มขึ้นเป็น 30.6% ตามลำดับ (Lundgren, 1967) โดยการศึกษาอันกระทำไปพร้อมกับการศึกษาปริมาณฝุ่นที่ถูกเก็บกักบนแผ่นรองรับ aluminum foil ซึ่งหลังจากสิ้นสุด การสังเคราะห์ฝุ่นผ่านเข้าเครื่อง impactor ในแต่ละครั้ง ได้ใช้สาลีสะอาดชุบสารละลาย NH_4OH ความเข้มข้น 0.1 N เช็ดบริเวณผนังด้านในโดยรอบในแต่ละชั้นของ impactor แล้วนำสำลีนั้นมา ละลายในสารละลาย NH_4OH ความเข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หา ปริมาณ fluorescein ด้วยเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer ในลักษณะเดียวกับที่ อธิบายในข้างต้น ซึ่งสัดส่วนของสาร fluorescein จากผนังเครื่องมือของแต่ละชั้นต่อปริมาณ fluorescein ทั้ง

หมดจากทุกชั้นที่ผ่านเข้าเครื่อง impactor ก็คือร้อยละของการสูญเสียอนุภาค ขนาดต่างๆกัน โดยผลการทดสอบได้รายงานไว้ในหัวข้อ 3.1

2.3.2 ฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm

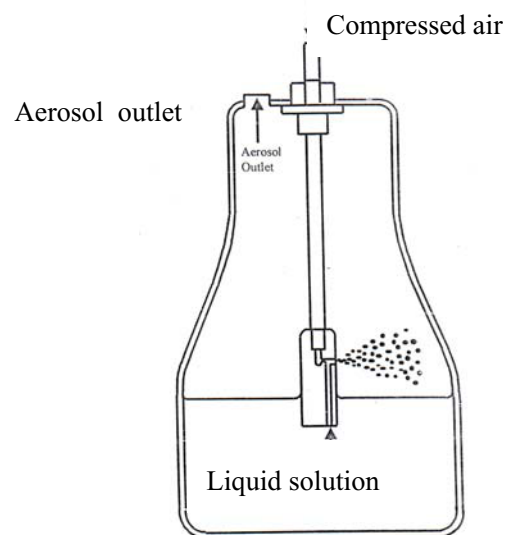
ในฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm ซึ่งตกกระทบในชั้นที่ 3, 4, และ 5 นั้น ตรวจสอบได้โดยใช้เครื่อง Aerosizer®DSP Particle Size Analyzer (model 3220, TSI, Inc.) (รูปที่ 24) ที่มีความสามารถที่จะวิเคราะห์อนุภาคขนาด 0.5-200 μm ได้ (TSI, Inc., 1999) ด้วยหลักการ เร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคและวัดความเร็วในการตกตัว (terminal velocity) ของอนุภาคที่ เคลื่อนที่ผ่านแสงเลเซอร์ ซึ่งการกระจายแสงของอนุภาคนั้นสามารถเปลี่ยนเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และรายงานผลในรูปของขนาดและจำนวนอนุภาคได้ (Baron et al, 1993) โดยฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm นี้สังเคราะห์มาจากอนุภาค polystyrene latex ที่มีขนาดเท่าเทียมกันและมีความหนาแน่น 1.05 กรัม/มิลลิลิตร (Interfacial Dynamics Corp.) จำนวน 3-5 หยดละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยประมาณ บรรจุในเครื่อง collision atomizer (รูปที่ 25) ที่ทำหน้าที่พ่นละอองอนุภาค latex ออกมา ละอองดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังถังสะอาดขนาด 5 ลิตร และพ่นด้วยอากาศแห้งในอัตราส่วนละอองต่ออากาศเท่ากับ 1:5 อนุภาค latex ที่แห้งแล้วจะถูกส่งผ่านไปยัง Lundgren impactor และ aerosizer เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเก็บกักและขนาดของอนุภาคที่เก็บกักได้ต่อไป (รูปที่ 26) ซึ่งในทางปฏิบัติพบว่าวิธีดังกล่าวสามารถสังเคราะห์อนุภาคขนาด 1.0-3.0 μm ได้ดี แต่ไม่สามารถสังเคราะห์อนุภาคที่ใหญ่กว่า 3 μm ได้ เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะตกค้างอยู่ในเครื่อง atomizer และ/หรือท่อสายยางต่างๆจึงไม่สามารถส่งผ่านไปจนถึง impactor และ aerosizer ได้ ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 μm จะพบปัญหาอันเนื่องมาจากเครื่อง aerosizer นั้นมี background peak หรือ ghost peak อยู่ในช่วง $\leq 1 \mu\text{m}$ พอดี ทำให้ไม่สามารถแยกได้ว่า peak ที่ปรากฏนั้นเป็นขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้หรือเป็น background กันแน่

ในการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บกักและขนาดของอนุภาคที่ได้ นั้น กระทำโดยการพ่นอนุภาค latex ออกมาจนถึงสะอาดที่กล่าวถึงในข้างต้นเข้าสู่เครื่อง Aerosizer เพื่อให้ทราบขนาดและจำนวนที่แน่นอนของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ก่อน ซึ่งเครื่องมือจะให้ตัวเลขที่คงที่ภายในเวลาประมาณ 100 วินาที จากนั้นจึงสลับสายมายัง Lundgren impactor โดยพ่นอนุภาคเข้าช่อง nozzle ของชั้นที่ 3 ด้วยอัตราเร็ว 30 ลิตร/นาทีและวัดขนาดและจำนวนอนุภาคที่ออกจากชั้นที่ 3 ด้วยเครื่อง Aerosizer อีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้อนุมานว่าอนุภาคที่ออกจากชั้นที่ 3 ทั้งหมดต้องเข้าสู่ nozzle ของชั้นที่ 4 ดังนั้นจึงจ่อสายยางเข้าที่หลังช่อง nozzle ของชั้นที่ 4 ให้ปลายอีกข้างหนึ่งต่อเข้าเครื่อง Aerosizer (รูปที่ 26b) ผลต่างของจำนวนอนุภาคที่ทราบขนาดที่แน่นอนที่เข้าและออกจากชั้นที่ 3 คือปริมาณของอนุภาคที่ถูกเก็บกักไว้ในชั้นนั้นนั่นเอง วิธีดังกล่าวนี้ ได้กระทำซ้ำจนครบทั้งชั้นที่ 3, 4 และ 5 ทั้งนี้ อัตราการพ่นอนุภาคขนาด 30 ลิตร/นาทีเข้าเครื่อง impactor นั้น ได้ทดสอบความ

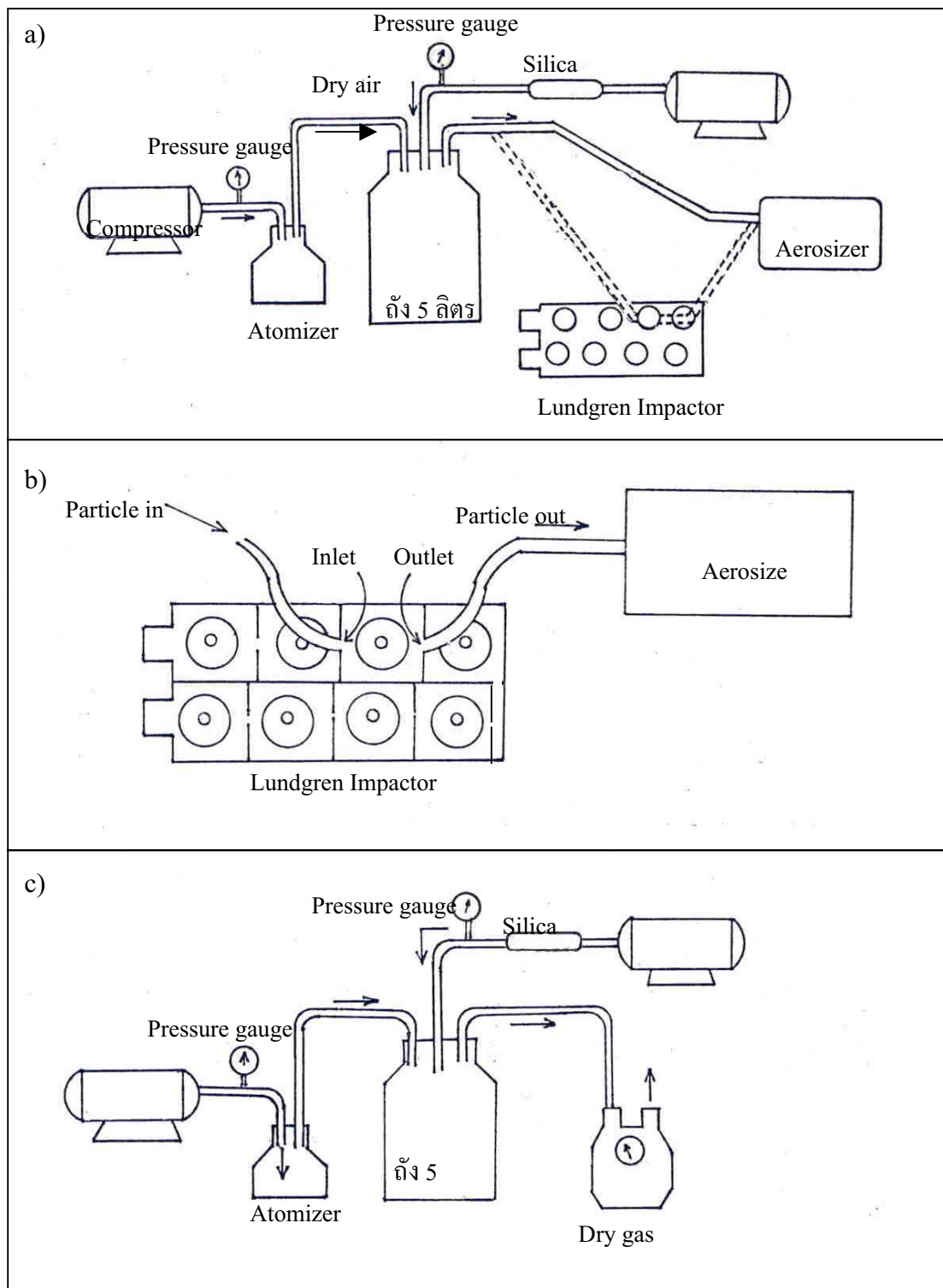
เที่ยงตรงด้วย dry gas meter และปรับระดับความแรงของการพ่นด้วยการปรับเครื่อง compressor ซึ่งมี pressure gauge เป็นตัวบ่งบอกระดับที่ต้องการ (รูปที่ 26c)



รูปที่ 24 เครื่อง Aerosizer®DSP Particle Size Analyzer (TSI, Inc., 1999)



รูปที่ 25 เครื่อง Collision atomizer (Li, 1999)



รูปที่ 26 ผังการทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือสำหรับฝุ่นขนาด $3.0-1.0 \mu\text{m}$

- a) การสังเคราะห์อนุภาคผ่านไปยังเครื่อง aerosizer และ impactor b) ภาพขยายการวัดขนาดและปริมาณอนุภาคของชั้นที่ 3 c) การทดสอบความเที่ยงตรงของการพ่นอากาศออกจากถัง 5 ลิตรในอัตรา 30 ลิตร/นาทีด้วย dry gas meter

2.3.3 ฝุ่นขนาด <1.0 μm

ฝุ่นขนาดเล็กซึ่งตกกระทบในชั้นที่ 6, 7, และ 8 นั้น สักเคราะห์โดยการใช้อนุภาค latex ที่ถูกพ่นออกมาจากเครื่อง collision atomizer และทำให้แห้งเช่นเดียวกับฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm เพียงแต่เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดนั้นคือ Electrostatic Classifier (model 3071A, TSI, Inc.) (รูปที่ 27) ซึ่งทำหน้าที่คัดเลือกขนาดของอนุภาคที่ได้รับจาก atomizer ให้เหลือเพียงขนาดเดียวด้วยการปรับอัตราการเติมประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาค ด้วยหลักที่ว่าอนุภาคขนาดต่างกันจะมีความสามารถในการรับประจุไฟฟ้าได้ต่างกัน ส่งผลให้อัตราการเคลื่อนที่เร็ว-ช้าในสนามไฟฟ้าต่างกัน อนุภาคขนาดเล็กที่มีการเคลื่อนที่เร็วกว่าที่กำหนดจะเคลื่อนเข้าหาแกนรับอนุภาคที่มีประจุตรงกันข้าม และถูกเก็บกักไว้ในเครื่อง คงเหลือแต่อนุภาคที่มีขนาดและความเร็วในการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการเคลื่อนออกไปจากช่องทางออกได้ (รูปที่ 28) ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกเติมประจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคดังสมการที่ 6

$$Z_{pi} = \frac{eC \times 10^7}{3\pi\mu D_p} \quad (6)$$

เมื่อ Z_{pi} คือ การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกเติมประจุไฟฟ้า ($\text{cm}^2/\text{volt}/\text{sec}$)

e คือ 1.6×10^{-19} coulombs

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไหลของ Cunningham (ดูรายละเอียดในสมการที่ 2)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ (poise)

D_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ซม.) (TSI, Inc., 1992)

อนุภาคที่ทราบขนาดแน่นอนแล้วจะถูกส่งผ่านไปยัง Lundgren Impactor ด้วยอัตราเร็ว 30 ลิตร/นาที และ Aerosol Electrometer (model 3068, TSI, Inc.) (รูปที่ 29) ที่ทำงานโดยใช้หลักการวัดประจุไฟฟ้า (I) ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นกรอง (รูปที่ 30) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของอนุภาค (N) แสดงได้ดังสมการที่ 7

$$I = N n_p e q_e \quad (7)$$

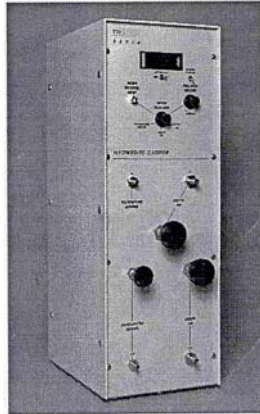
โดยที่ n_p คือ จำนวนประจุที่เติมให้อนุภาค

e คือ 1.6×10^{-19} coulombs

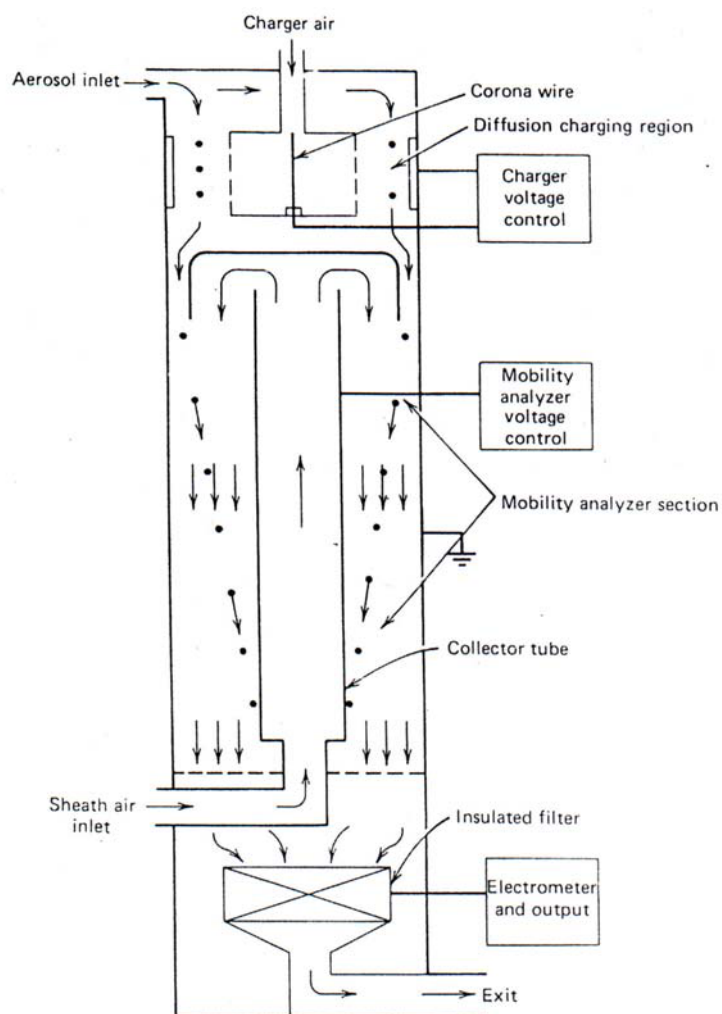
q_e คือ อัตราการไหลของอนุภาคที่ผ่านเข้าเครื่อง Aerosol Electrometer (cm^3/s)

การวัดปริมาณอนุภาคที่เข้าและออกเครื่อง Lundgren Impactor กระทำในลักษณะเดียวกับที่ปฏิบัติในฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm กล่าวคือ อนุภาคสังเคราะห์ latex ที่ทราบขนาดจากเครื่อง Electrostatic Classifier จะผ่านเข้าเครื่อง Aerosol Electrometer ก่อน เพื่อวัดปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น จากนั้นจะสลับสายให้อนุภาคเข้าเครื่อง Lundgren Impactor ในช่องเข้าของชั้นที่ 6

และวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่ออกจากชั้นที่ 6 ด้วยการต่อสายยางไว้ข้างหลังช่องเข้าของชั้นที่ 7 ให้ปลายสายยางอีกข้างหนึ่งต่อเข้าเครื่อง Aerosol Electrometer (รูปที่ 31) ทั้งนี้ การวัดปริมาณอนุภาคที่เข้าและออก เครื่อง impactor ในชั้นที่ 7 และ 8 ได้กระทำในลักษณะเดียวกัน



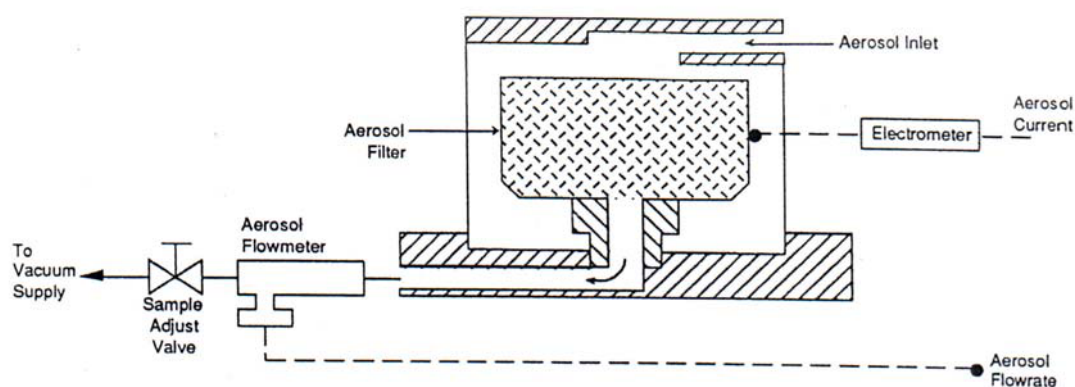
รูปที่ 27 เครื่อง Electrostatic Classifier model 3071A (TSI, Inc., 1992)



รูปที่ 28 องค์ประกอบของเครื่อง Electrostatic Classifier (Hinds, 1982)

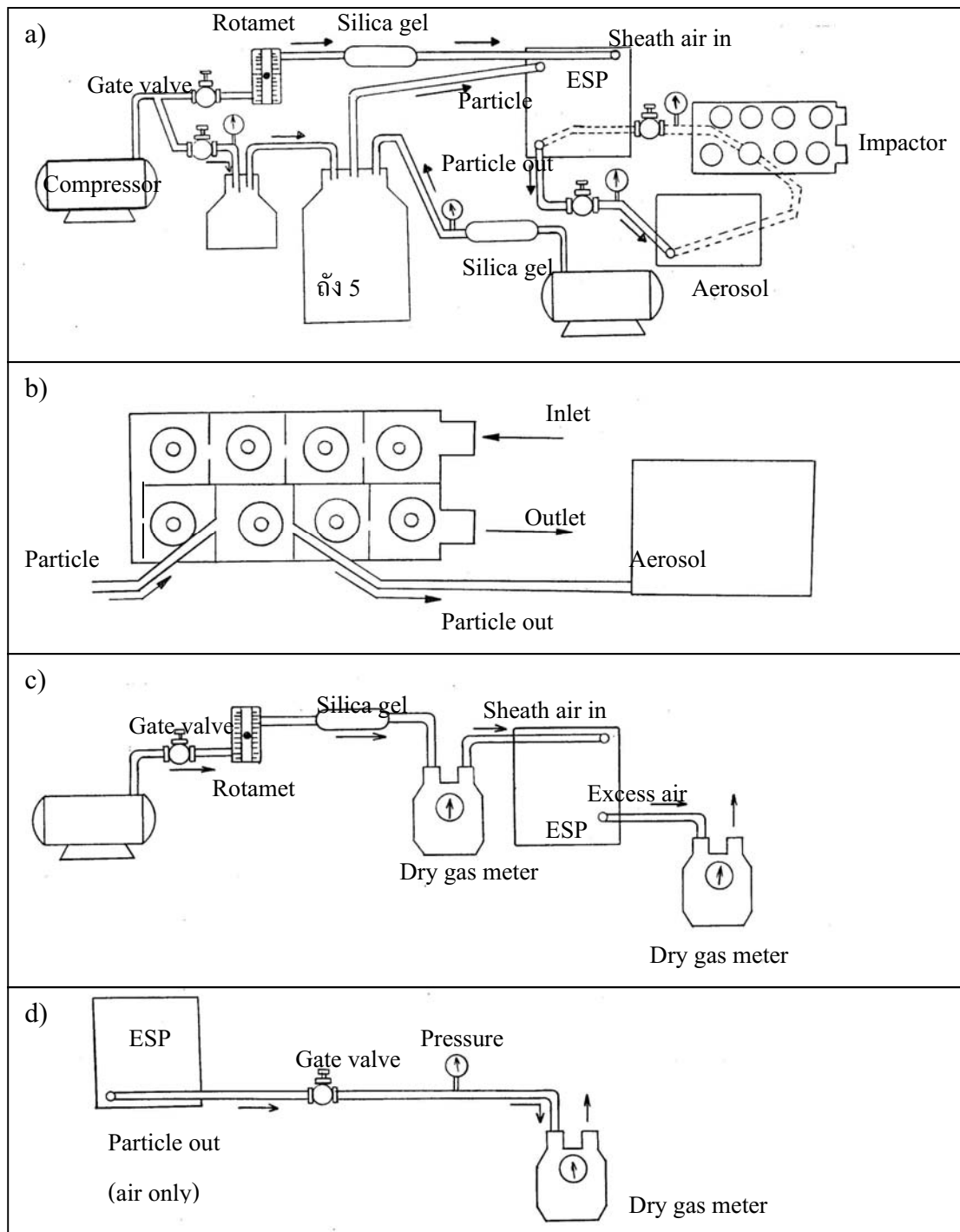


รูปที่ 29 เครื่อง Aerosol Electrometer model 3068 (TSI, Inc., 1990)



รูปที่ 30 องค์ประกอบของเครื่อง Aerosol Electrometer (TSI, Inc., 1990)

อนึ่ง ในการทำงานของเครื่อง Electrostatic Classifier จำเป็นต้องมีการปรับอัตราเร็วของอากาศที่เข้าช่อง sheath air และอากาศที่ออกจากช่อง excess air ให้มีขนาด 20 ลิตร/นาทีตามข้อกำหนดของการใช้เครื่อง ซึ่งในการนี้ ได้ปรับเครื่องมือและทดสอบความเที่ยงตรงของอัตราเร็วดังกล่าวด้วย dry gas meter ดังแสดงในรูปที่ 31 c สำหรับการปรับระดับอัตราเร็วของอนุภาคที่ออกจากเครื่องเพื่อเข้าสู่ impactor นั้น กระทำโดยใช้อากาศอย่างเดียวน โดยอนุมานว่า อนุภาคเคลื่อนที่ออกมาพร้อมกับอากาศด้วยความเร็วเดียวกัน (รูปที่ 31 d)



รูปที่ 31 ผังการทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องมือสำหรับฝุ่นขนาด $<1.0 \mu\text{m}$

- a) การส่งเคราะห์อนุภาคไปยังเครื่อง Electrostatic Classifier (ESP), impactor และ Aerosol Electrometer b) ภาพขยายการวัดปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่เข้าและออกจากชั้นที่ 6 c) การทดสอบความเที่ยงตรงของอากาศที่เข้าช่อง sheath air และอากาศที่ออกจากช่อง excess air ด้วย dry gas meter d) การทดสอบความเที่ยงตรงของอากาศที่ออกจากช่อง particle out ด้วย dry gas meter

บทที่ 3

ผลการทดสอบความเที่ยงตรงในการจำแนกขนาดฝุ่นของ Lundgren Impactor

3.1 ฝุ่นขนาด >10.0-3.0 μm

อนุภาค fluorescein ขนาดต่างๆที่สังเคราะห์ได้จากเครื่อง VOAG และวิเคราะห์หาปริมาณได้จากเครื่อง Fluorescence Spectrophotometer เมื่อนำมาคำนวณเป็นร้อยละของอนุภาคที่ตกกระทบลงบน Lundgren Impactor ในชั้นต่างๆ สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ร้อยละของปริมาณสาร fluorescein ขนาดต่างๆที่พบโดยรวม (จากผนังและแท่งทรงกระบอก) ในแต่ละชั้นของ Lundgren Impactor

ขนาด (μm)	ความเข้มข้นและ orifice size*	stage 1 ($>10 \mu\text{m}$)	stage 2 ($10-5 \mu\text{m}$)	stage 3 ($5-2.5 \mu\text{m}$)	stage 4 ($2.5-1.2 \mu\text{m}$)
3	0.8% 10 μm		2	95	3
3	1% 10 μm		0	92	8
3	2.3% 7.5 μm		0	98	2
เจลลี่			1%	95%	4%
4.2	1% 10 μm		19	81	0
4.2	3% 30 μm		14	77	9
เจลลี่			17%	79%	5%
6	0.8% 10 μm		91	8	
6	1% 10 μm		54	46	
6	1% 15 μm		75	25	
6	2.3% 7.5 μm		97	3	
เจลลี่			79%	21%	
8.5	1% 10 μm	18	73	9	
8.5	2.3% 7.5 μm	0	97	3	
8.5	2.3% 30 μm	0	78	22	
เจลลี่		6%	83%	11%	
10.4	0.8% 10 μm	49%	51%		
12	1% 15 μm	83	12		
12	2.3% 7.5 μm	80	20		
12	3% 15 μm	95	3		
เจลลี่		86%	12%		
14.3	2.3% 30 μm	91	9		
14.3	3% 30 μm	78	17		
เจลลี่		85%	13%		

*ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Ammonium fluorescein และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ orifice ที่ใช้ ที่ความถี่ในการสังเคราะห์อนุภาคต่างๆกัน

ทั้งนี้ เมื่อนำปริมาณสาร fluorescein ในตารางที่ 3 มาแยกเป็นร้อยละที่พบบนแท่งรองรับทรงกระบอก (drum) และร้อยละที่พบบนผนังของเครื่องมือ (wall) ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ร้อยละของสาร fluorescein ที่พบบนแท่งทรงกระบอกและบนผนังของเครื่องมือของอนุภาคนาขนาดต่างๆ

ขนาด (μm)	ความเข้มข้นและ orifice size	stage 1 ($>10 \mu\text{m}$)		stage 2 ($10-5 \mu\text{m}$)		stage 3 ($5-2.5 \mu\text{m}$)		stage 4 ($2.5-1.2 \mu\text{m}$)		Total wall loss
		drum	wall	drum	wall	drum	wall	drum	wall	
3	0.8% $10 \mu\text{m}$			2	0	87.2	7.8	3	0	
3	1% $10 \mu\text{m}$			0	0	86	6	8	0	
3	2.3% $7.5 \mu\text{m}$			0	0	89	9	2	0	
เฉลี่ย				0.7	0.0	87.4	7.6	4.3	0.0	7.6%
4.2	1% $10 \mu\text{m}$			16.9	2.1	69.3	11.7	0	0	
4.2	3% $30 \mu\text{m}$			12.2	1.8	66.7	10.3	9	0	
เฉลี่ย				14.5	2.0	68.0	11.0	4.5	0.0	13%
6	0.8% $10 \mu\text{m}$			77.3	13.7	8	0			
6	1% $10 \mu\text{m}$			28.6	25.4	25.4	20.6			
6	1% $15 \mu\text{m}$			66.6	8.4	25	0			
6	2.3% $7.5 \mu\text{m}$			84.7	12.3	3	0			
เฉลี่ย				64.3	15.0	15.4	5.1			20.1%
8.5	1% $10 \mu\text{m}$	15	3	54.3	18.7	9	0			
8.5	2.3% $7.5 \mu\text{m}$	0	0	67.3	29.7	3	0			
8.5	2.3% $30 \mu\text{m}$	0	0	57.9	20.1	22	0			
เฉลี่ย		5.0	1.0	59.8	22.8	11.3	0.0			23.8%
10.4	0.8% $10 \mu\text{m}$	36.5	12.5	38.3	12.7					25.2%
12	1% $15 \mu\text{m}$	55.7	27.3	7.8	4.2					
12	2.3% $7.5 \mu\text{m}$	53.2	26.8	12.1	7.9					
12	3% $15 \mu\text{m}$	56.5	38.5	2	1					
เฉลี่ย		55.1	30.8	7.3	4.4					35.2%
14.3	2.3% $30 \mu\text{m}$	49.3	41.7	5.9	3.1					
14.3	3% $30 \mu\text{m}$	37.3	40.7	11.2	5.8					
เฉลี่ย		43.3	41.2	8.6	4.5					45.7%

3.2 ฝุ่นขนาด 3.0-1.0 μm

จำนวนอนุภาค polystyrene latex ที่ทราบขนาดและนับปริมาณได้จากเครื่อง Aerosizer ที่ช่องทางเข้า (inlet) และช่องทางออก (outlet) ของ Lundgren Impactor ในชั้นต่างๆ จำนวนเป็นประสิทธิภาพการกักเก็บของแต่ละชั้นในรูปของร้อยละ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาค polystyrene latex ขนาด 2.63 μm ในชั้นต่างๆ

	stage 3 (5-2.5 μm)			stage 4 (2.5-1.2 μm)		
	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%
ครั้งที่ 1	6483	6004		6004	530	
ครั้งที่ 2	6370	4968		4968	595	
ครั้งที่ 3	6080	4902		4902	553	
ครั้งที่ 4	6355	4900		4900	615	
ครั้งที่ 5	6621	4831		4831	579	
เฉลี่ย	6382	5121	19.8	5121	574	88.8

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.92 μm ในชั้นต่างๆ

	stage 3			stage 4			stage 5		
	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%
ครั้งที่ 1	2091	2105		2105	8				
ครั้งที่ 2	2415	2163		2163	4		4	11	
ครั้งที่ 3	2481	2386		2386	18		19	7	
ครั้งที่ 4	2431	2035		2035	19		18	42	
ครั้งที่ 5	2142	2156		2156	86		86	62	
เฉลี่ย	2312	2169	6.2	2169	27	98.8	32	31	3.9

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.73 μm ในชั้นต่างๆ

	stage 3			stage 4			stage 5		
	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%
ครั้งที่ 1	8969	9757		9757	387		387	223	
ครั้งที่ 2	8990	9885		9885	398		398	543	
ครั้งที่ 3	9412	9868		9868	272		272	264	
ครั้งที่ 4	10176	10357		10357	540		540	450	
ครั้งที่ 5	10137	9388		9388	558		558	697	
เฉลี่ย	9537	9851	-3.3	9851	431	95.6	431	435	-1.0

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาค polystyrene latex ขนาด 1.05 μm ในชั้นต่างๆ

	stage 4 (2.5-1.2 μm)			stage 5 (1.2-0.6 μm)			stage 6 (0.6-0.4 μm)			stage 7 (0.4-0.2 μm)		
	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%	inlet	outlet	%
ครั้งที่ 1	32084	19871		19871	4014		4014	2700		2700	2310	
ครั้งที่ 2	31375	18536		18536	4386		4386	2656		2656	2296	
ครั้งที่ 3	31353	20750		20750	4762		4762	2632		2632	2536	
ครั้งที่ 4	32913	19678		19678	4833		4833	3389		3389	2729	
ครั้งที่ 5	32863	20959		20959	5291		5291	3002		3002	2749	
เฉลี่ย	32118	19959	37.9	19959	4657	76.7	4657	2876	38.3	2876	2524	12.2

3.3 ฝุ่นขนาด <1.0 μm

อนุภาค polystyrene latex ที่ทราบขนาดจากเครื่อง Electrostatic Classifier และนับปริมาณความเข้มข้น (จำนวนอนุภาคต่อลบ.ซม.ของอากาศ) ด้วยเครื่อง Aerosol Electrometer ในชั้นต่างๆ ของ Lundgren Impactor สามารถคำนวณเป็นประสิทธิภาพการกักเก็บของแต่ละชั้นในรูปของร้อยละ แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคขนาดเล็ก ในแต่ละชั้นของ Lundgren Impactor

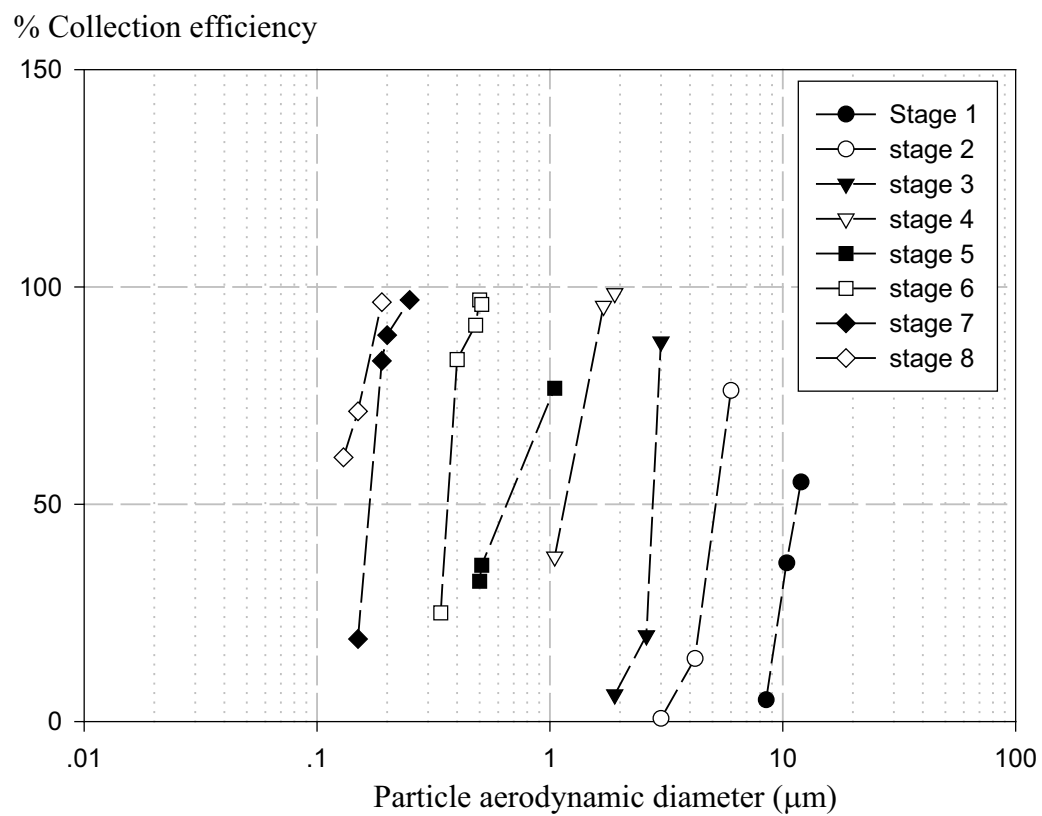
ขนาด (μm)	stage 5 (1.2-0.6 μm)	stage 6 (0.6-0.4 μm)	stage 7 (0.4-0.2 μm)	stage 8 (0.2-0.1 μm)
0.13				60.8%
0.15			19.0%	71.4%
0.19			83.0%	96.5%
0.20			88.9%	
0.25			97.0%	
0.34		25.0%		
0.40		83.3%		
0.48		91.2%		
0.50	32.3%	97.0%		
0.51	36.0%	96.0%		

3.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บฝุ่นโดยรวมของ Lundgren Impactor

ข้อมูลทั้งหมดเมื่อนำมาเสนอถึงประสิทธิภาพการกักเก็บฝุ่นในรูปของร้อยละ จำแนกตามขนาดของฝุ่น สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 10 และแสดงในรูปของแผนภูมิภาพ ดังรูปที่ 31 ดังนี้

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการกักเก็บฝุ่นโดยรวมของ Lundgren Impactor

ขนาด(μm)	stage 1 (>10)	stage 2 (10-5)	stage 3 (5-2.5)	stage 4 (2.5-1.2)	stage 5 (1.2-0.6)	stage 6 (0.6-0.4)	stage 7 (0.4-0.2)	stage 8 (0.2-0.1)
0.13								60.8%
0.15							19.0%	71.4%
0.19							83.0%	96.5%
0.20							88.9%	
0.25							97.0%	
0.34						25.0%		
0.40						83.3%		
0.48						91.2%		
0.50					32.3%	97.0%		
0.51					36.0%	96.0%		
1.05				37.9%	76.7%			
1.7				95.6%				
1.9			6.2%	98.5%				
2.6			19.8%					
3.0		0.7%	87.4%					
4.2		14.5%						
6.0		76.2%						
8.5	5.0%							
10.4	36.5%							
12.0	55.1%							
14.3	43.3%							



รูปที่ 31 ประสิทธิภาพการเก็บกักฝุ่นของ Lundgren Impactor