

เทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต

A NEW TECHNIQUE FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF
CYCLONIC DUST TRAP USING ELECTROSTATIC FIELD

พงษ์สวัสดิ์ กชภูมิ

PONGSAWAT KOTCHAPOOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2450-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต

A NEW TECHNIQUE FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF
CYCLONIC DUST TRAP USING ELECTROSTATIC FIELD

พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ

PONGSAWAT KOTCHAPOOM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61620
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2450-1

**A NEW TECHNIQUE FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF
CYCLONIC DUST TRAP USING ELECTROSTATIC FIELD**

PONGSAWAT KOTCHAPOOM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2450-1

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวคักฝุ่นแบบไซโคลน โดยใช้ไฟฟ้าสถิต
นักศึกษา	นายพงษ์สวัสดิ์ กชภูมิ
รหัสประจำตัว	45060123
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการคักฝุ่นแบบไซโคลน โดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้า และหลักการไฟฟ้าสถิตมาใช้ในการออกแบบ โดยวิธีการเดิมประจุสถิตให้อนุภาคฝุ่นที่เคลื่อนผ่านไซโคลนสนามไฟฟ้า และเพิ่มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยแรงของสนามไฟฟ้า ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงให้กับแท่งอิเล็กโตรดที่อยู่กึ่งกลางไซโคลนและใช้ผนังของไซโคลนเป็นอิเล็กโตรดกราวด์ ซึ่งตามปกติแรงสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำ ฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งไซโคลนสนามไฟฟ้าไม่สามารถคักได้จะถูกทำให้เคลื่อนผ่านเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตเพื่อคักอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก งานวิจัยนี้แนะนำให้เสนอทำการทดสอบคักจับฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ที่ระดับความหนาแน่นเชิงปริมาตรของฝุ่นต่างๆกัน การวิเคราะห์ผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการคักฝุ่นของตัวไซโคลนแบบเดิมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ระดับ 99 เปอร์เซ็นต์ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการคักฝุ่นต่ำ มีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก บำรุงรักษาง่าย ใช้วัสดุในประเทศโดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ

Thesis Title	A New Technique for Efficiency Improvement of Cyclonic Dust Trap Using Electrostatic Field.
Student	Mr. Pongsawat Kotchapoom
Student ID.	45060123
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This research presents a new technique for efficiency improvement of cyclonic dust trap using electric field technique and electrostatic method to design. The principle is to add static charges to dust particle that move through electric field cyclone and enhance centrifugal force by the electric field that apply DC high voltage to electrode which locate in the center of cyclone and cyclone wall is used to be ground electrode. That will make electric field force have a direction from a high potential to a low potential. The very small dust particle which cyclone can not trap will move to electrostatic precipitator to trap them. This research shows trapping the dust test that dust have a size less than 75 μm at different dust density by volume. The results are analyzed and revealed that this technique improve efficiency of original cyclonic dust trap up to efficiency at 99% , low power consumption , no complicated construction , easy maintenance and using material in the country that have low assets.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิคด้านสนามไฟฟ้าจาก รองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสามชุก ซึ่งเป็นผู้จุดประกายความคิดการประยุกต์ใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าในการเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่น อีกทั้งช่วยเหลือให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหา ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้ทำวิจัยเข้าใจในปัญหานั้น งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี และคุณศิริโชค ปรีดโตทกพร ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกี่ยวกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ๆที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนวคิดในการทำวิจัย ตลอดจนน้องๆ ที่ช่วยในการทำงานวิจัยนี้ และเพื่อนๆที่เป็นกำลังใจและแรงกระตุ้นผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์และความสะดวกในการใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อพูลสวัสดิ์ คุณแม่วันเพ็ญ กชภูมิ คุณป้าวิรมล วิจารณ์ ซึ่งท่านเป็นผู้สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยจนประสบความสำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พงษ์สวัสดิ์ กชภูมิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและมลภาวะอากาศ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า.....	5
2.3 คุณสมบัติของสนามไฟฟ้า.....	11
2.4 ทฤษฎีมลภาวะอากาศ.....	16
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการดักฝุ่นด้วยหลักการไฟฟ้าสถิต.....	20
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานการดักฝุ่นด้วยไซโคลลอน.....	26
บทที่ 3 การออกแบบชุดไซโคลลอนดักฝุ่น โดยใช้สนามไฟฟ้า.....	34
3.1 บทนำ.....	34
3.2 พิกัดอัตราความหนาแน่นของฝุ่นละอองในอุตสาหกรรมโรงสีข้าว.....	35
3.3 การออกแบบไซโคลลอนดักฝุ่น.....	35
3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น.....	43
3.5 การออกแบบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น.....	44

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การออกแบบไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า.....	57
3.7 การออกแบบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซาบ	68
บทที่ 4 เครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้า.....	86
4.1 บทนำ.....	86
4.2 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้า.....	87
4.3 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	90
4.4 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลน เมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น.....	93
4.5 การทดสอบชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า.....	96
4.6 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	100
4.7 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	104
4.8 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าร่วมกับไซโคลนดักฝุ่น และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	108
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	112
5.1 บทนำ.....	112
5.2 โครงสร้างของระบบดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต.....	113
5.3 การพิจารณาขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดทดสอบ.....	114
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	117
เอกสารอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	122
ก. การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น.....	123
ข. วิธีการวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นด้วย Personal Air Pump	127
ค. ตารางคุณสมบัติวัสดุ.....	132

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ง. ตารางผลการทดสอบ.....	134
จ. การ Simulation ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้า.....	188
ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	192
ประวัติผู้เขียน.....	198

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่	
2.1 สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลน.....	31
3.1 ความหนาแน่นของฝุ่นละอองของโรงสีข้าว.....	35
3.2 การคำนวณแรงหนีศูนย์กลางและแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก.....	38
3.3 คุณสมบัติของอนุภาคฝุ่น.....	43
3.4 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน (อิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม).....	48
3.5 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน (อิเล็กทรอนิกส์ระบายกับเส้นลวด).....	51
3.6 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนของชุดอิเล็กทรอนิกส์ สร้างสนามไฟฟ้าแบบแท่งโคโรนา.....	59
3.7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนของชุดอิเล็กทรอนิกส์ สร้างสนามไฟฟ้าแบบแกนกลางไซโคลน.....	61
3.8 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนในย่านอัดประจุ.....	88
3.9 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนในย่านดักฝุ่น.....	89
5.1 เปรียบเทียบขีดความสามารถในการดักฝุ่นในแต่ละส่วนของระบบรวม.....	114
ก.1 คุณสมบัติของวัสดุ.....	133
ง.1 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ ความเร็วลม 13 m/s.....	135
ง.2 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ ความเร็วลม 15 m/s.....	136
ง.3 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ ความเร็วลม 17 m/s.....	137
ง.4 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ ความเร็วลม 13 m/s.....	138
ง.5 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ ความเร็วลม 15 m/s.....	139
ง.6 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ ความเร็วลม 17 m/s.....	140
ง.7 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดันทดสอบ +8 kV.....	141
ง.8 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ระบายกับเส้นลวด อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดันทดสอบ +8 kV.....	142

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

ง.9 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ แรงดันทดสอบ +8 kV.....	143
ง.10 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดันทดสอบ +7 kV	144
ง.11 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ แรงดันทดสอบ +7 kV.....	145
ง.12 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดันทดสอบ -8 kV.....	146
ง.13 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันรวม อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ แรงดันทดสอบ -8 kV.....	147
ง.14 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบกับเส้นลวด อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ แรงดันทดสอบ +8 kV.....	148
ง.15 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แกนกลาง +30 kV.....	149
ง.16 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV.....	150
ง.17 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV.....	151
ง.18 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แกนกลาง +30 kV.....	152
ง.19 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV.....	153
ง.20 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV.....	154
ง.21 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ จ่ายแรงดันที่โคโรนา -25 kV.....	155

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

จ.22 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นอัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³ จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -25 kV.....	156
จ.23 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	157
จ.24 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	158
จ.25 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	159
จ.26 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	160
จ.27 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	161
จ.28 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	162
จ.29 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	163
จ.30 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	164
จ.31 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอเล็กโตรครอนาบบจนวนชั้นเดียว ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m ³ แรงดัน +4 kV.....	165
จ.32 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอเล็กโตรครอนาบบจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m ³ แรงดัน +4 kV.....	166
จ.33 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอเล็กโตรครอนาบบจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m ³ แรงดัน-2 kV.....	167
จ.34 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอเล็กโตรครอนาบบจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m ³ แรงดัน-4 kV.....	168

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

จ.48 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -2 kV.....	182
จ.49 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -4 kV.....	183
จ.50 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -6 kV.....	184
จ.51 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -2 kV.....	185
จ.52 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -4 kV.....	186
จ.53 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตชัน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³ แรงดัน -6 kV.....	187

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่	
1.1	บล็อกโครงสร้างการทำงานของระบบ.....2
2.1	อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....6
2.2	เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ.....8
2.3	ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....9
2.4	เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย Uniform field ฉนวนซ้อนกัน ที่ V และ d คงที่โดยเปลี่ยนค่า d_1 และ $d_2 = d - d_1$ ฉนวนที่ $\epsilon_2/\epsilon_1 = 4$10
2.5	แสดงการเกิดประจุอิมิตัว (q_s).....22
2.6	องค์ประกอบของความเร็วของอนุภาคที่มีประจุในการไหลแบบชั้นๆของก๊าซ.....25
2.7	ลักษณะทั่วไปของวอร์เท็กซ์และการไหลย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow) ภายในไซโคลน27
2.8	สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส (ญี่ปุ่น)27
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัดของอนุภาค D_{pc} กับเส้นผ่านศูนย์กลาง D ของไซโคลนมาตรฐาน (ญี่ปุ่น)28
2.10	ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน.....29
2.11	ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนเดี่ยว.....30
2.12	สัดส่วนต่างๆของไซโคลน.....31
2.13	ทิศทางการไหลของกระแสลมที่ outlet length (Sc) และทิศทางของอนุภาคฝุ่น.....32
2.14	ทิศทางของการไหลของกระแสลม และแรงหนีศูนย์กลางของไซโคลน.....32
3.1	ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของระบบ.....34
3.2	โครงสร้างและสัดส่วนของไซโคลน.....37
3.3	ไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบ.....37
3.4	ชุดปล่อยฝุ่น.....40
3.5	วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลน.....40
3.6	ผลการทดสอบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนที่ความหนาแน่นฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$42
3.7	ผลการทดสอบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนที่ความหนาแน่นฝุ่น $40-100 \text{ g/m}^3$42
3.8	การทดสอบโดยใช้เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a).....43
3.9	ไดอะแกรมการทำงานของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น.....44
3.10	โครงสร้างชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม.....45

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.11 เวลาในการอัดประจุที่ทำให้ประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ(q)มีค่าเข้าใกล้ค่าประจุอิ่มตัว(q_s) ...	47
3.12 ชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม.....	47
3.13 โครงสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบกับเส้นลวด.....	59
3.14 ชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบกับเส้นลวด.....	50
3.15 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นด้วยชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น.....	53
3.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	53
3.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100g/m ³	54
3.18 เปรียบเทียบชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	55
3.19 เปรียบเทียบชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	56
3.20 ไดอะแกรมการทำงานของไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า.....	57
3.21 ชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าแบบแท่งโคโรนา.....	58
3.22 ชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าแบบแกนกลางไซโคลน.....	60
3.23 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบสร้างสนามไฟฟ้า ในไซโคลนแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบ.....	62
3.24 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบสร้างสนามไฟฟ้า ในไซโคลนแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบแกนกลางไซโคลน.....	63
3.25 การทดสอบประสิทธิภาพการดักด้วยฝุ่นไซโคลนสนามไฟฟ้า.....	64
3.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบต่างๆ ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	64
3.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบต่างๆ ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	65
3.28 ประสิทธิภาพของชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า กับชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	66
3.29 ประสิทธิภาพของชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า กับชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	67
3.38 ไดอะแกรมการทำงานของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบ.....	68
3.39 ระยะห่างระหว่างลวดโคโรนาและอิเล็กทรอนิกส์โทรคระนาบในย่านอัดประจุ.....	69

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่	
3.40	ฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....70
3.41	ความหนาของฉนวนในแต่ละชั้นที่ใช้ในย่านดักฝุ่น.....70
3.42	ขนาดของอิเล็กโทรดเพลทที่ใช้ทั้งสองขนาด.....72
3.43	ลักษณะของอิเล็กโทรดเพลทเคลือบฉนวนอีพ็อกซีที่ใช้ในการทดสอบ.....73
3.44	การวางแผ่นเพลทกับเส้นลวดโคโรนา.....73
3.45	ระยะห่างในการติดตั้งอิเล็กโทรดเพลท.....74
3.46	ระยะห่างในการติดตั้งลวดโคโรนา.....74
3.47	จำนวนอิเล็กโทรดเพลทและจำนวนลวดโคโรนา.....75
3.48	ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวน 2 ชั้น.....75
3.49	วงจรการทดสอบแรงดันเบรกควาน์ในย่านอัดประจุ.....76
3.50	วงจรการทดสอบแรงดันเบรกควาน์ในย่านดักฝุ่น.....77
3.51	สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในฉนวนชั้นเดียว.....78
3.52	ลักษณะของอิเล็กโทรดเพลทแบบฉนวนชั้นเดียวที่ใช้ในการทดสอบ.....78
3.53	ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวนชั้นเดียว.....79
3.54	วงจรการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ.....80
3.55	ชุดทดสอบที่ปรับระยะเก็บ 3 cm.....81
3.56	Personal Air Pump.....82
3.57	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองแบบ.....82
3.58	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ ฉนวนสองชั้นที่แรงดันขั้วบวกและแรงดันขั้วลบ.....84
4.1	ระบบดักฝุ่นทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานร่วมกัน.....86
4.2	วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลน.....87
4.3	ผลการทดสอบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนที่ความเร็วลมระดับต่างๆ.....88
4.4	วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น.....89
4.5	การทดสอบประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น.....89
4.6	ผลการทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ.....90

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.7 ผลการทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	91
4.8 ผลการทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	92
4.9 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน.....	93
4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน.....	94
4.11 ผลการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ.....	95
4.12 ผลการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	96
4.13 ผลการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	97
4.14 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	97
4.15 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	99
4.16 ผลการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้าด้วยไฟฟ้าสถิต ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ.....	99
4.17 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจรร่วมกับ ชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า.....	101
4.18 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจรร่วมกับชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า.....	101
4.19 ผลการทดสอบการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจุให้ออนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	103
4.20 ผลการทดสอบการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจุให้ออนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	103
4.21 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับ ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	105
4.22 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับ ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	106
4.23 ผลการทดสอบชุดดักฝุ่นไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ด้วยไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ.....	107
4.24 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าร่วมกับไซโคลน และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	108
4.25 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โครงสร้างสนามไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m ³	110

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.26 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กโทรดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m ³	110
5.1 ระบบดักฝุ่นทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานร่วมกัน.....	112
5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของระบบเมื่อแต่ละส่วนทำงานร่วมกัน.....	115
6.1 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	117
6.2 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต.....	118
ก.1 เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a).....	125
ก.2 ชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกในการทดสอบ.....	125
ก.3 ชุดอุปกรณ์ในการทดสอบ.....	126
ข.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล.....	128
ข.2 แผ่นกรองที่ใช้ในการทดสอบ.....	129
ข.3 แผ่น Support Pad สำหรับรองแผ่นกรองที่ใช้ในการทดสอบ.....	129
ข.4 ชั่งน้ำหนัก Cassette เป่าก่อนจะนำไปทดสอบ.....	129
ข.5 เครื่อง Universal Sample Pump อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน.....	130
ข.6 เครื่องมือสำหรับปรับอัตราการไหลของ Universal Sample Pump.....	130
ข.7 การปรับอัตราการไหลของ Universal Sample Pump.....	131
ข.8 การวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ.....	131
ข.9 เปรียบเทียบ Cassette ที่ผ่านการใช้งานแล้ว.....	131
จ.1 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น.....	177
จ.2 การกระจายของ Electric potential ในอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น.....	178
จ.3 การกระจายของ Electric Field ในอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น.....	178

บทที่ 1

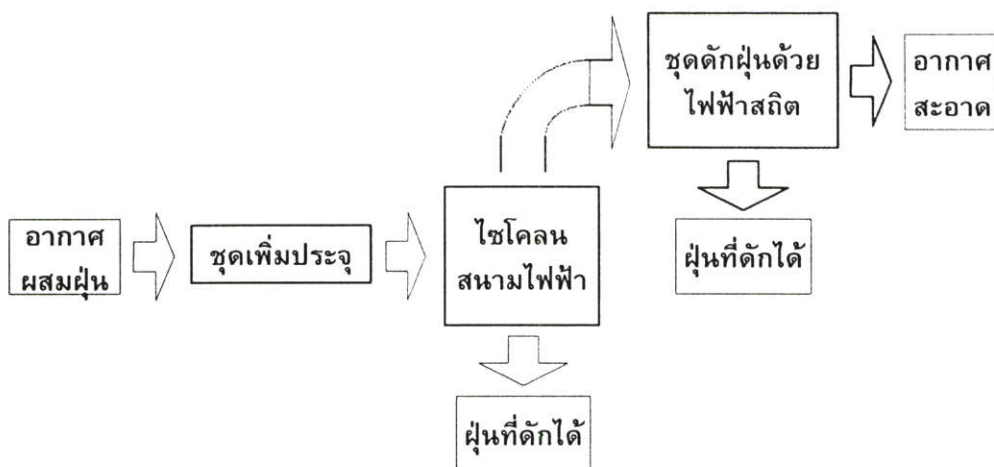
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมโรงสีข้าวได้มีการพัฒนาและเติบโตอย่างรวดเร็ว มีการใช้เครื่องจักรกลในกระบวนการขัดสี และจากกระบวนการสีข้าวทำให้เกิดฝุ่นละอองฟุ้งกระจายจำนวนมาก[14] การดักจับอนุภาคฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการสีข้าวเป็นการลดมลภาวะอากาศ ซึ่งอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโดยทั่วไปมีระบบดักจับฝุ่นละอองที่ไม่ดีพอและมีการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็กจำนวนมาก ปัจจุบันการดักจับอนุภาคฝุ่นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการใช้พลังงาน, เสียง และราคา[4],[5],[6] เนื่องจากฝุ่นละอองที่ต้องการกำจัดนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ จึงเป็นฝุ่นละอองที่ไม่มีมูลค่าและเป็นปัญหาด้านมลภาวะและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เครื่องดักจับอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง[12] เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร มีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยาก บำรุงรักษาง่าย ต้นทุนในการสร้างต่ำ ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงได้ สามารถทำงานร่วมกับการดักจับอนุภาคฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตได้[5] โดยสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดโคโรนาที่อยู่แกนกลางของไซโคลอนกับผนังของไซโคลอน เพื่อสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงระบบบำบัดอนุภาคฝุ่นแบบเดิมหรือสร้างระบบบำบัดอนุภาคฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการดักฝุ่น

1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบดักฝุ่นสำหรับโรงสีข้าวส่วนใหญ่ยังใช้อุปกรณ์ดักฝุ่นที่เรียกว่าไซโคลอน เนื่องจากมีราคาถูก ติดตั้งง่าย ทนอุณหภูมิสูง และความดันสูง อาศัยการทำงานด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลอนอยู่ในระดับเป็นที่น่าพอใจ บางงานวิจัยออกแบบไซโคลอนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์[8]หรืออาจใช้ไซโคลอนหลายตัวมาอนุกรมหรือขนานกัน หรือการออกแบบไซโคลอนให้มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางต่างกันเพื่อใช้ในการแยกขนาดวัสดุ จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการ แต่ยังไม่มียานวิจัยที่ประยุกต์ทฤษฎีสถานมไฟฟ้า โดยอาศัยแรงของสนามไฟฟ้ามาทำหน้าที่เสริมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และระบบดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต(Electrostatic Precipitator) มียานวิจัยที่ใช้อิเล็กโทรดเป็นลักษณะต่างๆ[7] ทั้งแบบแห้งและแบบเปียกที่ใช้น้ำร่วมในการจับละอองฝุ่นด้วย และยังไม่มียานวิจัยที่ใช้เทคนิคฉนวน 2 ชั้นเพื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 บล็อกโครงสร้างการทำงานของระบบ

โดยมีระเบียบวิธีการวิจัย ดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีมลภาวะอากาศและการดักฝุ่น
- ศึกษาทฤษฎีสนามไฟฟ้า
- ออกแบบและสร้างชุดจำลองไซโคลนดักฝุ่น
- ออกแบบและสร้างชุดปล่อยฝุ่นเพื่อควบคุมความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาณอากาศ
- ออกแบบและสร้างชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อุณหภูมิฝุ่น
- ออกแบบและสร้างไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า
- ออกแบบและสร้างชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
- เตรียมฝุ่นทดสอบ ร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200
- ทำการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่นต่ำและความหนาแน่นฝุ่นสูง
- วิเคราะห์ผลการทดสอบ
- สรุปเลือกระบบดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับลักษณะงาน
- ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต
- นำข้อมูลทั้งหมดมาจัดทำวิทยานิพนธ์

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายหลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การออกแบบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อุณหภูมิฝุ่นเพื่อทำงานร่วมกับไซโคลนโดยออกแบบระบบไซโคลนดักฝุ่นที่ประยุกต์ร่วมกับทฤษฎีสนามไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลน ซึ่งไซโคลนทำงานร่วมกับระบบดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ที่มีการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าด้วยเทคนิคของการฉนวน [1] เพื่อดัก

ฝุ่นที่เล็ดลอดจากไซโคลน และเปรียบเทียบขีดความสามารถการดักฝุ่นของแต่ละส่วนกับการทำงานร่วมกันเพื่อเลือกระบบดักฝุ่นที่มีขีดความสามารถสูงสำหรับลดมลภาวะทางอากาศ มีราคาที่ไม่สูงมากนัก โดยใช้วัสดุที่มีในประเทศเพื่อความสะดวกในการซ่อมบำรุงและติดตั้ง

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบและทดสอบการเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนด้วยชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นเพื่อทำให้อนุภาคฝุ่นมีประจุสถิตและประจุสถิตนี้จะถูกแรงดูดหรือผลักให้เคลื่อนที่เข้าหาผนังไซโคลนซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าต่างชนิดกัน การออกแบบและทดสอบการเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนที่สร้างสนามไฟฟ้าเพื่อเสริมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยแรงของสนามไฟฟ้า และทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของระบบดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ด้วยการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคของการฉนวน [10], [11] และการทดสอบระบบดักฝุ่นร่วมกันของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า ชุดไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อหาระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและการลงทุนต่ำ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ การออกแบบและสร้างชุดจำลองการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบดักฝุ่นที่มีขนาดใหญ่สำหรับโรงสีข้าว โดยฝุ่นที่ใช้ทดสอบเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ ซึ่งจากการเก็บตัวอย่างฝุ่นพบว่าฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ จะถูกปล่อยออกจากปล่องระบายอากาศของโรงสีเป็นส่วนใหญ่ และความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรในอากาศที่ทดสอบอยู่ในช่วง $4\text{-}10 \text{ g/m}^3$ และ $40\text{-}100 \text{ g/m}^3$ ใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง 0-50 kV ในการทดสอบ โดยขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุดอยู่ที่ระดับ 99 %

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อมูลต่างๆเพียงพอ สำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบระบบดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูง จึงได้แบ่งโครงงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์สมมติฐานที่ใช้ขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยสนามไฟฟ้า [2],[3] การให้ประจุโดยสนามไฟฟ้า การดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต หลักการทำงานของไซโคลน โครงสร้างของไซโคลนลักษณะต่างๆ และมลภาวะอากาศ ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อร่างกาย[14]

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ 2 ลักษณะ ทดสอบเปรียบเทียบกันกรณีจ่ายแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนที่สองเป็นการออกแบบไซโคลน[13] และการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างสนามไฟฟ้าภายในไซโคลน[15]ที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ 2 ลักษณะ ทดสอบเปรียบเทียบกันกรณีจ่ายแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ และส่วนที่สามจะเป็นการออกแบบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์[6]ที่ใช้สนามไฟฟ้าแบบฉนวนชั้นเดียวที่เป็นอากาศกับฉนวนสองชั้น[9]ที่เป็นอากาศและของแข็ง ทดสอบเปรียบเทียบกันกรณีจ่ายแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ เพื่อเลือกเงื่อนไขและลักษณะอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุดในแต่ละชุดทดสอบ

บทที่ 4 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดทดสอบทั้ง 3 ส่วนคือ ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น ชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยทดสอบหาองค์ประกอบและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลน เช่น ความหนาของฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ, อัตราการไหลของอากาศ, ระดับแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและมลภาวะอากาศ

2.1 บทนำ

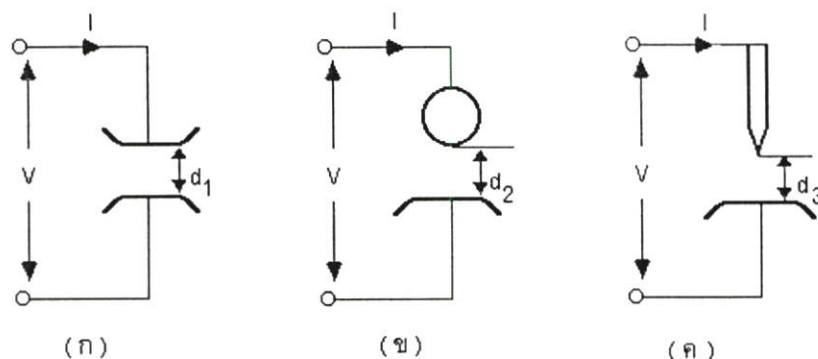
เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าในการดักฝุ่นเพื่อลดมลภาวะอากาศ ซึ่งในการออกแบบชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าและโครงสร้างของชุดทดสอบการดักฝุ่นโดยใช้ไฟฟ้าสถิต รวมถึงการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น ในบทนี้จึงเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีที่ใช้ในการอ้างอิงของโครงการวิจัยนี้โดยละเอียด เพื่อให้เข้าใจในวิทยานิพนธ์ได้สะดวก จึงได้แบ่งหัวข้อทฤษฎีออกตามลำดับของการอ้างอิงตั้งแต่ลักษณะของสนามไฟฟ้า รูปร่างของอิเล็กโทรด ขบวนการไอออไนเซชัน (ionization) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ (electron emission from metallic surface) กลไกการเบรกดาวน์ (breakdown) ผลการเกิดเบรกดาวน์ในสถานะต่างๆ การใส่ประจุให้อนุภาค การดักฝุ่นด้วยหลักการไฟฟ้าสถิต กลไกการดักฝุ่นด้วยเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน (cyclone)

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของสนามไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าและความเครียดสนามไฟฟ้า สภาพฉนวนจะเริ่มเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้าอย่างดี เมื่อเกิดการสปาร์คหรือวาวไฟหรือมีการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนในก๊าซหรือของเหลว หลังจากสภาพฉนวนเปลี่ยนเป็นสภาพนำไฟฟ้าและจะคงอยู่ถ้าแรงดันนั้นสูงพอ [10], [11] และจะกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนดั้งเดิม หลังจากการเบรกดาวน์หรือสปาร์คได้ผ่านพ้นไปแล้ว ซึ่งแตกต่างไปจากฉนวนที่เป็นของแข็งหลังจากการเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการเป็นฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร

2.2.1 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength)

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric Field Stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรกดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของการฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform Field) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ลักษณะสมบัติของไดอิเล็กตริก (Dielectric), เวลา เป็นต้น



รูปที่ 2.1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field)
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly Nonuniform Field)
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly Nonuniform Field)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.1 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์จะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1 , d_2 และ d_3 เป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่เกิดเบรกดาวน์เริ่มเกิดขึ้นซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

2.2.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง อิเล็กโทรดที่มีค่าสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่าง อิเล็กโทรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลต์ หรือกิโลโวลต์

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย เซนติเมตร

E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรดหน่วย โวลต์ต่อเซนติเมตรหรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะเกิดเบรกควาน์ทันที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดซึ่งเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด โดยที่ค่ากระแสก่อนจะเกิดเบรกควาน์นั้นจะวัดไม่ได้ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกควาน์นี้ก็คือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ V_b คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกควาน์ด้วยสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกควาน์หรือความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

2.2.3 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.1(ข) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมอาจคำนวณได้จาก

$$E_{max} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.3)$$

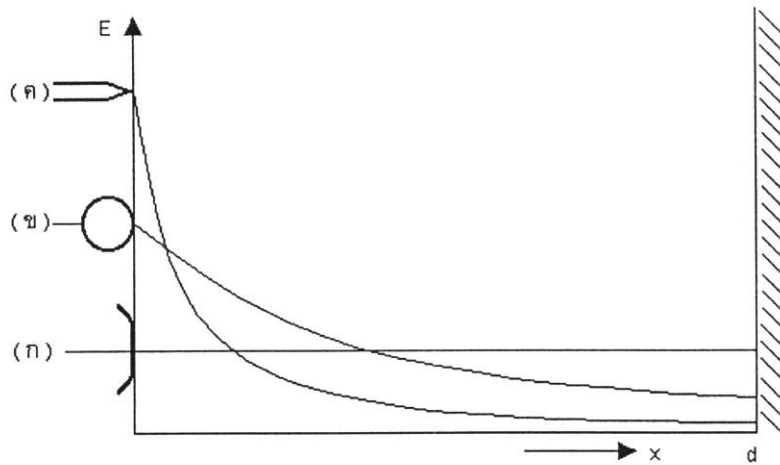
η^* : แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) นิยามว่า $\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}}$; ซึ่ง

โดยทั่วไปจะมีค่า ≤ 1 ดังนั้นกล่าวได้ว่า η^* คือ ดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดและโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เองจึงสามารถคำนวณหาความเครียดเบรกควาน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยได้คือ

$$E_b = \frac{V_b}{d \cdot \eta^*} \quad (2.4)$$

สมการนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่อิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา (Corona) หรือพรีดิสชาร์จ (Predischarge) เกิดก่อนเบรกควาน์ อิเล็กโทรดรูปที่ 2.1(ข) กล่าวคือ ก่อนการเบรกควาน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดเลยและ

ลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงและจะเกิดเบรคความถี่ที่ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดสูงถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_b



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ

ในกรณีที่มีอิเล็กโทรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโทรดที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเช่นปลายแหลมดังรูปที่ 2.1 (ค) ที่ระยะห่างออกจากผิวอิเล็กโทรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งอิเล็กโทรดแบบนี้แม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤติแล้วก็ตามจะยังไม่เกิดการเบรคความถี่แต่จะเกิดโคโรนาพริคิซิสซาร์จขึ้นในบริเวณผิวอิเล็กโทรดคือบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่น ๆ ยังมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำจะไม่เกิดโคโรนา ฉะนั้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดจะเกิดการคิซิสซาร์จ (Discharge) ที่ไม่สมบูรณ์ คือไม่ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรด เรียกว่าการคิซิสซาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดกระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเบรคความถี่เรียก กระแสโคโรนา (Corona Circuit) หรือกระแสพริคิซิสซาร์จ การเกิด โคโรนา เป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (Space Charge) แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดยังคำนวณได้จากสมการ (2.3) แต่ η^* จะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าความเครียดเบรคความถี่จะคำนวณจากสมการ (2.4) ไม่ได้ อย่างไรก็ตามสมการ (2.4) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดได้เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ

$$E_i = \frac{V_i}{d\eta^*} \quad (2.5)$$

เมื่อ E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเริ่มเกิด

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage)

โดย E_i และ V_i เป็นค่าความเครียดสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิดฉะนั้นจึงใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรดหรือกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.5) นี้ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเริ่มต้น (Starting Voltage, Threshold Voltage, Inception Voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่องระหว่างอิเล็กโทรด อาจจะเป็นเบรกดาวน์ ในกรณีที่อิเล็กโทรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยและอาจจะเป็นแรงดันที่โคโรนาเริ่มเกิด ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งค่าแรงดันเบรกดาวน์จะมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเริ่มต้นจึงอาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปว่า

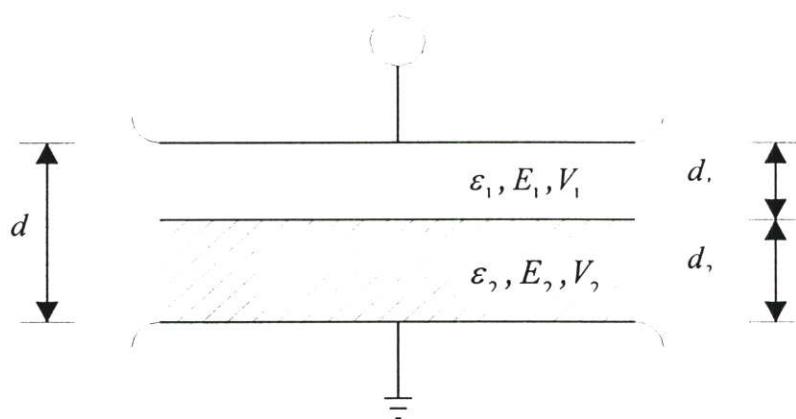
$$V_i = E_i \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.6)$$

เมื่อ V_i คือ แรงดันเริ่มต้น

E_i คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเริ่มต้น V_i

2.2.4 สนามไฟฟ้าในวัสดุสารเนื้อต่างชนิดกัน

ในอิเล็กโทรดแบบระนาบ กรณีที่มีฉนวนต่างค่า permittivity กัน ซ้อนกันอยู่เป็น dielectric และค่าความต้านทานจำเพาะต่างกัน ย่อมทำให้เกิดเป็นชั้นต่อของฉนวน อันเป็นผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนต่างๆการกระจายจะกำหนดด้วยค่าความต้านทานของการฉนวน การวางฉนวนต้องให้รอยต่อฉนวนขนานกับระนาบของอิเล็กโทรด ค่าสัมบูรณ์ของความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด



รูปที่ 2.3 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนทั้งสองคือ

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + d_2 \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} \quad (2.7)$$

$$E_2 = \frac{V}{\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) d_1 + d_2} \quad (2.8)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \rightarrow \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 = \dots \quad (2.9)$$

เมื่อ E_1 คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ฉนวนที่ 1

E_2 คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ฉนวนที่ 2

V คือแรงดันไฟฟ้า

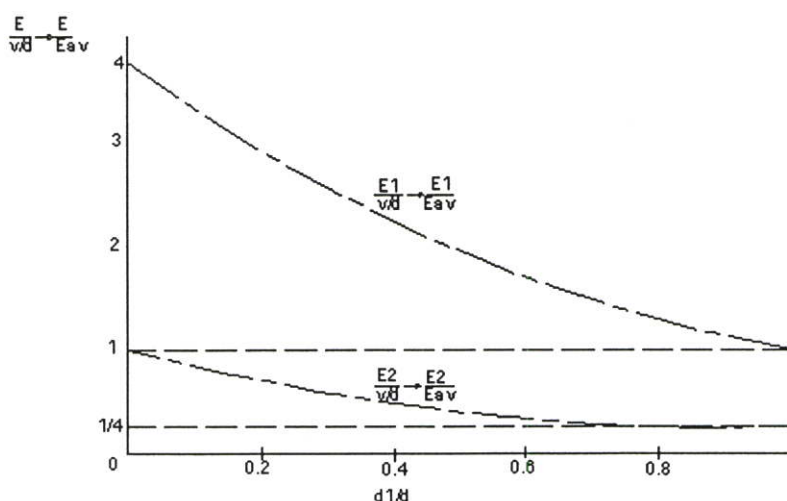
d_1 คือ ระยะห่างช่องอากาศของฉนวนที่ 1

d_2 คือ ระยะห่างช่องอากาศของฉนวนที่ 2

ϵ_1 คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนที่ 1

ϵ_2 คือ เปรอริมิตติวิตีของฉนวนที่ 2

จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้า E_1 จะมากกว่า E_2 ตามอัตราส่วน ϵ_2/ϵ_1 เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ถ้าเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนฉนวนแต่ละชั้นกับความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ จะเห็นได้ว่า ถ้าในส่วนฉนวนที่มีค่า ϵ ต่ำ ยิ่งบาง สนามไฟฟ้าจะยิ่งสูงมาก



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชั้นกับค่าเฉลี่ย Uniform field ฉนวนซ้อนกัน ที่ V และ d คงที่ โดยเปลี่ยนค่า d_1 และ $d_2 = d - d_1$ ฉนวนที่ $\epsilon_2/\epsilon_1 = 4$

2.2.5 สนามไฟฟ้าในอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน

อิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันและมีแกนร่วมกัน ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.10)$$

- เมื่อ E_{max} คือ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/cm)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (kV)
 r_1 คือ รัศมีของอิเล็กโทรดชั้นใน (cm)
 r_2 คือ รัศมีของอิเล็กโทรดชั้นนอก (cm)

การออกแบบให้ได้มิติที่พอเหมาะหมายถึงมิติที่เล็กที่สุด แต่สามารถทนแรงดันได้สูงสุด เมื่อกำหนดขนาดรัศมีนอก (r_2) จากนั้นพิจารณาต่อไปว่า ขนาดรัศมีใน (r_1) ควรเลือกขนาดเท่าใด โดยใช้หลักมิติที่เหมาะสม (แบบทรงกระบอกซ้อนกัน) เพื่อให้ได้ขนาดรัศมีใน (r_1) มีขนาดเล็ก แต่สามารถทนแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงสุด

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{opt} = e \quad (2.11)$$

2.3 คุณสมบัติของสนามไฟฟ้า

2.3.1 ไอออไนเซชัน (Ionization)

ขบวนการที่แยกอิเล็กตรอนให้หลุดออกอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอและทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มขึ้น เรียกว่า ไอออไนเซชันหรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุล ส่วนขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง (Solid) เรียกว่าการปล่อยอิเล็กตรอน (Electron Emission) ซึ่งในที่นี้จะ เป็นขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นขบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้ การเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนและไอออนในก๊าซเกิดจากขบวนการไอออไนเซชันและอยู่หลายวิธี ซึ่งจะขอกล่าวเพียงบางวิธีที่สำคัญๆ พอสังเขป

1 ไอออนไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization)

เมื่ออนุภาคมีมวล m (อิเล็กตรอน, ไอออนหรืออะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และชนกับอะตอมมีมวล m จะมีการถ่ายทอดพลังงานจลน์ ถ้าไม่มีผลทำให้เกิดการตื่นกระตุ้น (Excitation) หรือทำให้เกิด ไอออนไนเซชัน เรียกการชนนั้นว่าชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่ชนกระตุ้นกระตุ้นหรือ ไอออนไนเซชันขึ้น เรียกการชนนี้ว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision) นั้นหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานศักย์ไอออนไนเซชันเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ในขณะที่วิ่งเข้าหาอะโนด พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งถ้ามากกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน (Ionization Energy) ของโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด ก็จะทำให้เกิดการ ไอออนไนเซชันขึ้น ถ้าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการ ไอออนไนเซชัน ก็อาจจะเป็นผลทำให้โมเลกุลที่ถูกชนนั้นอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้นได้ พลังงานที่ทำให้โมเลกุลตื่นกระตุ้นได้พอดีเรียกว่า พลังงานตื่นกระตุ้น (Excitation Energy)

2 โฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization)

เมื่ออะตอมของธาตุบางชนิด เช่น อะตอมไฮโดรเจนได้รับพลังงานจากภายนอกจะทำให้ วงโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสลอยห่างออกมามากกว่าปกติ แต่ยังคงโคจรอยู่รอบนิวเคลียสในวงโคจรที่แน่นอนวงหนึ่งโดยไม่หลุดออกมา ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้นพลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาทีเท่านั้นแล้วอะตอมก็จะกลับเข้าสู่สภาพปกติ ขณะเดียวกันก็จะปล่อยพลังงานที่ได้รับในตอนแรกกลับคืนมาในรูปของโฟตอน (Photon) ถ้าวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลางอาจทำให้เกิดการตื่นกระตุ้นหรือไอออนไนเซชันได้

3 เทอร์มัลไอออนไนเซชัน (Thermal Ionization)

เทอร์มัลไอออนไนเซชัน เป็นการ ไอออนไนเซชันอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยพลังงานความร้อน ในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงๆ ไอออนไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้จาก

- ไอออนไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุล หรือ อะตอมเนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้มีความเร็วสูง จึงให้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิด ไอออนไนเซชันได้
- ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมาและเกิดโฟโตไอออนไนเซชันขึ้นได้
- การชนของอิเล็กตรอน ที่มีพลังงานจลน์สูง จากข้อข้างต้น

2.3.2 การเกิดไอออนลบ (Negative ion formation)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ไอออนไนเซชันเป็นขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซและที่เหลือเป็นไอออนบวกในโอกาสเดียวกัน ไอออนลบอาจเกิดขึ้นได้

โดยถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงาน ไม่เพียงพอที่จะชนให้อะตอมหรือ โมเลกุลที่เป็นกลางของก๊าซบางชนิด แตกตัวออกได้ แต่อิเล็กตรอนอาจจับหรือเกาะบน โมเลกุล (Electron Attachment) ทำให้กลายเป็นอนุภาคที่มีมวลเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เคลื่อนที่ได้ช้า นั่นคือ ไอออนลบจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า น้อยโอกาสจะเกิด ไอออนในเซชัน โดยการวิ่งชนของไอออนลบจึงมีน้อยเท่ากับเป็นการหน่วงการเกิด ไอออนในเซชัน การหน่วงนี้จะมีผลอย่างยิ่งถ้าเกิดขึ้นในบริเวณใกล้ๆ โดคอันเป็นที่เริ่มต้นของอิเล็กตรอน เป็นผลให้อิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวเริ่มลดลงไปโมเลกุลของก๊าซประเภทฮาโลเจน คือพวกที่มีองค์ประกอบของ F, Cl, Br, I และ At รวมทั้งพวก O_2 , CO_2 , SF_6 เป็นต้น จะจับอิเล็กตรอนได้ง่ายดายและเป็น ไอออนลบที่มั่นคงก๊าซที่มีอะตอมหรือ โมเลกุลเหล่านี้รวมอยู่ด้วยเรียกว่าก๊าซ ไฟฟ้าลบ (Electronegative gases) ในก๊าซอื่นๆ หากมีก๊าซไฟฟ้าลบเจือปนแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของก๊าซนั้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด

2.3.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

การที่อิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุล ซึ่งจัดเป็นขบวนการเบื้องต้นที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณนั้น แต่ตามลำพังขบวนการเบื้องต้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนได้ จำเป็นต้องมีขบวนการอื่นมาช่วยเสริมจำนวนอิเล็กตรอนด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะถือได้ว่าเป็นขบวนการที่สำคัญในการช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเบรกดาวนได้ ซึ่งมีหลากหลายวิธีแต่การจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าที่ผิวของโลหะเป็นสำคัญ ซึ่งจะกล่าวถึงกลวิธีต่าง ๆ พอสังเขปดังนี้

1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยการชนของไอออนบวก

ไอออนบวกซึ่งเกิดจากขบวนการเบื้องต้นที่อิเล็กตรอนวิ่งชน โมเลกุลหรืออะตอม ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเหลือไอออนบวกวิ่งเข้าหาอะโนด โดยเหตุที่ไอออนบวกมีมวลมากจึงเคลื่อนที่ได้ช้าพลังงานจลน์ที่ไอออนบวกได้จากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อยไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด ไอออนในเซชัน โดยการชนของไอออนบวกกับ โมเลกุลของก๊าซได้แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาจากผิวโลหะได้เมื่อไอออนบวกวิ่งกระทบ

2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะโดยพลังงานโฟตอน

โมเลกุลที่อยู่ในสภาพดินกระตุ้นปล่อยพลังงานโฟตอนออกมาในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (Ground State) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วงโคจรเดิมพลังงานโฟตอนตกลงบนอะโนด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะโนดหรือโมเลกุลที่อยู่ในสถานะภาพเมตาเสถียร (Metastable) นั้นอาจแพร่กระจายกลับไปหาอะโนดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งเข้าไปกระทบอะโนด

3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะโดยพลังงานแสง

อิเล็กตรอนอาจหลุดหรือกระจายออกจากผิวโลหะได้ เมื่อได้รับพลังงานแสงมากพออาจมีพลังงานเหลือเพื่อและเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์วิ่งเข้าหาอะ โนด ได้ถึงแม้จะไม่มีสนามไฟฟ้าก็ตาม

4 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะด้วยความร้อน (Thermionic Emission)

ที่อุณหภูมิสูงๆบางอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะจะมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะหรือข้ามกำแพงศักย์(Potential Barrier) ที่ผิวของโลหะไปได้และมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิของผิวโลหะซึ่งการหลุดของอิเล็กตรอนจากผิวของโลหะโดยไม่มีแหล่งพลังงานใด ๆ จากภายนอกนี้เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน

5 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission)

ผลจากสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกเข้าไปจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดหรือปล่อยออกมาจากผิวโลหะได้นั้น ต้องมีพลังงานมากพออย่างน้อยมีพลังงานมากกว่าการปล่อยออกด้วยพลังงานความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของ โลหะลักษณะของอิเล็กโทรดเป็นต้น โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงมาก อาศัยแรงดึงดูดของสนามไฟฟ้าดึงอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอม ซึ่งผลของขบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากโลหะโดยสนามไฟฟ้านี้ จะทำให้เกิดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตรงบริเวณขั้วอิเล็กโทรดสูงมาก ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญมากในโคโรนาดีสชาร์จของปลายแหลมขั้วลบ (Negative Point Corona Discharge)

2.3.4 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน

มีเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมหลายประการที่มีผลกระทบต่อแรงดันเบรกดาวน เช่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด, รัศมีมีความโค้ง, ลักษณะผิว, ช่วงเวลาที่ป้อนแรงดัน, ความถี่, รูปคลื่น, แรงดัน, อุณหภูมิ, ชนิดของก๊าซ รวมทั้งขั้วแรงดันบนอิเล็กโทรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้เสนอไปแล้ว ดังนั้นจะขอกล่าวถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่มีความสำคัญส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันเบรกดาวนของก๊าซ โดยกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดคงที่พอสังเขปดังนี้

1. รูปลักษณะอิเล็กโทรด

ลักษณะอิเล็กโทรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ, ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก ในกรณีไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มากนักค่าแรงดันเริ่มต้นกับค่าแรงดันเบรกดาวนเป็นค่าเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออะวาลานซ์วิกฤติได้

ตามเงื่อนไข ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที จะไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์จึงเรียกลักษณะเบรกดาวน์โดยตรงเช่นเบรกดาวน์บนช่องว่างระหว่างทรงกลมที่มีระยะห่างไม่มากนัก เมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางความแตกต่างของขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์เล็กน้อย ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของอิเล็กโทรด ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์อย่างเห็นได้ชัด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม – แท่งกลมมีปลายเหมือนกัน รูปลักษณะอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ จะมีผลในกรณีทีอิเล็กโทรดเป็นแบบไม่สมมาตรมาก ๆ เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบ และจะเกิดโโรนาก่อนเบรกดาวน์

2. ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

ในทางปฏิบัติความหนาแน่นของอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการจนวนกลางแจ้งบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงถือได้ว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์หรือวาทไฟ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า P/T ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นของก๊าซ ให้ความหนาแน่นของก๊าซ $\delta = 1$ เมื่อความดันบรรยากาศ $p = 760$ Torr , อุณหภูมิ $t = 20^{\circ}\text{C}$ (ซึ่งเท่ากับ $T = 273+20 = 293$ °K) เป็นสภาวะมาตรฐานของ IEC

$$V_b(\delta) = \delta V_{bn} \quad (2.12)$$

โดย

V_b คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศ = δ

V_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

ค่าความหนาแน่นของอากาศคำนวณได้จาก

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{293}{273+t} = 0.386 \frac{p}{273+t} \quad (2.13)$$

เมื่อ

p คือ ความดันอากาศ เป็น Torr

t คือ อุณหภูมิ เป็น °C

3. ผลของความชื้นในอากาศ

โมเลกุลของ H_2O ในอากาศมีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆเพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศมีความชื้นมีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้นตราบเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอน้อย ผลของความชื้นที่มีผล

ต่อแรงดันเบรกควานน้อยมากเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่มีดิซชาร์จก่อนความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกควานและมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง แรงดันเบรกควานจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ

แรงดันเบรกควานกระแสตรงในแก๊ปของแท่งกระบอกกลม (rod-rod gap) จากผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ (Zaengl) คือ

$$V_b = (a + bd) \cdot \delta \cdot \sqrt{5.1 \times 10^{-2} (h_a + 8.65)} \quad \text{kV} \quad (2.14)$$

เมื่อ δ คือ ความหนาแน่นอากาศ

$$a = 20 \text{ kV (สำหรับ DC}^+) \text{}$$

$$15 \text{ kV (สำหรับ DC}^-) \text{}$$

$$b = 5.1 \text{ kV/cm}$$

$$d = \text{ระยะแก๊ป เป็น cm}$$

$$h_a = 4 \dots 40 \text{ g/m}^3 \text{ (ความชื้นสัมบูรณ์)}$$

2.4 ทฤษฎีมลภาวะอากาศ

การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงสีข้าว[14] ประกอบกับมาตรการป้องกันแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่กระทำกันอยู่เดิม และถึงแม้ว่าการจำแนกลักษณะของผลกระทบจะยังไม่ได้ทำการศึกษากันอย่างเด่นชัด แต่สามารถสรุปลักษณะของปัญหามลพิษที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียง แม้กระทั่งเกิดกับคนงานที่กำลังปฏิบัติงานอยู่ พบว่าผลกระทบหลักที่เห็นได้เด่นชัดจากกิจกรรมการดำเนินการของโรงสีคือ ด้านฝุ่นละออง และเสียงดัง ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลของคุณสมบัติต่างๆ ของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

2.4.1 ผลกระทบของฝุ่นละอองจากโรงสีข้าว

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากฝุ่นละอองที่เกิดจากอุตสาหกรรมโรงสีข้าว ถึงแม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาอย่างเด่นชัด แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมอื่นๆ จะแตกต่างกันในบางองค์ประกอบ ซึ่งเป็นองค์ประกอบเฉพาะของวัตถุดิบกำเนิดเท่านั้น

2.4.2 ผลกระทบจากฝุ่นละอองที่มีต่อสุขภาพมนุษย์

ปกติแล้วอากาศที่มนุษย์หายใจเข้าไปนั้นประกอบด้วย ก๊าซไนโตรเจน 78 % ก๊าซออกซิเจน 20.9 % นอกนั้นเป็นอาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ นีออน ฮีเลียม มีเทน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนได

ออกไซด์ และ โอโซน รวมกันประมาณ 1.1 % ดังนั้นสิ่งที่ปนเปื้อนเข้ามาในอากาศจะทำให้คุณภาพของอากาศเปลี่ยนไป สิ่งแปลกปลอมต่างๆเหล่านี้อาจอยู่ในรูปของฝุ่นละออง คิวบิก ไม หรือปริมาณก๊าซที่ผิดปกติไป ถ้าสิ่งปนเปื้อนมีปริมาณมากพอ และมีระยะเวลาในการสัมผัสเพียงพอก็อาจก่อให้เกิดความรำคาญ หรือเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือรบกวนการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้ ฝุ่นละอองที่กระจายอยู่ทั่วไปในอากาศ มี 2 ชนิด ใหญ่ๆคือ

- 1 ฝุ่นละอองที่เกิดจากสารอินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย รา ไรฝุ่น แมลงสาบ ขนสัตว์
- 2 ฝุ่นละอองที่เกิดจากสารอนินทรีย์ ได้แก่ โลหะ เช่น ผงเหล็ก หรือ อโลหะ เช่น ฝุ่นทราย

อวัยวะที่สำคัญของร่างกายที่ทำหน้าที่ในการหายใจและแลกเปลี่ยนก๊าซอยู่ตลอดเวลาคือปอด ดังนั้นปอดจึงต้องได้รับการสัมผัสกับอากาศอยู่รอบตัวเราตลอดเวลา ทำให้ได้รับสิ่งปนเปื้อนอยู่ในอากาศต่างๆ เช่น ฝุ่นละออง คิวบิก ไม ก๊าซพิษ ตลอดจนเชื้อโรคมามากมายดังนั้นระบบหายใจจึงต้องมีกลไกพิเศษที่ป้องกันตัวเองให้ปลอดภัย อย่างไรก็ตามหากได้รับสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้นมากเกินไป หรือกลไกการป้องกันมีความผิดปกติก็อาจจะทำให้ปอดได้รับอันตรายได้ นอกจากนี้กลไกการป้องกันของปอดนั้นอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการทำลายปอดเองได้

กลไกการป้องกันของปอดนั้นมี 2 ระบบ

1 กลไกทางกายภาพ ได้แก่ การกรอง ซึ่งเป็นกลไกด่านแรกที่ทำให้อากาศที่หายใจเข้าไปนั้นสะอาด ปราศจากสิ่งเจือปน ปฏิกริยาตอบสนองของอัตโนมัติ เช่น การไอ การจาม การหดตัวของหลอดลม การที่มีน้ำมูกเกิดขึ้น ก็เป็นการป้องกันไม่ให้สารตกลงไปในหลอดลม

2 กลไกการทำให้สารพิษหมดสภาพไปหรือการทำลายสารพิษ ได้แก่ การหลั่งเอ็นไซม์ออกมาจับกินสิ่งแปลกปลอม การสร้างภูมิคุ้มกันขึ้นมา หรือมีเซลล์ที่ทำหน้าที่ในการทำลายสิ่งแปลกปลอม เช่น Alveolar Macrophage

อย่างไรก็ตามถ้ามีสิ่งแปลกปลอมมากเกินไป กลไกการป้องกันอาจทำงานผิดปกติไป และอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ปอดได้ เช่น ถ้าหลั่งเอ็นไซม์ออกมามากเกินไปก็อาจจะทำลายเนื้อเยื่อปอดได้ จะเห็นว่าสิ่งที่ฝุ่นจะผ่านเข้าสู่ระบบหายใจได้นั้น ต้องผ่านปราการต่างๆ มากมายเริ่มตั้งแต่การกรองที่ขนจมูก ฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน (หรือไมโครเมตร) จะติดอยู่ในจมูก และทางเดินหายใจส่วนบนเกือบทั้งหมด (ระบบทางเดินหายใจส่วนบนได้แก่ โพรงจมูก คอหอย ปาก และกล่องเสียง) ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะผ่านเข้าไปในหลอดลมและอาจถูกกำจัดออกไปโดยกลไกของปอด ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ก็จะสามารถเข้าออกปอดได้ เช่นเดียวกับก๊าซ อาจจะถูกกักอยู่ที่ปอดบ้างเล็กน้อย และเชื่อกันว่าฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนนี้จะไม่เป็นอันตรายกับปอด

ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน และใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

- 1 ฝุ่นที่มีขนาด 2.5-10 ไมครอน เช่น ซิลิกา เหล็ก และอลูมิเนียม ฝุ่นพวกนี้มักตกค้างที่ Tracheobronchial Tree (หลอดลมและท่อลมในปอด)
- 2 ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน แต่ใหญ่กว่า 0.1 ไมครอน เช่น พวกซัลเฟตในแตรต และฝุ่นจากสารอินทรีย์ต่างๆ มักจะตกในส่วนปลายของท่อลมในปอด (Terminal Bronchiole) ซึ่งคล้ายกับถุงลม

2.4.3 ผลกระทบในส่วนที่เกี่ยวข้องกับขนาดของฝุ่น

ในการพิจารณาผลกระทบที่มีต่อมนุษย์จากฝุ่นละอองขนาดต่างๆนั้น จากการศึกษาต่างๆ สรุปว่าฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน มักจะติดอยู่ในจมูกและทางเดินอากาศส่วนบนเกือบทั้งหมด ส่วนฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะผ่านเข้าไปถึงหลอดลมในปอด บางส่วนเข้าถึงอวัยวะส่วนอื่นของปอดได้ และฝุ่นพวกนี้อาจถูกกำจัดออกไปโดยกลไกการทำงานของปอด สำหรับฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนจะสามารถผ่านเข้าออกปอดได้เช่นเดียวกับก๊าซ และอาจติดอยู่ในปอดบ้างเล็กน้อย ดังนั้นอาจแบ่งฝุ่นที่มีผลกระทบต่อร่างกายได้ 3 ขนาด คือ

- 1 ฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน
- 2 ฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1-10 ไมครอน
- 3 ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน

การแบ่งขนาดของฝุ่นจะแบ่งตามผลกระทบของฝุ่นที่อาจมีต่อระบบหายใจ(ตั้งแต่ จมูก ปาก จนถึงปอด) แต่นอกจากฝุ่นจะมีอันตรายต่อระบบหายใจแล้ว ฝุ่นยังมีอันตรายต่อตาและผิวหนัง และหากพิจารณาโดยภาพรวมทั้งอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ตา และผิวหนัง ผลกระทบต่อร่างกายเหล่านี้ อาจทำให้ร่างกายของมนุษย์อ่อนแอลง ทำให้ภูมิคุ้มกันโรคต่างๆ มีประสิทธิภาพลดลง เป็นอันตรายต่อร่างกายโดยรวม นอกจากเป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆ ที่กล่าวถึงยังมีผลทำให้เมื่ออาหาร ร่างกายก็จะยิ่งอ่อนแอมากขึ้น ผลกระทบกับร่างกายก็จะมีมากขึ้น

จากการพิจารณาพิจารณาขนาดของฝุ่นและคุณสมบัติของฝุ่นขนาดต่างๆ จะเห็นได้ว่ายิ่งฝุ่นมีขนาดเล็กความสามารถในการตกสู่พื้นดินของฝุ่นจะยิ่งลดลง ในทางตรงข้าม จำนวนเม็ดฝุ่นต่อหน่วยปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และพื้นที่ของผิวฝุ่นจะเพิ่มขึ้นด้วย (เมื่อขนาดของฝุ่นลดลง) เป็นผลให้ฝุ่นมีโอกาสสัมผัสกับอวัยวะในร่างกายและสิ่งอื่นๆ (เช่น ก๊าซ หรือของเหลว) มากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีโอกาสเป็นอันตรายต่อร่างกายมากขึ้น

- 1 ฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน

ดังได้กล่าวแล้วว่าฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนนี้ ส่วนใหญ่จะติดอยู่ในจมูกและทางเดินหายใจส่วนบน ดังนั้นฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนนี้จะมีผลกระทบต่ออวัยวะในส่วนนี้รวมถึง

ผลกระทบต่อตาและผิวหนังด้วย ผลกระทบกับอวัยวะของระบบทางเดินอากาศส่วนบนอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินอากาศได้ เช่น หายใจไม่สะดวก นอกจากนี้ก็จะมีควมรำคาญตลอดเวลาที่มีฝุ่น ส่วนผลกระทบกับตาก็อาจทำให้มีการระคายเคืองตา สำหรับผิวหนังนั้น ฝุ่นขนาดนี้อาจทำให้เกิดปัญหาที่ผิวหนัง หรือถึงกับเป็น โรคผิวหนังได้ ซึ่งมีรายงานเกี่ยวกับอาการเหล่านี้ในการสำรวจของกระทรวงสาธารณสุขด้วย นอกจากผลกระทบต่อร่างกายโดยตรงแล้ว ฝุ่นขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ที่มีจำนวนมากจะทำให้ระยการมองเห็นสั้นลง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

2 ฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1-10 ไมครอน

เนื่องจากฝุ่นขนาดนี้สามารถเข้าไปถึงส่วนต่างๆของระบบทางเดินอากาศจึงเป็น ฝุ่นที่อาจเป็นอันตรายต่ออวัยวะของระบบทางเดินอากาศ ฝุ่นขนาด 0.1-10 ไมครอนนี้เป็นฝุ่นที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า จึงทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าฝุ่นเหล่านี้จะมีในบริเวณไหนบ้าง เป็นผลให้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงฝุ่นเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน(แต่ละเม็ด) จะมีน้ำหนักน้อยมาก จึงทำให้สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน

ฝุ่นขนาด 0.1-10 ไมครอนนี้อาจแบ่งย่อยได้เป็น 2 ขนาด คือ ขนาดที่ใหญ่กว่า 5 ไมครอน และขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน โดยขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอนนี้จะเรียกว่าฝุ่นหายใจ (Respirable Dust) โดยมักถือกันว่าฝุ่นหายใจนี้สามารถเคลื่อนตัวไปได้ในทุกๆส่วนของระบบทางเดินอากาศ อย่างไรก็ตามแม้ว่าฝุ่นหายใจจะสามารถเคลื่อนตัวไปถึงส่วนปลายสุดของทางเดินอากาศ(ถุงลมปอด) แต่ก็ไม่ใช่ว่าฝุ่นหายใจที่เข้าถึงบริเวณนี้ทุกชนิดจะทำให้เกิดโรคในปอดมีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่ก่อให้เกิดโรคร้ายแรงในปอด ได้แก่

- 1 ฝุ่นซิลิกา (Silica หรือ SiO_2) ส่วนใหญ่จะเป็นฝุ่นจากหินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) อาจก่อให้เกิดโรคซิลิโคซิส (Silicosis)
- 2 ฝุ่นแอสเบสตอส (Asbestos) อาจก่อให้เกิดโรคแอสเบสโตซิส (Asbestosis)
- 3 ฝุ่นซิลิเกตอื่นๆ (Other Silicate) อาจก่อให้เกิดโรคซิลิเกโตซิส (Silicatosis)
- 4 ฝุ่นเหล็กหรือฝุ่นแร่เหล็ก อาจก่อให้เกิดโรคซิเดอโรซิส (siderosis)
- 5 ฝุ่นถ่านหิน (จากทั้งบิทูมินัสและแอนทราไซท์) อาจก่อให้เกิดโรคปอดดำ (Black Lung) หรือแอนทราโคซิลิโคซิส (Anthracosilicosis)

โรคเหล่านี้เรียกรวมกันว่าโรคปอดที่เกิดจากฝุ่น หรือโรคนิวโมโคนิโอซิส (Pneumoconiosis) ในจำพวกโรคปอดที่เกิดจากฝุ่นเหล่านี้ โรคซิลิโคซิสถือว่าร้ายแรงที่สุด อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อพิสูจน์ว่าโรคปอดที่เกิดจากฝุ่นเหล่านี้ (แม้แต่โรคซิลิโคซิส) อย่างเดียวจะทำให้ถึงตายได้ โดยทั่วไปเมื่อเกิดโรคเหล่านี้ มักมีโรคอื่นแทรกซ้อน เช่น นิวโมเนีย (Pneumonia) หรือวัณโรค (Tuberculosis) แล้วโรคปอดที่เกิดจากฝุ่นเหล่านี้จะเสริมให้อาการทรุดลงเรื่อยๆจนอาจถึงตาย

3. ฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน

ฝุ่นที่เล็กกว่า 0.1 ไมครอนนี้จะเป็นฝุ่นขนาดเล็กมาก โดยสามารถเคลื่อนตัวได้คล้ายก๊าซ (Mean Free Space ระหว่างโมเลกุลของก๊าซ = 0.1 ไมครอน) ดังนั้นฝุ่นขนาดนี้จะเข้าหรือออกจากปอดได้เหมือนกับก๊าซ และส่วนมากมักถือว่าไม่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอากาศ

อย่างไรก็ตาม ไม่ควรลืมว่าหากมีความเข้มข้นของฝุ่นขนาดนี้สูงๆ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ เช่นเดียวกับฝุ่นขนาดอื่นๆ (ที่มีความเข้มข้นสูง) แม้จะยังไม่มีหลักฐานยืนยันก็ตาม ดังนั้นจึงควรจะต้องพยายามป้องกันฝุ่นทุกขนาดไม่ว่าเล็กหรือใหญ่ ให้มีความเข้มข้นต่ำสุดเท่าที่จะทำได้โดยอย่างน้อยต่ำกว่ามาตรฐาน

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการดักฝุ่นด้วยหลักการไฟฟ้าสถิต

หลักการดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแรงดันสูง (Electrostatic Precipitator) เป็นการทำให้อากาศบริเวณรอบๆ เส้นลวดไอออนเกิดการแตกตัวเป็นประจุ (Air Ionizer) โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงให้กับเส้นลวดโลหะตัวนำ ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณผิวของเส้นลวดตัวนำมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูง และเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของอากาศผ่านบริเวณใกล้กับเส้นลวดตัวนำนี้ จะทำให้อากาศเกิดการแตกตัว (Ionized) ขึ้น

อากาศที่มีความสกปรก เช่น ฝุ่น ควัน และมลภาวะปะปนอยู่ เมื่อผ่านเข้าไปในจะไหลผ่านแผ่นกรองหยาบขั้นต้น (Pre - Filter) ซึ่งทำหน้าที่กรองฝุ่นหรือสิ่งปนเปื้อนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ทางด้านอากาศเข้า แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากที่ผ่านแผ่นกรองหยาบไปได้จะถูกให้พลังงานจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูง กระทำให้อากาศเกิดการแตกตัว (Ionization) และเกิดการอัดประจุไฟฟ้าให้กับฝุ่นละอองต่าง ๆ จากนั้น ฝุ่นละอองที่ได้รับการอัดประจุไฟฟ้า จะเคลื่อนที่เข้าไปติดอยู่บนชุดแผ่นอิเล็กโทรด (Plane Type) ที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม

2.5.1 ชุดแยกอิเล็กตรอนและชุดแผ่นดักฝุ่นโดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดระนาบ

จากหลักการเกิดปรากฏการณ์ไอออนในเซชันที่ว่า เมื่อมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ๆ ตกคร่อมผ่านก๊าซ จะทำให้อนุภาคในก๊าซมีพลังงานสูงขึ้น และเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลนั้นแตกตัวและสามารถหลุดออกมาจากโมเลกุลที่เป็นกลางเกิดเป็นไอออนบวก และเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่จะเกิดไอออนในเซชัน เมื่อ

$$W \geq W_i$$

$$W = e \times E \times \lambda, \quad (2.15)$$

เมื่อ W	คือ พลังงานในการแยกอิเล็กตรอน (eV)
e	คือ ประจุของอิเล็กตรอน = 1.602×10^{-19} C
λ_i	คือ ระยะห่างอิสระของก๊าซ
E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

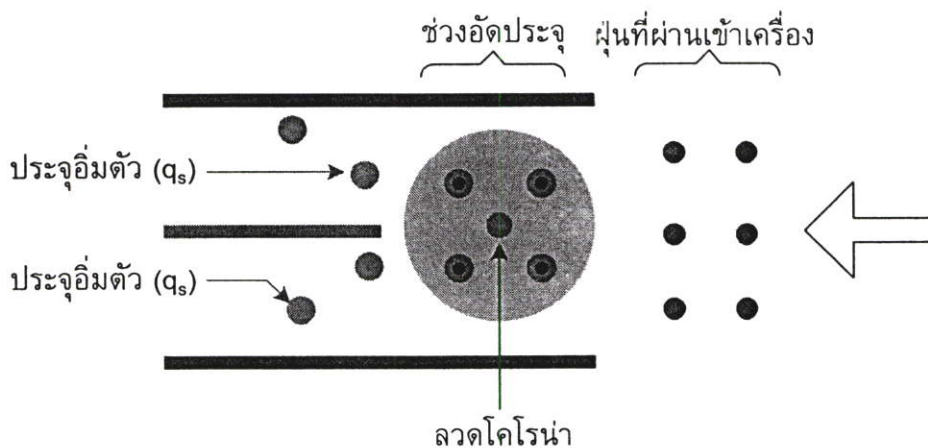
ดังนั้นจึงอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยาไอออไนเซชันนี้ในการออกแบบชุดแยกอิเล็กตรอน และชุดแผ่นดักฝุ่น โดยวางเส้นลวดไอออไนซ์ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูงศักดาลบให้กับเส้นลวดไอออไนซ์จากนั้นต่อขั้วบวก ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันสูงเข้ากับแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง จะได้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงระหว่างเส้นลวดไอออไนซ์ กับแผ่นอิเล็กโทรด ซึ่งจะเป็นตัวทำให้อนุภาคในก๊าซได้รับพลังงานและมีพลังงานสูงขึ้นจนเกิดเป็น ปฏิกิริยาการแตกตัวของไอออไนเซชันหรือเกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นอิเล็กโทรดที่มีศักดาเป็นบวกด้วยอัตราเร่งค่าหนึ่ง ส่วนหนึ่งของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เหล่านี้จะชนกับ โมเลกุลของอากาศอื่นอีก ทำให้เกิด ปฏิกิริยาการแตกตัวของไอออไนเซชันต่อเนื่อง ผลที่ได้คือ ไอออนบวกจำนวนมาก ซึ่งไอออนบวกที่ได้เหล่านี้ จะเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นอิเล็กโทรดที่มีศักดาตรงกันข้าม คือ เป็นลบ และในระหว่างการเคลื่อนที่ของ ไอออนบวกเหล่านี้ จะเกิดการชนและเกาะติดกับอนุภาคของฝุ่นละอองต่าง ๆ ที่เคลื่อนที่ผ่าน สนามไฟฟ้านี้ ทำให้อนุภาคของฝุ่นละอองต่าง ๆ เหล่านี้มีประจุเป็นบวกไปด้วย การให้ประจุกับ อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ โดยปกติจะมีอยู่ 2 วิธี คือ

2.5.1.1 การใส่ประจุให้อนุภาค

การใส่ประจุของอนุภาคใหญ่กว่า $0.5 \mu\text{m}$ จะเกิดจากกลไกใส่ประจุโดย สนามไฟฟ้าเป็นหลัก เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วเส้นลวดโคโรนาจะก่อให้เกิด สนามไฟฟ้าและโคโรนาขึ้นรอบเส้นลวด โคโรนาที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้โมเลกุลของก๊าซรอบๆแตกตัว เป็นไอออนบวกและลบจำนวนมาก ไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับขั้วโคโรนาจะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วโคโรนาและถูกทำให้เป็นกลางอย่างรวดเร็ว ส่วนไอออนที่มีประจุเหมือนกับขั้วเส้นลวดจะถูกขับไล่ให้วิ่งผ่านกระแสก๊าซไปยังขั้วตรงข้าม ในขณะที่วิ่งผ่านไอออนเหล่านี้อาจจะชนกันและถูกจับ โคน อนุภาคฝุ่น ทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าสถิตขึ้น สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองจะสร้างแรงดึงดูดให้กับอนุภาคที่มีประจุ และชักนำอนุภาคให้วิ่ง ไปยังขั้วที่ต่อลงดิน(ขั้วเก็บอนุภาค) อนุภาคที่เก็บได้ จะถูกกำจัดออกจากขั้วเก็บฝุ่นโดยการเคาะขั้วเก็บเพื่อทำให้ฝุ่นหลุดตกลงในฮอปเปอร์

ประจุมอิ่มตัว (Saturation Charge) หรือขีดจำกัดของประจุที่ใส่ให้กับอนุภาค สามารถ ประเมินได้ ถ้าใช้สมมุติฐานว่า อนุภาคมีทรงกลม ไม่มีอันตรปฏิกิริยา (Interaction) กับสนามไฟฟ้า

ของอนุภาคข้างเคียง และสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ ในกรณีเช่นนี้ค่าของประจุอิมิตัว[13]จะหาได้จากสมการ (2.16)



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดประจุอิมิตัว (q_s)

$$q_s = 12 \left[\frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right] \pi a_p^2 \epsilon_0 E_0 \quad (2.16)$$

- เมื่อ q_s คือ ประจุอิมิตัวบนอนุภาค (coulomb)
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของอนุภาค
 a_p คือ รัศมีของอนุภาค (m)
 ϵ_0 คือ Permittivity ของ free space = 8.85×10^{-12} (F/m)
 E_0 คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใส่ประจุ (V/m)

เวลาที่อนุภาคต้องใช้ในการอัดประจุจนถึงค่าอิมิตัว จะแปรผันตามความเข้มข้นของไอออน (N_0) ในย่านที่เกิดการให้ประจุ และสามารถคำนวณประจุที่อนุภาคมี (q_t) ที่แปรผันตามเวลา

$$q_t = \frac{q_s}{\left(1 + \frac{\tau}{t} \right)} \quad (2.17)$$

เมื่อค่าคงตัวของเวลา τ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{(N_0 e \mu_i)} \quad (2.18)$$

- เมื่อ t คือ เวลาที่เริ่มนับจากการใส่ประจุ (s)
 N_0 คือ ความเข้มข้นของไอออนอิสระ[5] เท่ากับ 2×10^{15} ion/m³

μ_i คือ สภาพการเคลื่อนที่ของไอออน[5] เท่ากับ $0.00022 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน[5] $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

2.5.1.2 การอัดประจุโดยการเคลื่อนที่อย่างไม่มีกฎเกณฑ์เชิงความร้อน (Thermal Random Motion)

การเคลื่อนที่อย่างไม่มีกฎเกณฑ์เชิงความร้อนของอนุภาคนี้ จะเกิดขึ้นเฉพาะกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า 0.1 ไมครอน) ซึ่งจะทำให้ไอออนและอนุภาคเคลื่อนที่เข้าชนกัน และเกิดการให้ประจุแก่กัน เรียกการให้ประจุแบบนี้ว่า การให้ประจุแบบแพร่ (Diffusion Charging) และเพื่อสะดวกต่อการคำนวณจึงตั้งสมมุติฐานไว้ว่าอนุภาคที่ได้รับประจุแบบแพร่นี้ ไม่ขึ้นหรือได้รับผลจากการให้ประจุโดยสนามไฟฟ้า

2.5.2 กลไกของการเก็บฝุ่น

2.5.2.1 ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (migration velocity)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยแรงเชิงไฟฟ้าสถิต และแรงเชิงแอโรไดนามิกส์เป็นหลัก แรงเชิงไฟฟ้าสถิตสามารถคำนวณได้โดยง่าย[13]

$$F_e = QE \quad (2.19)$$

เมื่อ F_e คือ แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า (N)

Q คือ ประจุของอนุภาค (C)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

ส่วนแรงเชิงแอโรไดนามิกส์จะเป็นแรงเสียดลาก (drag force) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$F_a = 6\pi\mu a_p w \quad (2.20)$$

เมื่อ F_a คือ แรงเชิงแอโรไดนามิกส์ (N)

μ คือ ความหนืดของก๊าซ (kg/m sec)

w คือ ความเร็วในการเคลื่อนย้าย (ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซและอนุภาค) (m/s)

แรงเชิงไฟฟ้าจะเร่งให้อนุภาควิ่งเร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุด หรือความเร็วที่มันปลายค่าหนึ่ง ที่ความเร็วนี้ แรง F_e และ F_a จะเท่ากัน ดังนั้นจะได้ความเร็วที่มันปลาย w เป็น

$$w = \frac{qE}{6\pi a_p \mu} \quad (2.21)$$

โดยทั่วไป w มีชื่อเรียกว่าความเร็วในการเคลื่อนย้าย (migration velocity) ของอนุภาค นั่นคือความเร็วสัมพัทธ์บนปลายของอนุภาคที่มีประจุ q เมื่อเทียบกับก๊าซ

ก. กรณีของอนุภาคขนาดใหญ่ (โตกว่า 0.5 ไมครอน)

ในกรณีนี้ การใส่ประจุจะเกิดจากกลไกใส่ประจุโดยสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคที่มีประจุอิมตัว q_s ในสนามไฟฟ้าเฉลี่ย E_0 จะเป็น

$$w = \frac{2 a_p \varepsilon \varepsilon_0 E_0 E_p}{\mu(\varepsilon + 2)} \quad (2.22)$$

เมื่อ E_0 คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าในย่านใส่ประจุ (V/m)

E_p คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าในย่านเก็บฝุ่น (V/m)

ข. กรณีของอนุภาคเล็กกว่า 0.5 ไมครอน

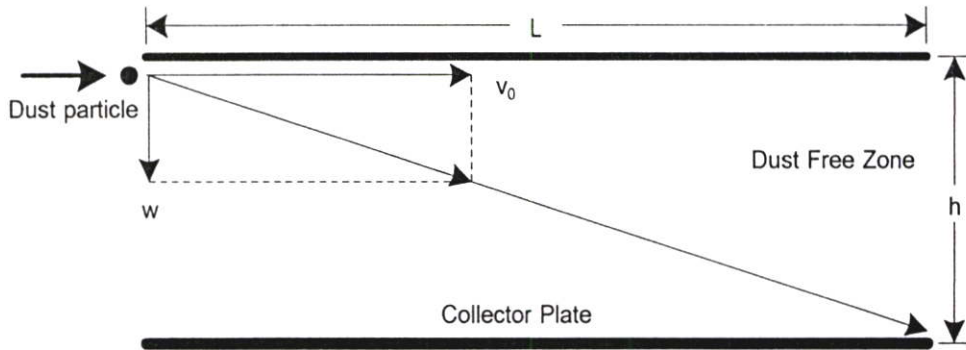
ในกรณีนี้สมการ (2.22) จะใช้ไม่ได้เพราะการใส่ประจุจะเกิดจากกลไกการแพร่ด้วย นอกจากนั้นในกรณีของอนุภาคขนาดเล็ก จะต้องทำการชดเชยค่าแรงทางแอร์ไดนามิกส์ของสมการ (2.20) ด้วยตัวคูณชดเชยนี้มีชื่อเรียกว่า ตัวชดเชยของคันทิงแฮม $C = [1+A_1 (\lambda/r)]$ สรุปแล้ว ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน จะคำนวณได้จากค่าชดเชย F_d ของสมการ (2.20) แล้วเทียบให้เท่ากับ F_e ของสมการ (2.19) นั่นเอง

$$w = \left[\frac{qE_p}{6\pi a_p \mu} \right] \left[1 + A_1 \left(\frac{\lambda}{r} \right) \right] \quad (2.23)$$

โดยที่ λ คือ ระยะทางอิสระเฉลี่ย และ A_1 คือตัวคงที่ ($\lambda = 6.53 \times 10^{-8}$ m และ $A_1 = 1.25$ สำหรับอากาศที่ 20° C และ 1 atm)

2.5.2.2 กระบวนการเก็บอนุภาคในแผ่นดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต

ก่อนอื่นกระบวนการเก็บอนุภาคในเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิตสามารถเข้าใจได้ง่าย ถ้าพิจารณากรณีที่การไหลของก๊าซเป็นแบบชั้นๆ (laminar flow) และอนุภาคทั้งหมดมีขนาดไม่เท่ากัน ในกรณีเช่นนี้ความเร็วของอนุภาคแต่ละชั้นจะประกอบด้วย w และ v_0 ที่ตั้งฉากกัน ความเร็วในการเคลื่อนย้าย w ซึ่งกำหนดค่าโดยความสมดุลของแรงเชิงไฟฟ้า และแรงเชิงแอร์ไดนามิกส์ เป็นความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปหาแผ่นเก็บ ส่วนความเร็วของอนุภาคในแนวแกนของเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิต v_0 จะมีค่าเท่ากับความเร็วของก๊าซลบการลื่นไถล (slip) ความเร็วรวมของอนุภาคคือผลรวมเชิงเวกเตอร์ของ w และ v_0



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของความเร็วของอนุภาคที่มีประจุในการไหลแบบชั้นๆของก๊าซ

ดังเห็นได้จากรูปที่ 2.6 เมื่อเวลาผ่านไป t วินาที นับจากเวลาที่อนุภาควิ่งเข้าเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิต ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปหาขั้วเก็บจะเท่ากับ $w t$ เมตร ในขณะที่ระยะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปเป็นระยะ $v_0 t$ เมตร ตามความยาวของเครื่อง ดังนั้นถ้าให้ความยาวของเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิตเป็น L เมตร ระยะทางไกลสุดที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปหาขั้วเก็บในระหว่างที่วิ่งผ่านเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิต คือ $h = w L / v_0$ ดังนั้น ถ้า $h \geq b$ โดยที่ b คือระยะห่างระหว่างขั้วโคโรนาและขั้วเก็บ เครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิตจะเก็บอนุภาคได้ทั้งหมด (ประสิทธิภาพการเก็บ $\eta = 100\%$) แต่ถ้า $h < b$ เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่เก็บได้ หรือประสิทธิภาพในการเก็บ η จะเท่ากับ $(h/b) \times 100\%$ หรือ $(w A / Q) \times 100\%$ ในที่นี้ A คือพื้นที่ผิวของขั้วเก็บที่เป็นแผ่นระนาบ และ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซที่ต้องการบำบัด Q มีมากขึ้นไปหนึ่ง การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศไฟฟ้าสถิตสามารถทำได้โดยการเลือกเงื่อนไขการทำงานที่ช่วยเพิ่มค่าความเร็วของการเคลื่อนย้าย w โดยที่ความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด [9] สามารถหาได้จากสมการ

$$L = \frac{Vh}{w} \quad (2.24)$$

- เมื่อ L คือ ความยาวของแผ่นอิเล็กโทรด (m)
 V คือ ความเร็วลมที่ไหลภายในเครื่อง (m/s)
 h คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด (m)
 w คือ ความเร็วในการเคลื่อนย้ายอนุภาค (m/s)

เมื่อทราบความยาวของแผ่นอิเล็กโทรดแล้ว จากปริมาตรการไหลของก๊าซ Q ที่ต้องการไหลผ่านเครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต ทำให้ทราบพื้นที่หน้าตัดของเครื่อง A และความสูงของแผ่นอิเล็กโทรด จะสามารถคำนวณจำนวนช่องของก๊าซ [9] ที่ไหลเข้าเครื่องได้

$$N_d = \frac{Q}{2MV_1h} \quad (2.25)$$

- เมื่อ N_d คือ จำนวนช่องก๊าซไหลด้านหน้าเครื่อง
 M คือ ระยะระหว่างเส้นลวดโครนา กับแผ่นอิเล็กโทรด (m)
 h คือ ความสูงของแผ่นอิเล็กโทรด (m)

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานการดักฝุ่นด้วยไซโคลน

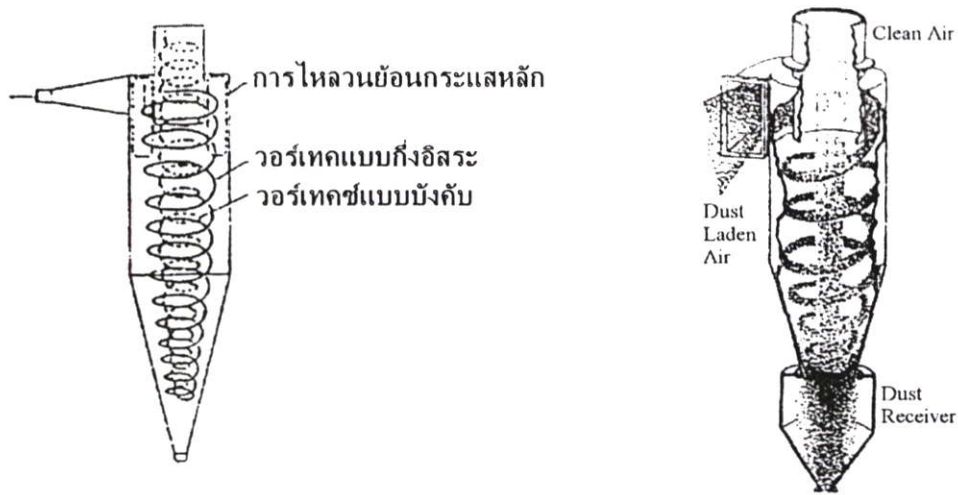
กลไกของการเก็บอนุภาคฝุ่นที่แขวนลอยอยู่ในก๊าซจะมีความเฉื่อยและโมเมนตัม และได้รับแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงของ โลกลักษณะสมบัติเหล่านี้ของอนุภาคจะก่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เมื่อมีการบังคับให้กระแสก๊าซไหลหมุนวน [12] แรงหนีศูนย์กลางเป็นกลไกหลักในการเก็บอนุภาคของเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงเฉื่อยส่วนใหญ่ด้วย อนึ่งแรงเฉื่อยของอนุภาคและแรงหนีศูนย์กลางยังมีบทบาทส่วนหนึ่งในการกรอการสครับ (Scrubbing) และวิธีทำความสะอาดก๊าซอื่นๆ ด้วย แต่ว่ากลไกอื่นก็มีความสำคัญในอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ด้วย

ก๊าซสกปรกจะถูกทำให้เกิดการไหลหมุนวนในเครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลาง เพื่อแยกอนุภาคออกจากกระแสก๊าซโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง ที่กระทำต่ออนุภาค เครื่องเก็บอนุภาคฝุ่นแบบแรงหนีศูนย์กลางสามารถแบ่งออกได้ เป็นสองกลุ่มใหญ่คือแบบไซโคลน (Cyclone Type) และแบบหมุน (Rotary Type) โดยทั่วไป จะนิยมใช้แบบไซโคลน

2.6.1 ลักษณะของการไหลในไซโคลน

ชิ้นส่วนสำคัญของโครงสร้างของไซโคลนคือทางเข้าของก๊าซที่ช่วยชักนำให้เกิดวอร์เทกซ์ (Vortex) ทางออกในแนวแกน (Axial Outlet) ของก๊าซสะอาด และช่องเปิดด้านล่างสำหรับปล่อยอนุภาคฝุ่นออก

ลักษณะการไหลในไซโคลนที่จะพูดถึงในที่นี้เป็นของกรณีไซโคลนแบบทั่วไป (รูปที่ 2.7) ก๊าซที่ไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัสใกล้ด้านบนของตัวทรงกระบอกจะชักนำให้เกิดวอร์เทกซ์ หรือการไหลเวียนแบบก้นหอยในย่านระหว่างผนังของตัวไซโคลนและผนังของท่อทางออกของก๊าซ ในลักษณะที่หมุนวนลงข้างล่าง วอร์เทกซ์นี้ซึ่งเป็นวอร์เทกซ์แบบกึ่งอิสระ (Semi-Free Vortex) จะหมุนวนและเคลื่อนลงจนต่ำกว่าผนังของท่อทางออกของก๊าซ แต่เมื่อไปถึงย่านๆ หนึ่งใกล้กับก้นของกรวย วอร์เทกซ์นี้จะกลับทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกนจากจากเคลื่อนลงเป็นเคลื่อนขึ้น โดยที่ยังคงไว้ซึ่งการไหลหมุนวน นั่นคือ จะเปลี่ยนเป็นวอร์เทกซ์แบบบังคับ (Forced Vortex) ซึ่งเปรียบเสมือนการหมุนตัวของของแข็งในย่านระหว่างประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีของท่อทางออกของก๊าซกับแกนกลางของท่อทางออก วอร์เทกซ์ด้านในนี้จะเป็นย่านความดันต่ำ และมีชื่อเรียกว่า แกน (Core) รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะทั่วไปของวอร์เทกซ์และการไหลวนย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow) ภายในไซโคลนธรรมดา



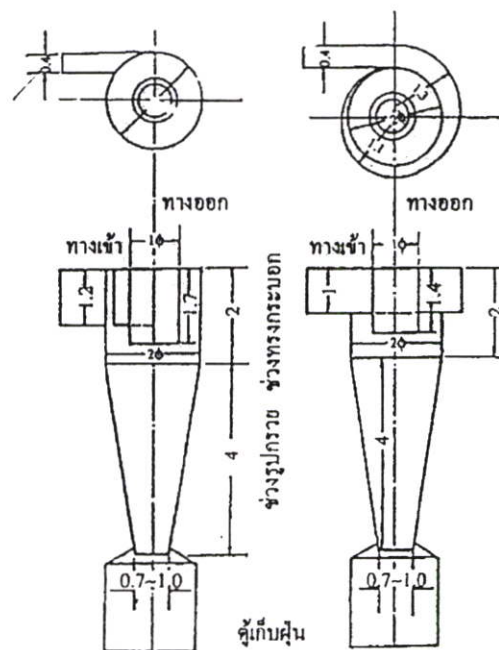
รูปที่ 2.7 ลักษณะทั่วไปของวอร์เทกซ์และการไหลย้อนกระแสหลัก (Eddy Flow) ภายในไซโคลน

2.6.2 ประเภท โครงสร้าง และหน้าที่ของไซโคลน

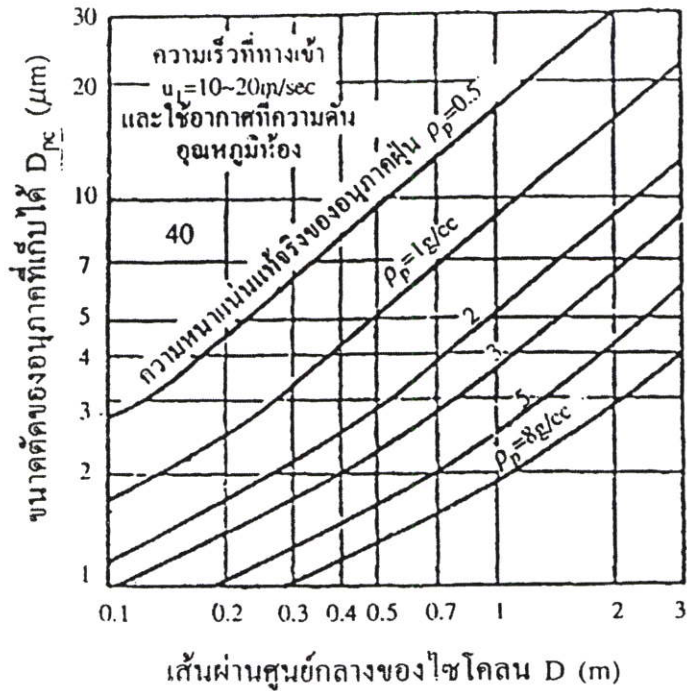
2.6.2.1 แบบไหลเข้าในแนวสัมผัส

สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส[13] (Tangential Inlet Type) โดยแสดงเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกของก๊าซสะอาด ไซโคลนแบบนี้ยังแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดปากทางเข้าในแนวสัมผัส
2. ชนิดมีห้องวงแหวนเพื่อให้ไหลวนเข้าตลอดเส้นรอบวง



รูปที่ 2.8 สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส (ญี่ปุ่น)



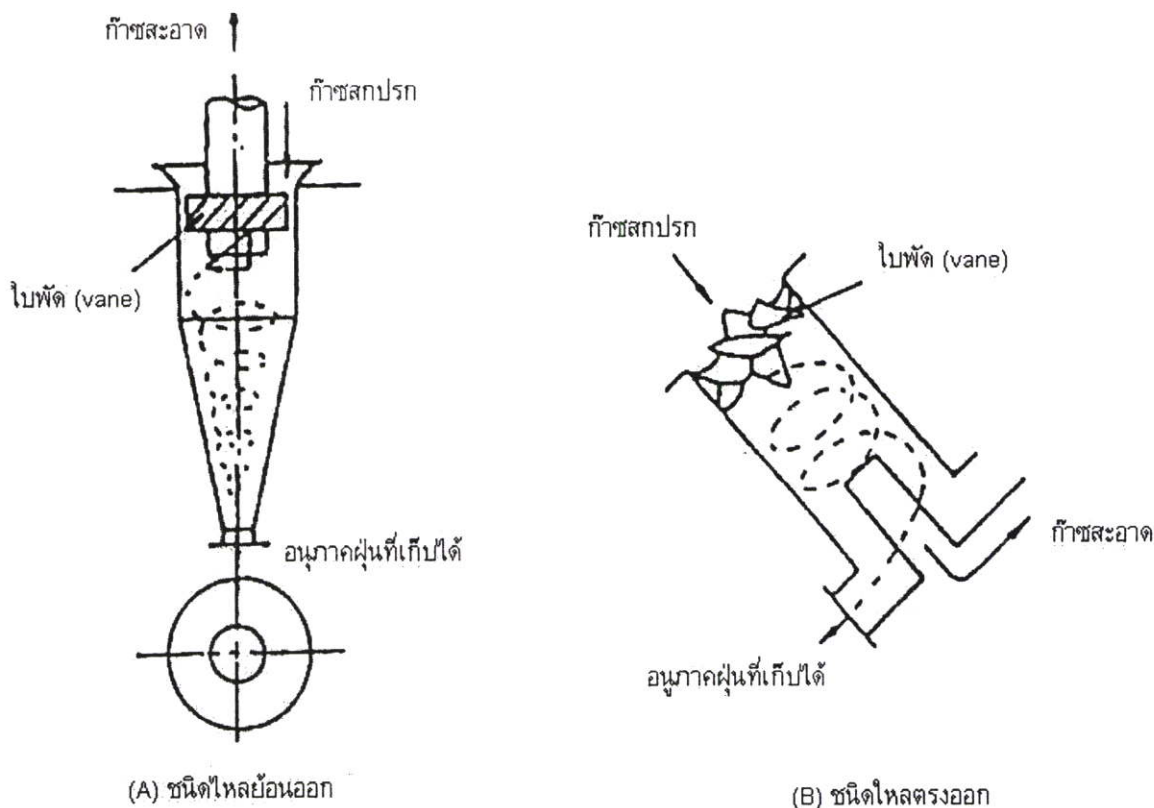
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัดของอนุภาค D_{pc} กับเส้นผ่านศูนย์กลาง D ของไซโคลนมาตรฐาน (ญี่ปุ่น)

โดยปกติความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซจะใช้ประมาณ 10 ถึง 20 ม/วินาที และความเร็วในช่วงนี้จะมีผลน้อยต่อประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นอาจกลับลดลงได้ การทำนายประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นทำได้ลำบากก็จริงแต่ในภาคปฏิบัติแล้ว สามารถใช้รูปที่ 2.9 ในการกำหนดขนาดตัดของอนุภาค D_{pc} จากขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ของไซโคลนมาตรฐาน แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่น η โดยถือว่าอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า D_{pc} ทั้งหมดในก๊าซจะถูกเก็บแยกออกจากก๊าซ โดยทั่วไป ความดันสูญเสียในไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสจะมีค่า 100 – 200 ม.ม. H_2O

2.6.2.2 แบบไหลเข้าในแนวแกน

ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน (Axial Inlet Type) ยังแบ่งย่อยไปเป็น

1. ชนิดไหลย้อนออก
2. ชนิดไหลตรงออก

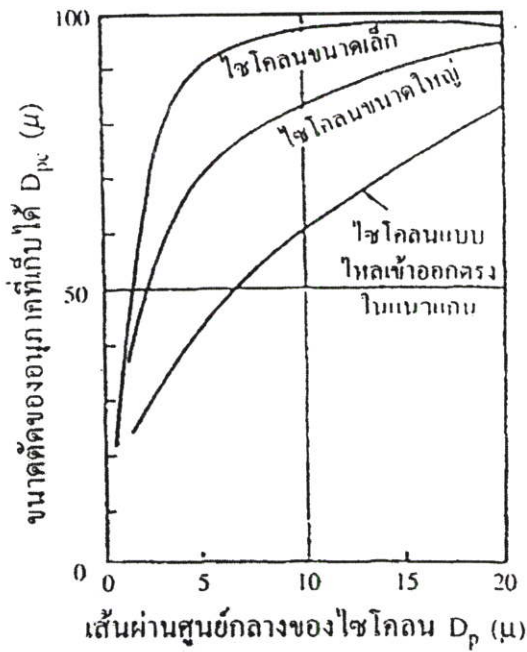


รูปที่ 2.10 ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน

ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกนสามารถบำบัดก๊าซที่อัตราการไหลสูงถึงสามเท่าของแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส โดยที่ความดันสูญเสียมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงมักใช้ในลักษณะวางขนานกันหลาย ๆ ลูก คือ มัลติ-ไซโคลน (Multi-Cyclone) เหตุที่ไม่ใช้ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัสมาทำกับมัลติ-ไซโคลน เพราะการกระจายของก๊าซเข้าไซโคลนแต่ละลูกจะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งต่างกับกรณีของไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกน

1. ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกนเกือบทั้งหมดที่ใช้จะเป็นชนิดไหลย้อนออก ซึ่งมีความเร็วที่ทางเข้าของก๊าซประมาณ 12 ม/วินาที และความดันสูญเสียประมาณ 80 มม. H₂O

2. ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวแกนชนิดไหลตรงออกจะกินเนื้อที่การติดตั้งน้อยกว่า และความดันสูญเสียต่ำกว่า (ประมาณ 50 มม. H₂O) แต่ในปัจจุบันไม่นิยมใช้กัน เพราะความดันภายในไซโคลนมักจะเสีสมดุล และทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บอนุภาคฝุ่นเลวลงด้วย รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของประสิทธิภาพย่อย $\Delta\eta$ ของไซโคลนชนิดนี้ด้วย



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างประสิทธิภาพย่อยของไซโคลนเดี่ยว

2.6.3 เหตุผลที่เลือกใช้ไซโคลนแบบไหลเข้าในแนวสัมผัส

- 1 ง่ายต่อการติดตั้ง
- 2 บำรุงรักษาง่าย เพราะไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ และไม่ซับซ้อน
- 3 มีราคาถูก
- 4 ไม่มีชิ้นส่วนสิ้นเปลืองให้ต้องเปลี่ยน
- 5 สามารถสร้างจากวัสดุเหลือใช้ภายในโรงงาน
- 6 มีโครงสร้างที่ค่อนข้างง่ายใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง

2.6.4 สัดส่วนต่างๆของไซโคลน

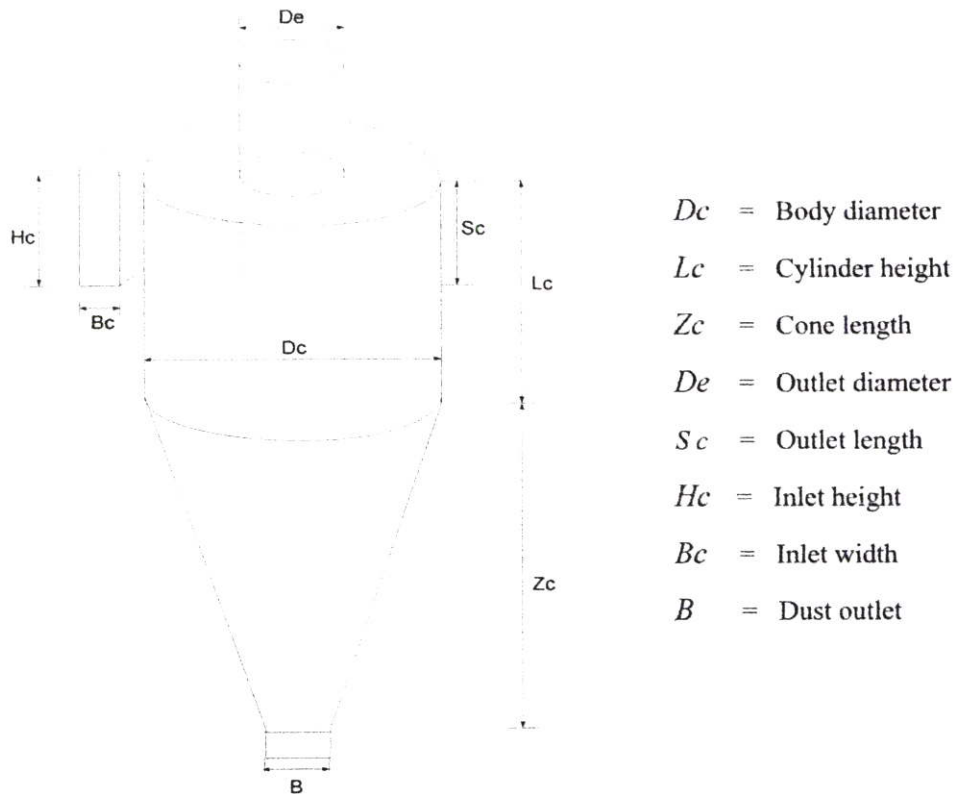
ไซโคลน มีโครงสร้างที่ค่อนข้างง่าย และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง และความดันสูง ด้วยจึงมีช่วงการใช้งานที่กว้างขวาง โครงสร้างของไซโคลนประกอบด้วยช่องไหลเข้า, ส่วนทรงกระบอก, ส่วนทรงกรวย และท่อทางออก รวมถึงส่วน ที่ด้านล่างของส่วนทรงกรวย จะติดตั้งกล่องฝุ่นซึ่งปิดมิดชิดเพื่อใช้สะสมที่เก็บได้หรือโรตารีวาล์ว เพื่อปล่อยอนุภาคที่เก็บได้ออกจากเครื่อง สามารถคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการได้จากสมการ

$$Q = VA \quad (2.26)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)

V คือ ความเร็วลม (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปากทางเข้าไซโคลน (m^2)



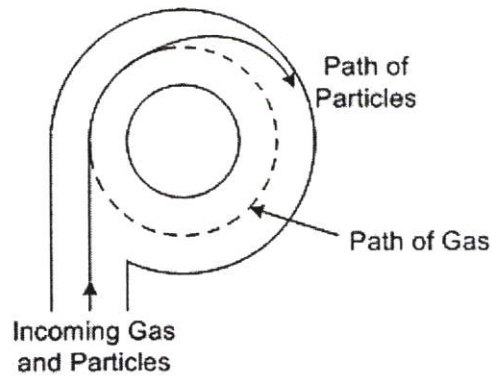
รูปที่ 2.12 สัดส่วนต่างๆของไซโคลน

สัดส่วนต่างๆของไซโคลนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง D_c (body diameter) กับสัมประสิทธิ์ของแต่ละสัดส่วนของไซโคลน[4] จากรูปที่ 2.12 สามารถหาสัดส่วนของไซโคลนได้จากตารางที่ 2.1

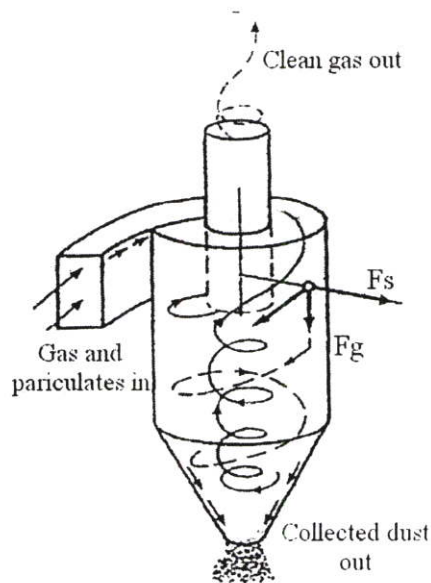
ตารางที่ 2.1 สัดส่วนมาตรฐานของไซโคลน

Symbol	Description	Stairmand	Japan	Industrial
D_c	Body diameter	1.0	1.0	1.0
H_c	Inlet height	0.5	0.6	0.25
B_c	Inlet width	0.2	0.2	0.25
S_c	Outlet length	0.5	0.85	0.3
D_e	Outlet diameter	0.5	0.5	0.4
L_c	Cylinder length	1.5	1.0	0.4
Z_c	Cone length	2.5	2.0	1.5
B	Outlet dust	0.375	0.35	0.3

Outlet length (Sc) นอกจากจะเป็นช่องทางออกแล้วยังช่วยให้ กระแสของลมที่เข้าเป็นไปในทิศทางเดียวกันด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อกระแสลมผ่านช่วง (Sc) มาแล้วจะเข้าช่วง Body length (Lc) กระแสลมจะแยกอนุภาคฝุ่นออกจากลมด้วยแรงหนีศูนย์กลาง ให้ฝุ่นไปติดกับผนังไซโคลนฝุ่นก็จะค่อยๆ เลื่อนลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกเมื่อลมมาถึงช่วง Cone length (Zc) ลมจะเปลี่ยนทิศทางจากลมที่ลงสู่ด้านล่างจะเปลี่ยนให้เป็นลมขึ้นจนขึ้นไปถึงช่องทางออก อนุภาคฝุ่นจะตกอยู่ด้านล่าง ส่วนอากาศดีจะออกทางด้านช่องทางออก Outlet length(Sc) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลของกระแสลมที่ outlet length (Sc) และทิศทางของอนุภาคฝุ่น



รูปที่ 2.14 ทิศทางของการไหลของกระแสลม และแรงหนีศูนย์กลางของไซโคลน

2.6.5 การแยกอนุภาคฝุ่นในวอร์เท็กซ์

สารอนุภาคถูกแยกออกจากก๊าซโดยแรงหนีศูนย์กลางซึ่งจับเคลื่อนอนุภาคผ่านเส้นการไหลของกระแสก๊าซไปยังผนังของไซโคลอน แรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่ออนุภาค คือ

$$F_s = M_p V_p^2 / gR \quad (2.27)$$

เมื่อ	F_s	คือ แรงแยกอนุภาค (N)
	M_p	คือ มวลของอนุภาค (kg)
	V_p	คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของอนุภาค (m/s)
	R	คือ รัศมีของการหมุนวนของอนุภาค (m)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงถ่วงของโลก = 9.80 (m/s ²)

ถ้าถือว่าความเร็วของอนุภาคเท่ากับความเร็วของก๊าซในแนวสัมผัส แล้วแทนมวลของอนุภาคด้วย

$$M_p = \beta D_p^3 \rho_p \quad (2.28)$$

เมื่อ	ρ_p	คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m ³)
	D_p	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (m)
	β	คือ Volume Shape Factor ($\beta = \frac{\pi}{6}$ ในกรณีของอนุภาคทรงกลม)

เมื่อแยกอนุภาคฝุ่นจากกระแสก๊าซด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ฝุ่นจะวิ่งไปตามความเร็วของก๊าซและจะตกลงด้านล่างด้วยแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงโลก

$$F_g = M_p g \quad (2.29)$$

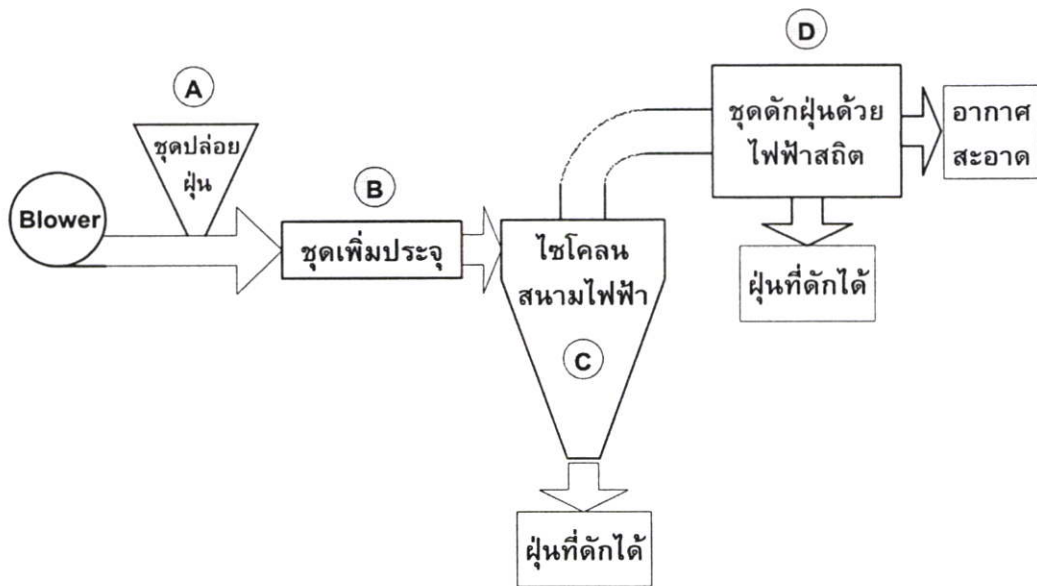
เมื่อ	M_p	คือ มวลของอนุภาค (kg)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงถ่วงของโลก = 9.80 (m/s ²)

บทที่ 3

การออกแบบชุดไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า

3.1 บทนำ

ในบทนี้ทำการศึกษาและออกแบบส่วนประกอบของชุดทดสอบเป็น 3 ส่วนหลักๆคือ ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น ชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรครีนาบ โดยใช้เทคนิคฉนวนหลายชั้น เพื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า โดยฝุ่นที่ใช้ทดสอบเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ ซึ่งจากการเก็บตัวอย่างฝุ่นพบว่าฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ จะเล็ดลอดออกจากปล่องระบายอากาศของโรงสีเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงทดสอบฝุ่นที่ขนาดเล็กกว่า $75 \mu\text{m}$ โดยการนำทฤษฎีในบทที่ 2 นำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนประกอบในแต่ละส่วนแล้วนำมาประกอบและทดสอบร่วมกันเป็นระบบดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูง มีการแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆดังนี้



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของระบบ

จากไดอะแกรมโครงสร้างของระบบแบ่งเป็น 4 ส่วน ส่วน A เป็นชุดปล่อยฝุ่นจะทำหน้าที่ปล่อยฝุ่นผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อความคุมอัตราความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ ส่วน B เป็นชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นเพื่อสร้างประจุสถิตให้อนุภาคฝุ่น ส่วน C เป็นชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างแรงจากสนามไฟฟ้าเพื่อเสริมแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการแยก

อนุภาคฝุ่นออกจากกระแสก๊าซ และส่วน D เป็นชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งไซโคลนไม่สามารถดักได้

3.2 พิกัดอัตราความหนาแน่นของฝุ่นละอองในอุตสาหกรรมโรงสีข้าว

ในการสีข้าวแต่ละครั้งจะได้ข้าวเต็มเมล็ด ปลายข้าว และอื่นๆเท่าใดยังกำหนดตายตัวไม่ได้ เพราะผลของการสีข้าวขึ้นอยู่กับ พันธุ์ข้าว การเก็บเกี่ยว และการเก็บรักษา แต่จากผลการทดลองประสิทธิภาพการสีข้าวของโรงสีใช้ข้าวเปลือก (1,979 kg) พบว่า [13]

ได้ข้าวเต็มเมล็ด	54.8 %
ต้นข้าว	10.81 %
ข้าวหัก	1.79 %
ปลายข้าว	0.38 %
รำละเอียด	7.76 %
แกลบ	22 %
ฝุ่นและสิ่งเจือปน	0.25 %
ค้างตามตะแกรงต่างๆ	2.21 %

เลือกทดสอบพิกัดอัตราการความหนาแน่นของฝุ่นละอองที่เกิดจากโรงสีข้าว จะพิจารณาจากโรงสีข้าว 3 ทั้งขนาด ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ความหนาแน่นของฝุ่นละอองของโรงสีข้าว

ฝุ่นและสิ่งเจือปน	โรงสีขนาดเล็ก 18 ตัน/วัน	โรงสีขนาดกลาง 30 ตัน/วัน	โรงสีขนาดใหญ่ มากกว่า 50 ตัน/วัน
0.25 %	3.47 g/m ³	5.78 g/m ³	9.65 g/m ³

ปัจจุบัน โรงสีมีโรงสีขนาดกลางและโรงสีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีความหนาแน่นฝุ่นอยู่ในช่วง 5.78 – 9.65 g/m³ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงที่ใช้ฝุ่นทดสอบที่ความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ในช่วง 4-10 g/m³ และทดสอบความหนาแน่นฝุ่นสูงในช่วง 40-100 g/m³ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของระบบ กรณีใช้งานในสภาวะความหนาแน่นฝุ่นสูงของโรงสีขนาดใหญ่

3.3 การออกแบบไซโคลนดักฝุ่น

เป็นอุปกรณ์ส่วนที่ C ในรูปที่ 3.1 ไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบเป็นไซโคลนที่ลดขนาดตามสัดส่วนของไซโคลนที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม ซึ่งการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศและขนาดพื้นที่ทางลมเข้าของไซโคลนจะต้องกำหนดขนาดของไซโคลน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้มี

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_c) เท่ากับ 20 cm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณขนาดของไซโคลนจากค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนต่างๆของไซโคลนจากตารางที่ 2.1 ได้ดังนี้

1. การคำนวณหาขนาดพื้นที่ทางเข้าของไซโคลน

ในการคำนวณหาขนาดพื้นที่ทางเข้าของไซโคลนจะต้องกำหนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_c) ของไซโคลนซึ่งในที่นี้ได้ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_c) เท่ากับ 20 cm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณขนาดของปากทางเข้าไซโคลนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความสูงปากทางเข้า} \quad H_c &= 0.25 \times D_c \\ &= 0.25 \times 20 \\ &= 5 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างปากทางเข้า} \quad B_c &= 0.25 \times D_c \\ &= 0.25 \times 20 \\ &= 5 \text{ cm} \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาขนาดทางออกของก๊าซสะอาด

การคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทางออกด้านบน ซึ่งเป็นทางออกของก๊าซสะอาดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความลึกของท่อทางออก} \quad S_c &= 0.3 \times D_c \\ &= 0.3 \times 20 \\ &= 6 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ} \quad D_e &= 0.4 \times D_c \\ &= 0.4 \times 20 \\ &= 8 \text{ cm} \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาขนาดความสูงของไซโคลน

ซึ่งสามารถคำนวณหาความสูงของทรงกระบอกไซโคลนและความสูงของกรวยไซโคลน ได้จากสมการต่อไปนี้

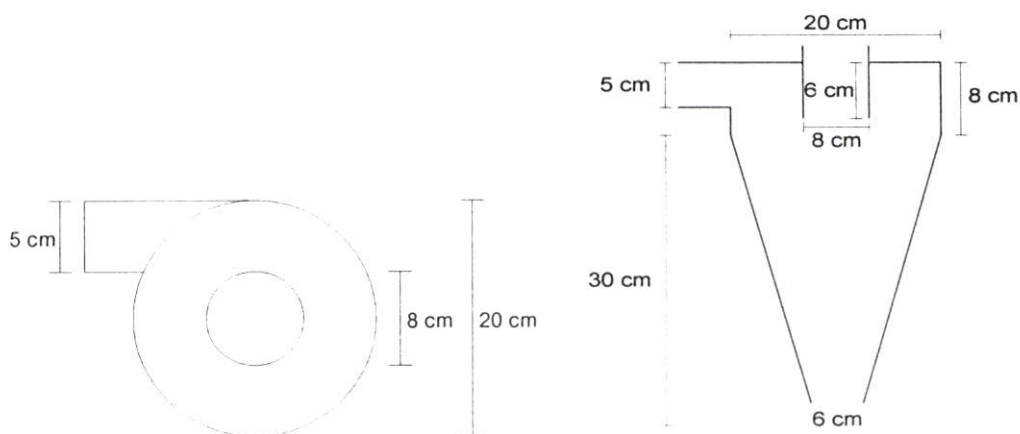
$$\begin{aligned} \text{ความสูงช่วงทรงกระบอก} \quad L_c &= 0.4 \times D_c \\ &= 0.4 \times 20 \\ &= 8 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสูงช่วงกรวย} \quad Z_c &= 1.5 \times D_c \\ &= 1.5 \times 20 \\ &= 30 \text{ cm} \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างที่ใช้ระบายฝุ่นลงสู่ถังเก็บ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง } B &= 0.3 \times Dc \\ &= 0.3 \times 20 \\ &= 6 \text{ cm} \end{aligned}$$

จากการคำนวณข้างต้น ดังนั้นจึงสร้างไซโคลนจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างและสัดส่วนของไซโคลน



รูปที่ 3.3 ไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อได้ไซโคลนจำลองสำหรับการทดสอบแล้ว จำเป็นต้องมีพัดลม Blower สำหรับจ่ายลมในการทดสอบ การหาขนาด Blower จะต้องทราบความต้องการอัตราการไหลของลมที่ไซโคลนต้องการ โดยสามารถคำนวณขนาดพื้นที่ปากทางลมเข้าของไซโคลน ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ปากทางลมเข้า} &= Hc \times Bc \\
 &= 5 \times 5 \\
 &= 25 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

เมื่อทราบพื้นที่ปากทางลมเข้าไซโคลอน 0.0025 m^2 และไซโคลอนทั่วไปมีความเร็วลมในย่านการทำงาน $10\text{-}20 \text{ m/s}$ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดความเร็วลมเข้าไซโคลอนสำหรับการทดสอบ 15 m/s จะสามารถหาค่าอัตราการไหลของอากาศของไซโคลอนที่ใช้ในการทดสอบได้จากสมการที่ 2.26

$$\begin{aligned}
 Q &= 15 \text{ m/s} \times 0.0025 \text{ m}^2 \\
 &= 0.0375 \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 2.25 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องเลือก Blower ที่สร้างปริมาณลมมากกว่า $2.25 \text{ m}^3/\text{min}$ เพราะต้องเผื่อไว้สำหรับแรงเสียดทานหรือรอยรั่วต่างๆที่อาจเกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ Blower 1 HP $3.5 \text{ m}^3/\text{min}$

3.3.1 การคำนวณการแยกอนุภาคฝุ่นในออร์ตเทคซ์

กลไกทางกลที่ใช้ในการแยกฝุ่นจากกระแสก๊าซในไซโคลอน จะพิจารณาจากสมการในหัวข้อที่ 2.6.5 สามารถคำนวณหามวลของอนุภาคฝุ่น (Mp) เพื่อคำนวณแรงหนีศูนย์กลาง (F_s) ที่กระทำต่ออนุภาคฝุ่นและแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (F_g) ที่กระทำต่ออนุภาคฝุ่นที่มีอนุภาคขนาด $75 \mu\text{m}$

ตารางที่ 3.2 การคำนวณแรงหนีศูนย์กลางและแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

ρ (g/m^3)	Mp (kg)	F_g (N)	F_s (N)
4	8.836×10^{-16}	8.659×10^{-15}	2.029×10^{-13}
6	1.325×10^{-15}	1.299×10^{-14}	3.042×10^{-13}
8	1.767×10^{-15}	1.732×10^{-14}	4.057×10^{-13}
10	2.209×10^{-15}	2.165×10^{-14}	5.072×10^{-13}
40	8.836×10^{-15}	8.659×10^{-14}	2.029×10^{-12}
60	1.325×10^{-14}	1.299×10^{-13}	3.042×10^{-12}
80	1.767×10^{-14}	1.732×10^{-13}	4.057×10^{-12}
100	2.209×10^{-14}	2.165×10^{-13}	5.072×10^{-12}

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่ามวลของอนุภาค แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ล้วนมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลอนทั้งสี่ แต่กลไกหลักในการแยกฝุ่นออกจากกระแสก๊าซภายในไซโคลอนขึ้นอยู่กับแรงหนีศูนย์กลาง F_s

3.3.2 การออกแบบชุดปล่อยฝุ่น

เป็นอุปกรณ์ส่วน A ในรูปที่ 3.1 ชุดปล่อยฝุ่นจะทำหน้าที่จ่ายฝุ่นผสมไปกับกระแสก๊าซภายในท่อเพื่อควบคุมความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศที่จะทดสอบกับไซโคลอน เลือกใช้ท่อลมที่มีพื้นที่หน้าตัดของท่อเท่ากับพื้นที่หน้าตัดปากทางลมเข้าไซโคลอนหรือขนาดใกล้เคียงคือ ท่อ PVC ขนาด 2.5 นิ้ว การออกแบบขนาดของกรวยใส่ฝุ่น จะต้องรองรับฝุ่นได้ในปริมาณที่มากพอสำหรับการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงสุด $\rho = 100 \text{ g/m}^3$ โดยการคำนวณน้ำหนักของฝุ่นที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นนำฝุ่นตามน้ำหนักที่คำนวณได้ไปตวงหาปริมาตรฝุ่น ภายในเวลาทดสอบ $t = 60 \text{ s}$ ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาตรอากาศ } V = Qt$$

$$V = 0.0375 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 \text{ s}$$

$$V = 2.25 \text{ m}^3$$

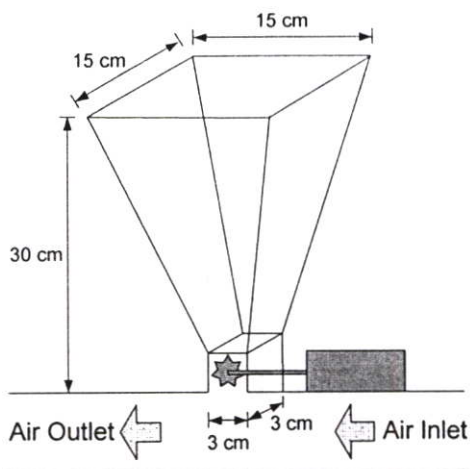
สามารถหาน้ำหนักของฝุ่น m ได้จาก

$$m = \rho V$$

$$m = 100 \text{ g/m}^3 \times 2.25 \text{ m}^3$$

$$m = 225 \text{ g}$$

เมื่อทราบน้ำหนักของฝุ่นทดสอบที่อัตราความหนาแน่นสูงสุด 100 g/m^3 จึงนำฝุ่นที่มีน้ำหนัก 225 g ไปตวงด้วยกระบอกตวงจะได้ปริมาตรโดยประมาณ 800 cm^3 จึงนำมาออกแบบสร้างชุดปล่อยฝุ่นมีปริมาตรมากกว่า 800 cm^3 การทำงานของชุดปล่อยฝุ่นอยู่ที่การควบคุมความเร็วมอเตอร์ในการกำหนดอัตราการผสมฝุ่นกับอากาศ ดังนั้นขนาดของชุดปล่อยฝุ่นอาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่กว่าในรูป 3.1 ก็ได้ แต่ควรมีขนาดใหญ่พอสำหรับใส่ฝุ่นในการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงสุด วิทยานิพนธ์นี้ใช้ปล่อยฝุ่นที่มีลักษณะเป็นพีระมิดหงาย ปริมาตร $2,250 \text{ cm}^3$ โดยมีความกว้างปากปล่องด้านบน $15 \times 15 \text{ cm}^2$ และสูง 30 cm กำหนดพื้นที่หน้าตัดด้านล่างของช่องปล่อยฝุ่นประมาณ $3 \times 3 \text{ cm}^2$ ดังรูปที่ 3.4

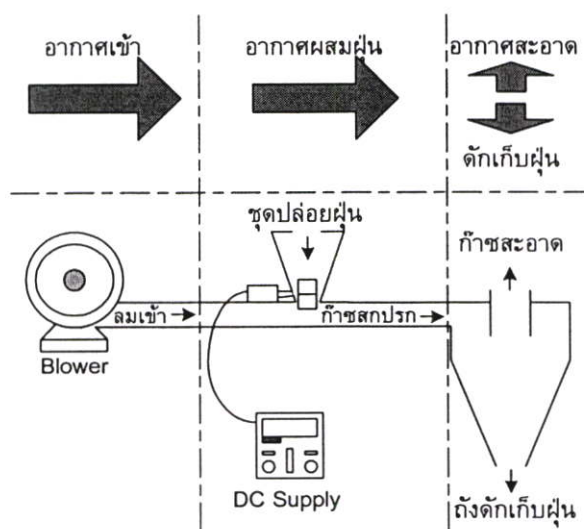


รูปที่ 3.4 ชุดปล่อยฝุ่น

จากการออกแบบจึงได้จัดสร้างชุดปล่อยฝุ่นขึ้น ด้วยแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 3 mm. มีพื้นที่หน้าตัดด้านบน 225 cm² มีพื้นที่หน้าตัดด้านล่าง 9 cm² โดยมีช่องปล่อยฝุ่นจำนวน 1 ช่อง ซึ่งการทำงานของชุดปล่อยฝุ่นจะใช้เฟืองที่ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถปรับความเร็วของเฟืองจ่ายฝุ่นได้โดยปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ที่จ่ายให้มอเตอร์

3.3.3 การทดสอบการดักฝุ่นของไซโคลนที่อัตราการความหนาแน่นฝุ่นต่างๆ

การทดสอบต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนเป็นหลัก โดยทำการทดสอบร่วมกับเครื่องดักฝุ่นแบบอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยจะทำการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³



รูปที่ 3.5 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลน

จากรูป 3.5 เมื่ออากาศไหลจาก Blower และถูกผสมกับฝุ่นภายในท่อระหว่างไหลเข้าไซโคลนเพื่อทำการดักฝุ่น อากาศสะอาดจะไหลออกทางด้านบนของไซโคลนและฝุ่นที่ดักได้จะตกลงในถังดักเก็บเพื่อนำมาหาขีดความสามารถในการดักฝุ่น ซึ่งจะกระทำโดยการนำฝุ่นที่ดักได้และตกลงไปยังด้านล่างของไซโคลนมาชั่งหาน้ำหนักฝุ่นที่ดักได้แล้วนำไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ป่นเข้าไปในอากาศ และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดักได้(ภาคผนวก ข.)แล้วบันทึกผล โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แบ่งการทดสอบดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

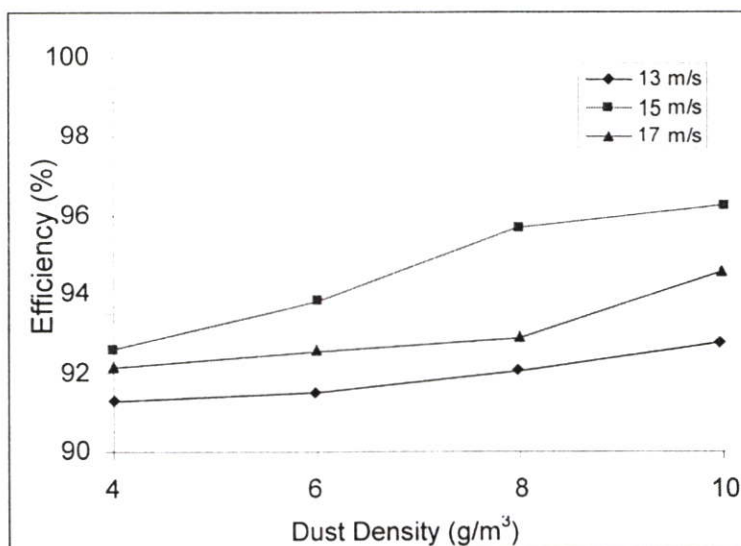
1. อนุภาคฝุ่น ขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
2. ชุดจำลองไซโคลนดักฝุ่น
3. นาฬิกาจับเวลา
4. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้ 0-30 V
5. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
6. เครื่องชั่งดิจิตอล

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ปรับความเร็วลมในการทดสอบที่ 13 m/s
2. ทำการคำนวณเพื่อหาน้ำหนักของฝุ่นที่จะต้องการเจือปนในอากาศ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4, 6, 8, 10 g/m³ และ 40, 60, 80, 100 g/m³ ตามลำดับ
3. นำฝุ่นที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ เทลงไปในกล่องปล่อยฝุ่น พร้อมจับเวลา
4. ปรับอัตราการปล่อยฝุ่นด้วยการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบปรับค่าได้
5. เริ่มการทดสอบโดยเปิด Blower และเริ่มจ่ายฝุ่น รอจนฝุ่นไหลออกจากชุดปล่อยฝุ่นหมดแล้วหยุดเวลา และบันทึกผล
6. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 1 โดยเปลี่ยนความเร็วลมเป็น 15 m/s และ 17 m/s ตามลำดับ

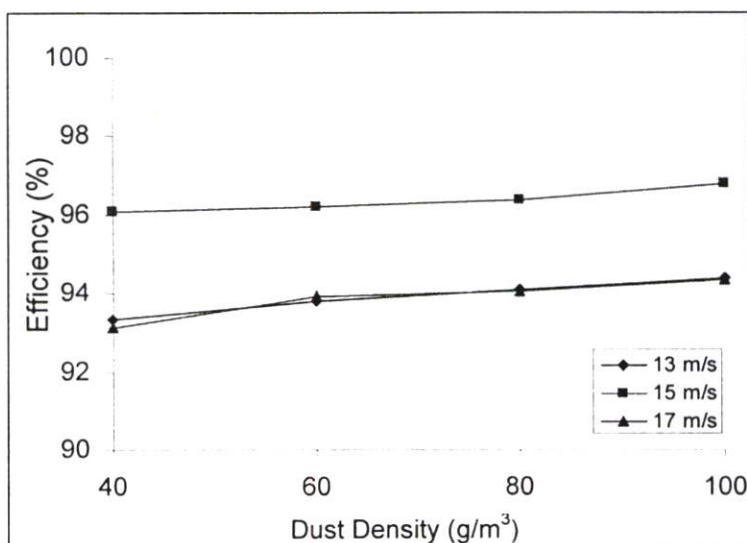
ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้เป็นการหาประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนแบบเดิม ซึ่งไม่มีการใช้ทฤษฎีไฟฟ้าแรงสูง โดยจะทำการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³



รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 3.6 (ตาราง ง.1-ง.3) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่ความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ 4-10 g/m³ โดยใช้ความเร็วลม 15 m/s พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 96.34 %



รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 3.7 (ตาราง ง.4-ง.6) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่ความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ 40-100 g/m³ โดยใช้ความเร็วลม 15 m/s พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 96.76 %

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนที่ความหนาแน่นของฝุ่นระดับ 4-10 และ 40-100 g/m^3 พบว่าที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m^3 ไซโคลนจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่น 96.76 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 10 g/m^3 ไซโคลนจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่น 96.34 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเร็วลมที่เหมาะสมกับไซโคลนคือ 15 m/s เนื่องจากความเร็วลมมีผลกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฝุ่น เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ และแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการทดสอบ ทดสอบโดยใช้เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a) ซึ่งวิธีการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก. โดยหาค่าคาปาซิแตนซ์ของอนุภาคฝุ่น แล้วทำการคำนวณกลับเพื่อหาค่า permittivity (ϵ_r) ได้ค่าตามตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.8 การทดสอบโดยใช้เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a)

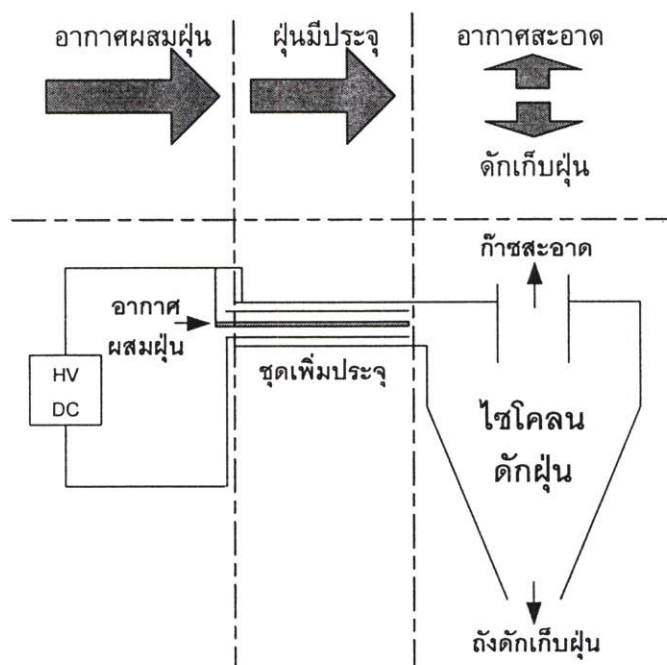
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของอนุภาคฝุ่น

วัสดุ	ค่าคาปาซิแตนซ์ของอนุภาคฝุ่น (pF)	ค่า Permittivity (ϵ_r)
	C Tan δ (Tettex 2809a)	
ฝุ่น	9.3	≈ 3.1

จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการดักฝุ่น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.5 การออกแบบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น

เป็นอุปกรณ์ส่วน B ในรูปที่ 3.1 ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นจะต่อก่อนอากาศจะไหลเข้าไซโคลน เพื่อไม่เป็นการต้านการไหลและแรงเสียดทานในท่อจึงเลือกใช้ท่อที่มีลักษณะทรงกระบอก ซึ่งหลักการได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.1.1 จุดประสงค์ของการเพิ่มประจุหรืออัดประจุให้อนุภาคเพื่อต้องการให้อนุภาคฝุ่นมีประจุสถิต และเกิดแรงคูลทางไฟฟ้าสถิตช่วยให้ฝุ่นเคลื่อนเข้าสู่ผนังไซโคลน ซึ่งผนังไซโคลนจะเป็นอิเล็กโทรดขั้วกราวนด์ และจะเคลื่อนตัวตามทิศทางของกระแสก๊าซลงสู่ด้านล่างของไซโคลน โดยออกแบบลักษณะอิเล็กโทรด 2 แบบ คือ แบบอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม และแบบอิเล็กโทรดระนาบกับเส้นลวด



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการทำงานของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น

จากไดอะแกรมการทำงานของชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่น เมื่อกระแสก๊าซที่มีอนุภาคฝุ่นผสมเคลื่อนผ่านชุดเพิ่มประจุ (Charging set) อนุภาคฝุ่นจะมีประจุสถิต และเมื่อเคลื่อนตัวไปตามกระแสก๊าซเข้าสู่ไซโคลน ซึ่งผนังไซโคลนจะเป็นอิเล็กโทรดขั้วกราวนด์ จะเกิดแรงคูลทางไฟฟ้าสถิตช่วยให้ฝุ่นเคลื่อนเข้าสู่ผนังไซโคลน และจะเคลื่อนตัวตามทิศทางของกระแสก๊าซและตกลงสู่ถังเก็บฝุ่น (Hopper) ด้านล่างของไซโคลน ส่วนก๊าซสะอาดจะไหลออกทางด้านบนของไซโคลน

3.5.1 แบบอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม โดยมีลักษณะทรงกระบอกซ้อนกันอาศัยจุดศูนย์กลางเดียวกัน วัตถุประสงค์เพื่อต้องการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น จึงออกแบบให้อิเล็กโทรดมีค่าสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ โดยใช้หลักมิติที่เหมาะสม จากหัวข้อที่ 2.2.5 เมื่อกำหนด

ขนาดรัศมีอิเล็กโทรดชั้นนอก (r_2) มีขนาดเท่ากับปากทางลมเข้าไซโคลนซึ่งเป็นท่อ PVC ขนาดรัศมีภายในท่อ 2.7 cm และพิจารณาขนาดรัศมีอิเล็กโทรดชั้นกลาง (r_1) โดยใช้หลักมิติที่เหมาะสม (แบบทรงกระบอกซ้อนกันถ้วน)

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{\text{opt}} = e$$

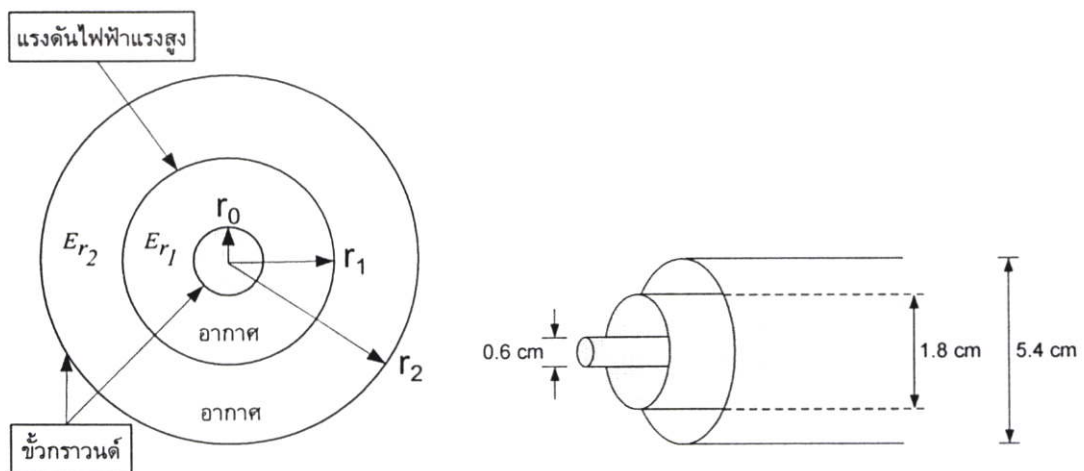
จะได้รัศมี $r_1 = \frac{2.7}{e} = 0.993 \text{ cm}$

หากพิจารณาจากโครงสร้างอิเล็กโทรดเพียง 2 ชั้น ด้วยสมการที่ 2.10 จะต้องใช้แรงดันสูงในการอัดประจุให้อนุภาค เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน จึงทำการออกแบบอิเล็กโทรดชั้นในสุด (r_0) ด้วยหลักมิติที่เหมาะสม เพื่อสามารถลดแรงดันในการทำงาน

$$\left(\frac{r_1}{r_0}\right)_{\text{opt}} = e$$

จะได้รัศมี $r_0 = \frac{0.993}{e} = 0.365 \text{ cm}$

จะสังเกตได้ว่าภายในท่อ PVC จะมีอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันอยู่ 3 ชั้น โดยชั้นนอกเป็นอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนาดรัศมี (r_2) ซึ่งเป็นขั้วกราวด์ ส่วนชั้นกลางเป็นอิเล็กโทรดทรงกระบอกขนาดรัศมีใน (r_1) ซึ่งเป็นขั้วแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและอิเล็กโทรดชั้นในสุด (r_0) ซึ่งเป็นขั้วกราวด์ จากหลักมิติที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 โครงสร้างชุดอิเล็กโทรดซ้อนกันถ้วน

ดังนั้นจะได้แกนกลาง (r_0) รัศมี 0.3 cm มีทรงกระบอกวงนอก (r_1) รัศมี 0.9 cm และทรงกระบอกวงนอกสุด (r_2) รัศมี 2.7 cm เมื่อทราบขนาดของชุดอิเล็กโทรดจึงคำนวณระดับแรงดันที่จะใช้ในการทดสอบจากสมการ (2.10) เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าของการไอออนไนเซชันเริ่มเกิดที่ความเข้มประมาณ 20 kV/cm [10]

$$V_{r_2} = E_{r_2} r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} = 20 \times 0.9 \ln \frac{2.7}{0.9} = 19.77 \quad \text{kV}$$

$$V_{r_1} = E_{r_1} r_0 \ln \frac{r_1}{r_0} = 20 \times 0.3 \ln \frac{0.9}{0.3} = 6.59 \quad \text{kV}$$

จากการคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณระดับแรงดันที่คาดว่าจะก่อให้เกิดการไอออนไนซ์สำหรับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชุดอิเล็กโทรด เมื่อทราบขนาดพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดแต่ละชั้นแล้วจึงคำนวณหาความยาวชุดอิเล็กโทรด ด้วยการเพิ่มประจุให้อนุภาคที่เวลาใดๆ (q_t) ด้วยสมการที่ (2.17) โดยเพิ่มเวลาในการอัดประจุไปจนกว่าจะอนุภาคฝุ่นจะได้รับประจุมัธย (q_s) ด้วยสมการที่ (2.16) เนื่องจากการเพิ่มประจุทางไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นจะกระทำได้ดีกับอนุภาคขนาด 0.5 μm ขึ้นไป เมื่อกำหนด \mathcal{E}_c ของฝุ่นจากตารางที่ 3.3 ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าประจุมัธยของอนุภาคได้ดังนี้

$$q_s = 12 \left[\frac{3}{(3+2)} \right] \pi (0.25 \times 10^{-6})^2 (8.854 \times 10^{-12}) (2 \times 10^6)$$

$$q_s = 2.5 \times 10^{-17} \quad \text{C}$$

เมื่อทราบค่าประจุมัธยแล้วจึงคำนวณค่าคงตัวของเวลา τ ได้จากสมการที่ (2.18) เพื่อนำไปคำนวณประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ (q_t) ในสมการที่ (2.17)

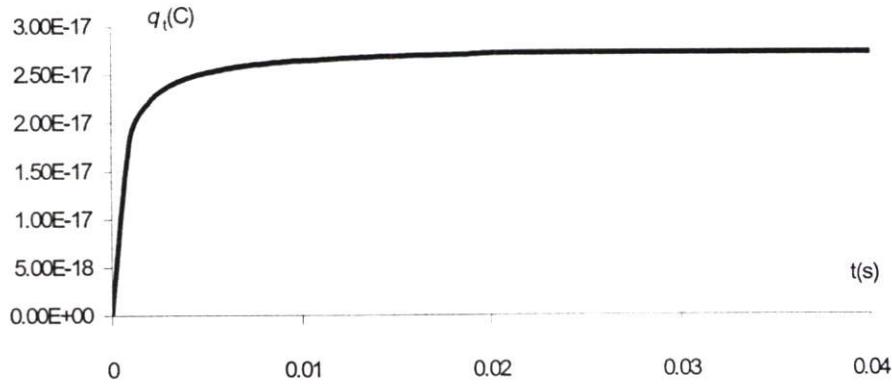
$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{(N_0 e \mu_i)}$$

- เมื่อ N_0 คือ ความเข้มข้นของไอออนอิสระ = 2×10^{15} ion/m³ [5]
 e คือ ประจุของอิเล็กตรอน = 1.602×10^{-19} คูอมบ์ / อิเล็กตรอน
 μ_i คือ สภาพการเคลื่อนที่ของไอออน = 0.00022 m²/Volt-Second [5]

$$\tau = \frac{4(8.854 \times 10^{-12})}{(2 \times 10^{15} \times 1.602 \times 10^{-19} \times 0.00022)}$$

$$= 502.44 \times 10^{-6}$$

เมื่อทราบค่าคงตัวของเวลา τ จะสามารถคำนวณประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ (q_t) ในสมการที่ (2.17) โดยทำการเพิ่มเวลาในการอัดประจุที่ทำให้ค่าของประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ (q_t) เข้าใกล้ค่าประจุอิ่มตัว (q_s)



รูปที่ 3.11 เวลาในการอัดประจุที่ทำให้ประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ (q_t) มีค่าเข้าใกล้ค่าประจุอิ่มตัว (q_s)

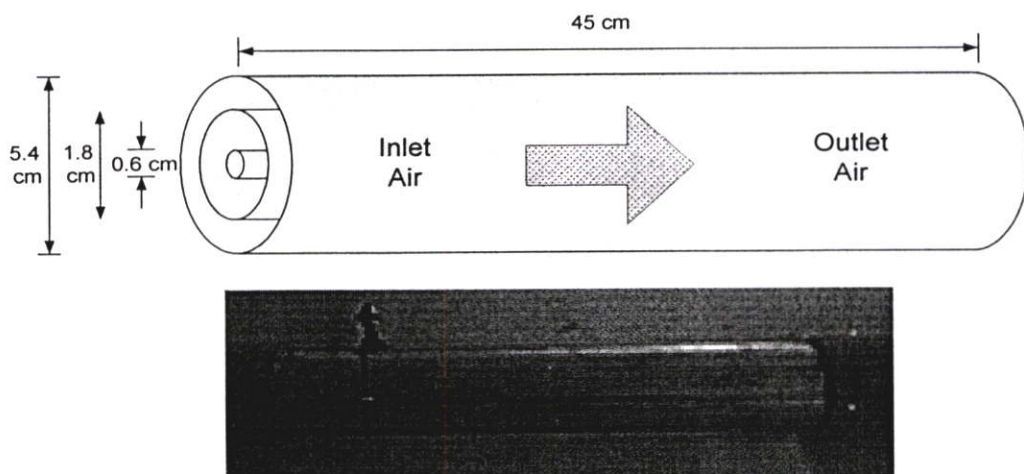
จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าถ้าใช้เวลาอัดประจุที่ 0.02 วินาที จะสามารถทำให้ค่าของประจุที่อนุภาคมีที่เวลาใดๆ (q_t) เข้าใกล้ค่าประจุอิ่มตัว (q_s) ดังนั้นเมื่อทราบเวลาในการอัดประจุแล้ว จะสามารถที่จะหาความยาวของชุดอัดประจุทรงกระบอกซ้อนกันแนบกันได้ เมื่อใช้ความเร็วลม 15 m/s สามารถหาความยาวได้จาก

$$L = v \times t$$

$$L = 15 \times 0.02$$

$$L = 0.3 \text{ m}$$

เพื่อระยะความยาวของชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคไว้ประมาณ 1.5 เท่าจะได้ความยาวประมาณ 45 cm



รูปที่ 3.12 ชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนบร่วม

เมื่อทราบขนาดและจัดสร้างชุดอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วมสำหรับการทดสอบแล้ว การเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นเป็นการกำหนดชนิดประจุที่อนุภาคได้รับ ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และในการทดสอบจำเป็นต้องทราบระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการไอออไนเซชัน และแรงดันสูงสุดที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน
(อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันร่วม)

สภาวะแวดล้อม		อุณหภูมิ	28 °C
		ความชื้นสัมพัทธ์	75.8 %
		ระยะแก๊ป	0.6 cm
การไอออไนเซชัน		การทนแรงดันเบรกดาวน	
ครั้งที่	แรงดันไอออไนซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน (kV)
1	3.18	1	8.56
2	3.35	2	8.74
3	3.43	3	8.64
4	3.29	4	8.57
5	3.44	5	8.68
ค่าเฉลี่ย	3.34	ค่าเฉลี่ย	8.64

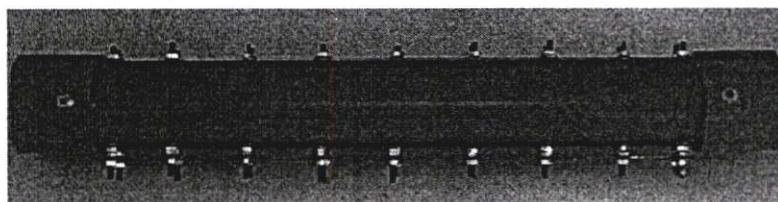
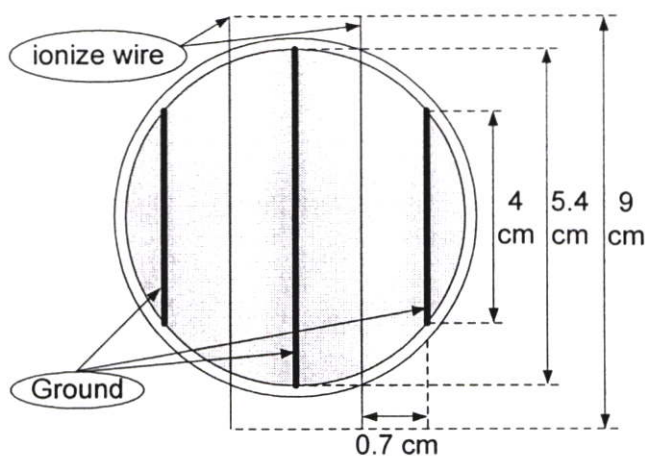
จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถพิจารณาได้จาก ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน โดยอาศัยกระบวนการเบรกดาวนในฉนวนอากาศ ซึ่งได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดไอออไนซ์ประมาณ 3.34 kV ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน 8.64 kV ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นเพื่อต้องการขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด 8 kV จึงสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนกันร่วมได้จากสมการที่ (2.10)

$$E_{r2} = \frac{v}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{8}{0.9 \ln \frac{2.7}{0.9}} = 8.09 \quad \text{kV/cm}$$

$$E_{r1} = \frac{v}{r_0 \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{8}{0.3 \ln \frac{0.9}{0.3}} = 24.27 \text{ kV/cm}$$

จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในชั้นของ E_{r1} จะมีค่าสูงกว่าในชั้น E_{r2} อยู่มาก แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นจะกระทำโดยสนามไฟฟ้า E_{r1}

3.5.2 แบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบกับเส้นลวด เป็นการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย โดยมีลักษณะอิเล็กทรอนิกส์เป็นแผ่นเพลทและแท่งลวดวางสลับกันอยู่ในท่อ PVC ขนาดรัศมีภายใน 2.7 cm (พิจารณาขนาดเท่ากับท่อทางเข้าไซโคลนที่ใช้ในการทดสอบ) เพื่อเปรียบเทียบกับแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแล้วจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์เท่ากันคือ 0.6 cm ใช้แผ่นระนาบหนา 1 mm ขนาดสูง 5.4 cm เท่ากับขนาดท่อ จำนวน 1 แผ่น วางตรงกึ่งกลางท่อ ใช้แท่งลวดไอออนไนซ์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 cm เพื่อไม่ให้เกิดการแกว่งตัวเนื่องจากแรงปะทะของลม ยาว 9 cm เพื่อให้ยาวทะลุท่อสำหรับต่อขั้วแรงดันไฟฟ้า และใช้อิเล็กทรอนิกส์แผ่นระนาบหนา 1 mm ขนาดสูง 4 cm จำนวน 2 แผ่น มาประกบด้านข้างที่ระยะเก็บ 0.6 cm วางซ้อนกันตามความยาวท่อ



รูปที่ 3.13 โครงสร้างชุดอิเล็กทรอนิกส์ระนาบกับเส้นลวด

การเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น เป็นการใช้นามไฟฟ้าเป็นตัวกำหนดชนิดประจุที่อนุภาคได้รับ ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และในการออกแบบอิเล็กโทรดของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าเมื่อทราบขนาดของชุดอิเล็กโทรดจึงคำนวณระดับแรงดันที่จะใช้ในการทดสอบ เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าของการไอออไนเซชันเริ่มเกิดที่ประมาณ 20 kV/cm และแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (η^*) ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอิเล็กโทรด [11] กำหนด 0.5 และสามารถคำนวณแรงดันได้จากสมการ (2.5)

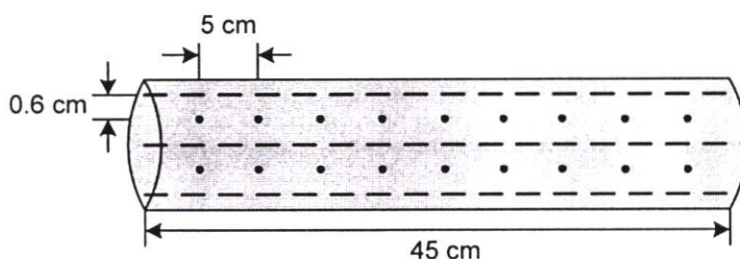
$$E_i = \frac{V_i}{d\eta^*}$$

ดังนั้น

$$V_i = 20 \times 0.6 \times 0.5$$

$$= 6 \text{ kV}$$

จากการคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณระดับแรงดันที่คาดว่าจะก่อให้เกิดการไอออไนซ์สำหรับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบชุดอิเล็กโทรด ซึ่งจากการคำนวณจะมีค่าประจุมัธยัสถ์และความยาวของชุดอิเล็กโทรดเท่ากับอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.5.2



รูปที่ 3.14 ชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคแบบอิเล็กโทรดระนาบกับเส้นลวด

เมื่อสร้างชุดอิเล็กโทรดสำหรับการทดสอบแล้ว การเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นเป็นการกำหนดชนิดประจุที่อนุภาคได้รับ ดังนั้นจึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และในการทดสอบจำเป็นต้องทราบระดับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการไอออไนเซชัน และแรงดันสูงสุดที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์
(อิเล็กโทรดระนาบกับเส้นลวด)

สภาวะแวดล้อม		อุณหภูมิ	28 °C
		ความชื้นสัมพัทธ์	77 %
		ระยะแก๊ป	0.6 cm
การไอออไนเซชัน		การทนแรงดันเบรกดาวน์	
ครั้งที่	แรงดันไอออไนซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
1	2.55	1	8.34
2	2.68	2	8.12
3	2.74	3	8.25
4	2.28	4	8.23
5	2.49	5	8.17
ค่าเฉลี่ย	2.55	ค่าเฉลี่ย	8.22

จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ โดยอาศัยกระบวนการเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ ซึ่งได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดไอออไนซ์ประมาณ 2.55 kV ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ 8.22 kV ดังนั้นจึงเลือกระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแบบระนาบกับเส้นลวด 8 kV ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อินนูกาตผู้่นเพื่อต้องการขีดความสามารถในการคักผู้่นสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแบบอิเล็กโทรดระนาบกับเส้นลวด 8 kV จึงสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบได้จากสมการที่ (2.5) เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า[11] (กำหนด 0.5)

$$\text{จาก } E_i = \frac{V_i}{d\eta^*}$$

$$E_i = \frac{8 \text{ kV}}{0.6 \times 0.5}$$

$$= 26.66 \text{ kV/cm}$$

จะเห็นได้ว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะมีค่า 26.66 kV/cm ซึ่งเป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในการเพิ่มประจุให้อินนูกาต

3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นทั้ง 2 แบบ

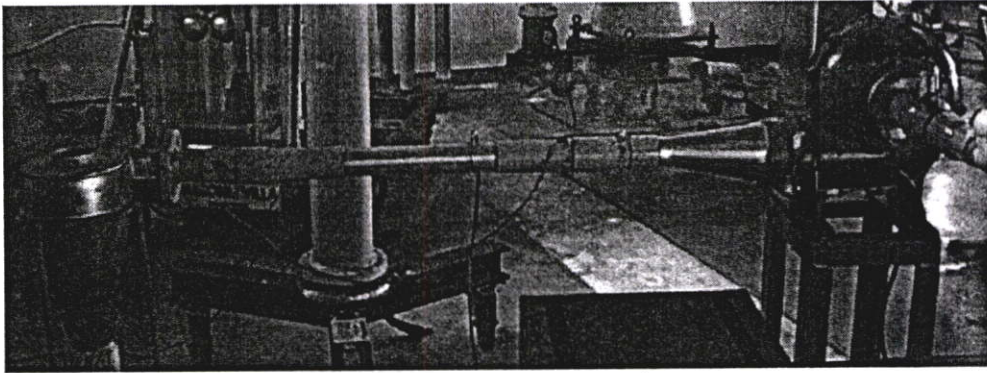
เพื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่เพิ่มขึ้นของไซโคลน เมื่อมีการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น โดยทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมและแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์กับเส้นลวด เมื่อต่อร่วมกับชุดดักฝุ่นแบบไซโคลน เพื่อให้ไซโคลนสามารถดักฝุ่นได้มากขึ้น เพื่อเลือกชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าที่ช่วยให้ไซโคลนมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นได้สูงสุดไปทดสอบร่วมกับอุปกรณ์ดักฝุ่นส่วนอื่นๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV
2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
4. ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์กับเส้นลวด
5. ชุดไซโคลนดักฝุ่น
6. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

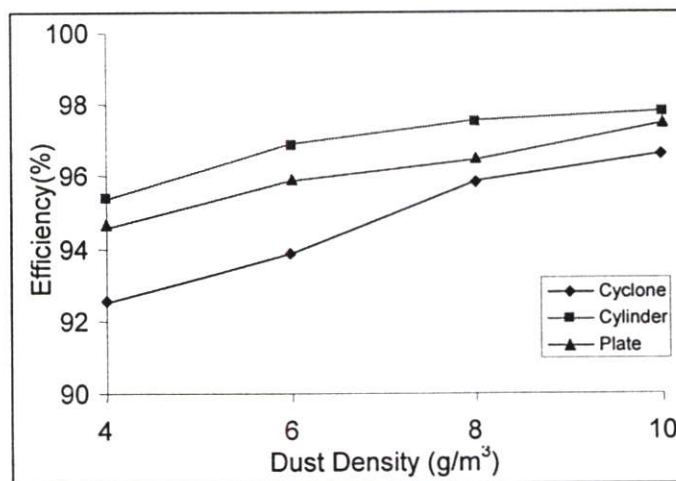
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าบวก 8 kV ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
3. จ่ายฝุ่นที่ความหนาแน่นฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$ ซึ่งมีความเร็วลม 15 m/s เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดพัดลม Blower และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
4. นำถุงดักฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไปกับฝุ่นที่ดักได้ บันทึกผลการทดสอบ
5. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 2 โดยเปลี่ยนชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์เป็นแบบทรานซิมิเตอร์กับเส้นลวด
6. บันทึกผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อเลือกชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิเตอร์สำหรับทดสอบในหัวข้อต่อไป



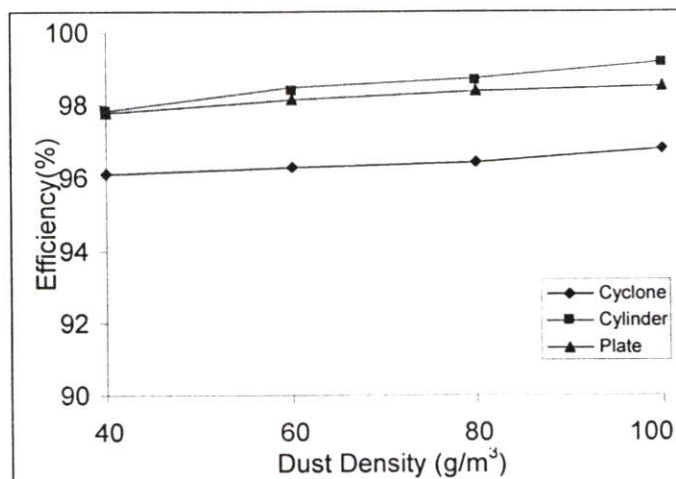
รูปที่ 3.15 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นด้วยชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น

ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 3.16 (ตาราง ง.2, ง.7, ง.8) ผลการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไซโคลนดักฝุ่นที่ไม่ได้รับการเพิ่มประจุให้อนุภาค และเมื่อต่อร่วมกับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นของอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 แบบ โดยทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก 8 kV ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ พบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวมี่ขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 97.63 เปอร์เซ็นต์ และแบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบกับเส้นลวดมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 97.36 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 3.17 (ตาราง ง.5, ง.9, ง.14) ผลการทดสอบที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ พบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.72 เปอร์เซ็นต์ และแบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบกับเส้นลวดมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.34 เปอร์เซ็นต์

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบกับเส้นลวด เมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 2.71 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 1.96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นด้วยแรงดันขั้วบวก และแรงดันขั้วลบ

3.5.4 การทดสอบชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น

เพื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่เพิ่มขึ้นของไซโคลน เมื่อมีการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นด้วยชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม โดยทำการทดสอบด้วยแรงดันขั้วบวก และแรงดันขั้วลบ เพื่อเลือกชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุ ที่ช่วยให้ไซโคลนมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นได้สูงสุด ไปทดสอบร่วมกับอุปกรณ์ดักฝุ่นส่วนอื่นๆ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

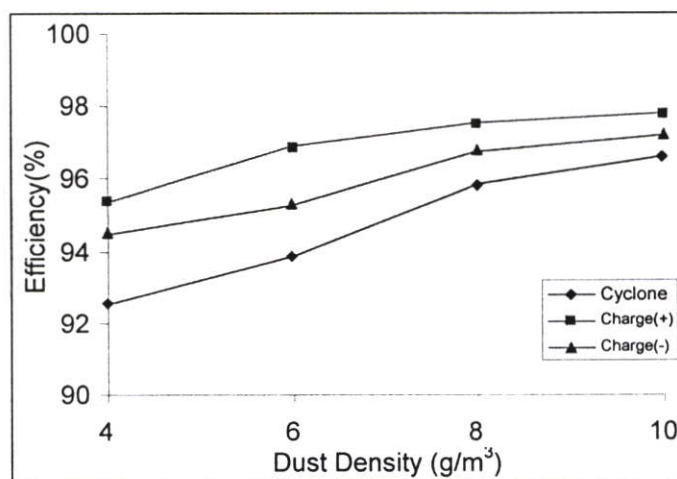
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV
2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน

3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแน่น
4. ชุดไซโคลนดักฝุ่น
5. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนการทดสอบ

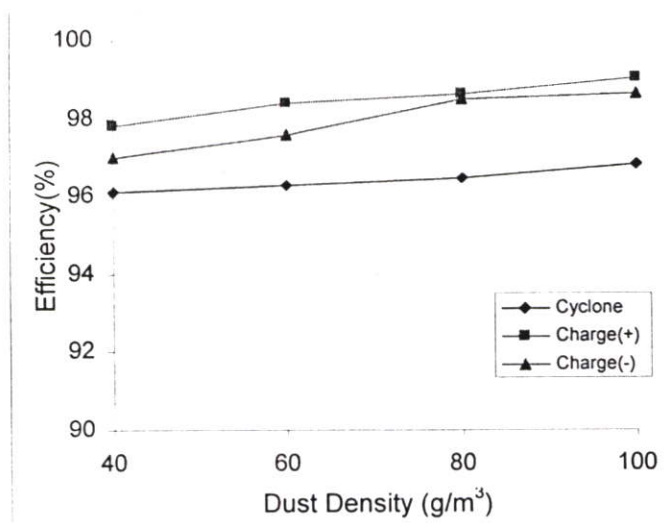
1. ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 8 kV ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแน่น
3. จ่ายฝุ่นที่มีความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³ ซึ่งมีความเร็วลม 15 m/s เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดพัดลม Blower และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
4. นำถุงดักฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไปกับฝุ่นที่ดักได้ บันทึกผลการทดสอบ
5. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 2 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบ 8 kV
6. บันทึกผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อเลือกชนิดของขั้วแรงดันสำหรับทดสอบในหัวข้อต่อไป

ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 3.18 (ตาราง ง.2, ง.8, ง.12) ผลการทดสอบที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ พบว่าอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันแน่นเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 97.63 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 97.16 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.19 เปรียบเทียบชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 3.19 (ตาราง ง.5, ง.9, ง.13) การทดสอบพบว่าอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกัน แกนร่วมเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วบวก ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.72 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.51 เปอร์เซ็นต์

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

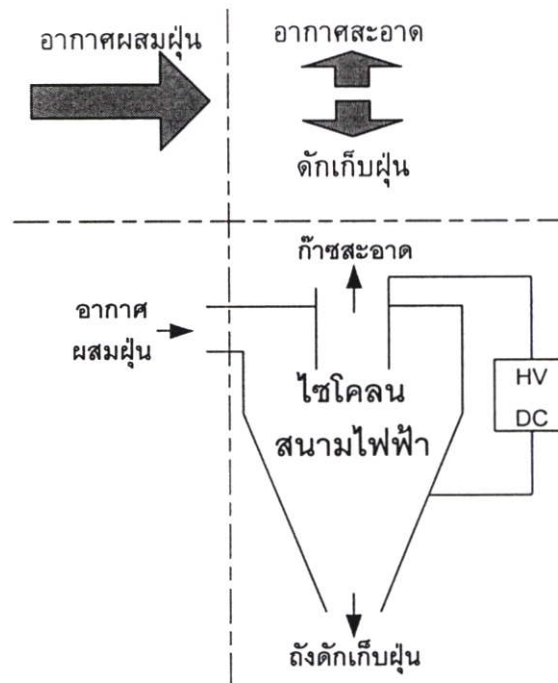
จากการทดสอบพบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกในการเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่น จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงกว่าเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขั้วลบ เมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 2.71 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 1.96 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำชุดอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมที่มีการเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นด้วยแรงดันขั้วบวก มาทำการทดสอบในหัวข้อต่อไป

สรุปการออกแบบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น

ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นแบบอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนได้สูงสุด 98.72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แรงดันขั้วบวกในการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาค และมีประสิทธิภาพการดักฝุ่นเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 2.71 % อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมประกอบด้วยอิเล็กโทรดแผ่นสแตนเลสหนา 0.1 cm (เพื่อให้ไม่มีแรงต้านทานการไหลของอนุภาค) ดัดเป็นท่อชั้นนอก ϕ 5.4 cm ชั้นใน ϕ 1.8 cm และแท่งสแตนเลส ϕ 0.6 cm วางเป็นแกนกลาง แต่ละส่วนวางซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน โดยมีความยาวประมาณ 45 cm

3.6 การออกแบบไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า

เป็นอุปกรณ์ส่วน C ในรูปที่ 3.1 เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้สนามไฟฟ้า ได้นำทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และทฤษฎีทางด้านมลภาวะอากาศมาใช้ในการออกแบบและสร้างไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า ลักษณะอิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าภายในไซโคลนสำหรับดักฝุ่น ซึ่งออกแบบอิเล็กโทรดไว้ 2 ลักษณะคือ แบบอิเล็กโทรดแกนกลางไซโคลน และแบบอิเล็กโทรดแท่งโคโรนา มีหลักการทำงานดังรูปที่ 3.16

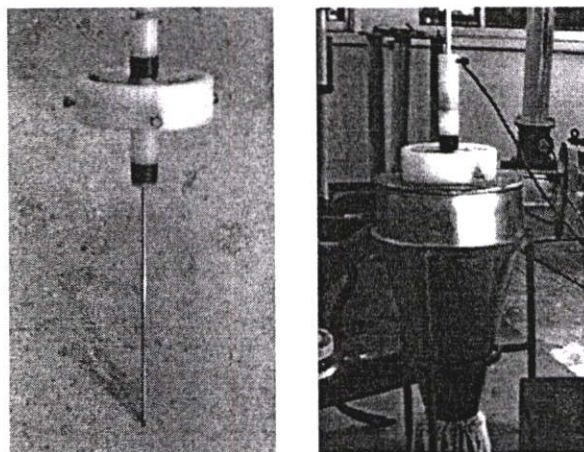


รูปที่ 3.20 โคอะแกรมการทำงานของไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า

หลักการทำงานเมื่อกระแสแก๊ซที่มีอนุภาคฝุ่นผสมอยู่เคลื่อนตัวเข้าไซโคลนซึ่งมีสนามไฟฟ้าอยู่ภายใน โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ให้กับแผ่นอิเล็กโทรดกึ่งกลางไซโคลนและต่อตัวถังของไซโคลนกับกราวด์ จะทำให้แรงสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางจากศักย์ไฟฟ้าที่สูงไปยังศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งแรงของสนามไฟฟ้าและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้อนุภาคฝุ่นมีทิศทางเคลื่อนเข้ากระทบบนผนังของไซโคลน และเคลื่อนตัวตกลงในถังเก็บฝุ่น Hopper ด้านล่างของไซโคลน

3.6.1 การออกแบบอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลนแบบอิเล็กโทรดแท่งโคโรนา

ชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลนแบบแท่งโคโรนา เพื่อไม่ให้มีการต้านการไหลของกระแสก๊าซและมีความเป็นไปได้ในการใช้งาน อิเล็กโทรดควรมีขนาดเล็กและแข็งแรงไม่เกิดการสั่นหรือแกว่งขณะทดสอบ จึงใช้แท่งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.48 cm ยาว 50 cm ติดตั้งอยู่กึ่งกลางภายในตัวไซโคลนตามความยาวทรงกระบอกตัวถังของไซโคลนลึก 8 cm ซึ่งมีสัปดาห์ไฟฟ้าตรงกันข้ามกับตัวถังของไซโคลน



รูปที่ 3.21 ชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแท่งโคโรนา

การสร้างสนามไฟฟ้าภายในไซโคลน จะเกิดแรงของสนามไฟฟ้าซึ่งจะมีทิศทางจากศักย์สูงไปยังศักย์ที่ต่ำกว่า เพื่อเป็นการกำหนดทิศทางของแรงสนามไฟฟ้าจึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ในการออกแบบอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแท่งโคโรนา จำเป็นต้องทราบระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่เกิดการไอออไนเซชัน และแรงดันสูงสุดที่ชุดทดสอบสามารถทนได้ โดยทดสอบด้วยแรงดันชั่วคราวด้วยสมมติฐานที่ต้องการกำหนดทิศทางของแนวแรงสนามไฟฟ้าที่เสริมกับแรงหนีศูนย์กลาง

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของชุดอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแท่งโคโรนา

สภาวะแวดล้อม		อุณหภูมิ : 27.41 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ : 75.8 % ระยะเก็บ : 9.76 cm	
การไอออนในเซชัน		การทนแรงดันเบรกดาวน์	
ครั้งที่	แรงดันไอออนไนซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
1	1.609	1	37.56
2	1.872	2	38.41
3	1.726	3	38.07
4	1.680	4	37.18
5	1.803	5	37.09
ค่าเฉลี่ย	1.74	ค่าเฉลี่ย	37.66

จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถพิจารณาได้จาก ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ โดยอาศัยกระบวนการเบรกดาวน์ในฉนวนอากาศ ซึ่งได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดไอออนไนซ์ประมาณ 1.74 kV ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ 37.66 kV ดังนั้นจึงเลือกแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอก 30 kV

หาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวของอิเล็กโทรดแบบแท่งโคโรนา จากสมการที่ 2.10

$$E = \frac{V}{r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

ดังนั้น

$$E = \frac{30\text{kV}}{0.24 \ln \left(\frac{10}{0.24} \right)}$$

$$= 33.5 \text{ kV/cm}$$

ประจุอิมิตัวหรือขีดจำกัดของประจุที่ใส่ให้กับอนุภาคได้โดยสนามไฟฟ้านี้ค่าของประจุอิมิตัว q_s จะหาได้จากสมการ 2.16

$$q_s = 12 \times \left[\frac{3}{3+2} \right] \times (0.25 \times 10^{-6})^2 \times \pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 3.35 \times 10^6$$

$$= 4.19 \times 10^{-17} \text{ C}$$

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุ q ภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตสูงสุดจะเกิดใกล้ไอเล็กโทรดโคโรนา และสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.19

$$F_e = qE$$

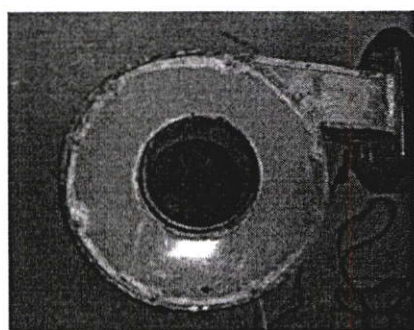
ดังนั้น

$$F_e = (4.19 \times 10^{-17})(3.35 \times 10^6)$$

$$= 1.4 \times 10^{-10} \text{ N}$$

แบบไอเล็กโทรดแกนกลางไซโคลน

ชุดไอเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแกนกลางไซโคลน โดยใช้แกนกลางไซโคลนที่เป็นท่อทางออกของก๊าซทำหน้าที่เป็นไอเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm ยาว 8 cm ตามความยาวแกนกลางของไซโคลน ซึ่งติดตั้งอยู่กึ่งกลางภายในตัวไซโคลน ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าตรงกันข้ามกับตัวถังของไซโคลน



รูปที่ 3.22 ชุดไอเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแกนกลางไซโคลน

การสร้างสนามไฟฟ้าภายในไซโคลน จะเกิดแรงของสนามไฟฟ้าซึ่งจะมีทิศทางจากศักย์สูงยังศักย์ที่ต่ำกว่า เพื่อเป็นการกำหนดทิศทางของแรงสนามไฟฟ้าจึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และในการออกแบบไอเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบแกนกลาง

ไซโคลน จำเป็นต้องทราบระดับแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่เกิดการไอออไนเซชัน และแรงดันสูงสุดที่ชุดทดสอบสามารถทนได้

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์
สนามไฟฟ้าแบบแกนกลางไซโคลน

สถานะแวดล้อม		อุณหภูมิ	27.41 C ^o
		ความชื้นสัมพัทธ์	75.8 %
		ระยะแก๊ป	0.6 cm
ครั้งที่	แรงดันไอออไนซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกดาวน์ (kV)
1	15.54	1	36.56
2	17.39	2	35.74
3	15.73	3	35.64
4	15.19	4	34.57
5	16.25	5	36.68
ค่าเฉลี่ย	16.02	ค่าเฉลี่ย	35.84

จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถพิจารณาได้จาก ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ โดยอาศัยกระบวนการเบรกดาวน์ ในฉนวนอากาศ ซึ่งได้ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดไอออไนซ์ประมาณ 16.02 kV ค่าแรงดันเฉลี่ยที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์ 35.84 kV ดังนั้นจึงเลือกแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบทรงกระบอก 30 kV หาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์แบบแกนกลางไซโคลน ได้จากสมการ 2.10

$$E = \frac{V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

ดังนั้น

$$E = \frac{30\text{kV}}{4 \ln\left(\frac{10}{4}\right)}$$

$$= 8.19 \text{ kV/cm}$$

ประจุอิมิตหรือขีดจำกัดของประจุที่ใส่ให้กับอนุภาคได้โดยสนามไฟฟ้านี้ค่าของประจุอิมิตตัว q_s จะหาได้จากสมการ 2.16

$$q_s = 12 \times \left[\frac{3}{3+2} \right] \times (0.25 \times 10^{-6})^2 \times \pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 819 \times 10^3$$

$$= 3.26 \times 10^{-18} \quad \text{C}$$

ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาคของอนุภาคที่มีประจุ q เมื่อเทียบกับกระแสแก๊ส การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยแรงเชิงไฟฟ้าสถิต ซึ่งแรงเชิงไฟฟ้าสถิตสูงสุดสามารถคำนวณได้โดยสมการ 2.19

$$F_c = qE$$

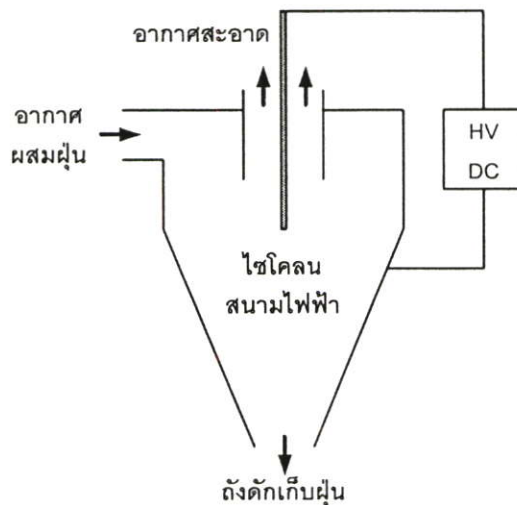
ดังนั้น

$$F_c = (3.26 \times 10^{-18})(819 \times 10^3)$$

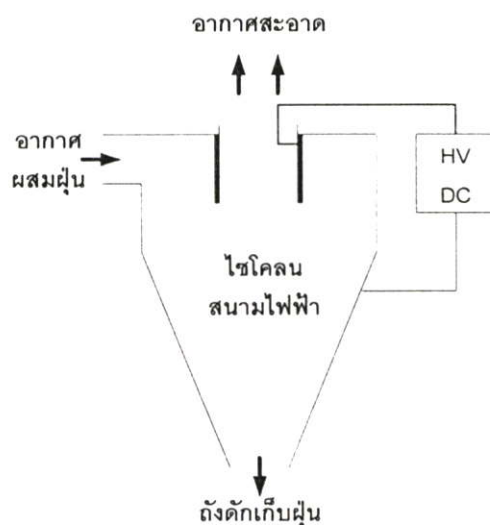
$$= 2.67 \times 10^{-12} \quad \text{N}$$

3.6.2 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้ากับอิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆ

การทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่นแบบมีสนามไฟฟ้า จะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 2 แบบ เพื่อให้ไซโคลนสามารถดักฝุ่นได้มากขึ้น และเลือกชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีที่สุดไปทดสอบร่วมกับอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอื่น ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 3.23 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลนแบบอิเล็กทรอนิกส์โคโรนา



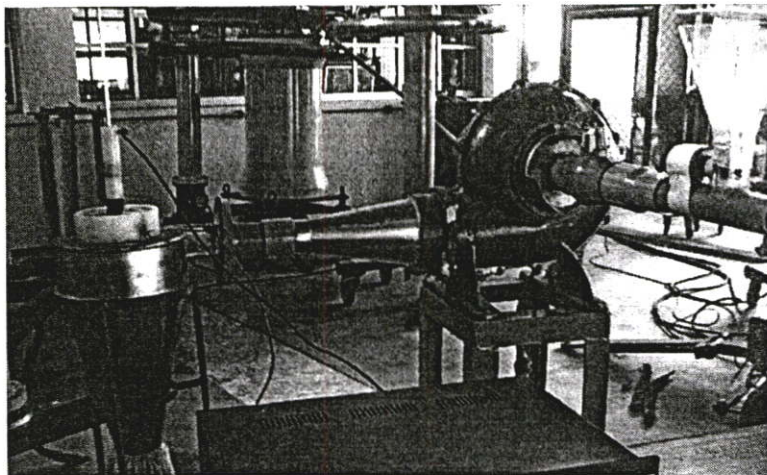
รูปที่ 3.24 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า
ในไซโคลนแบบอิเล็กทรอนิกส์แกนกลางไซโคลน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV
2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งโคโรนา
4. ชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแกนกลางไซโคลน
5. ชุดไซโคลนดักฝุ่น
6. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนการทดสอบ

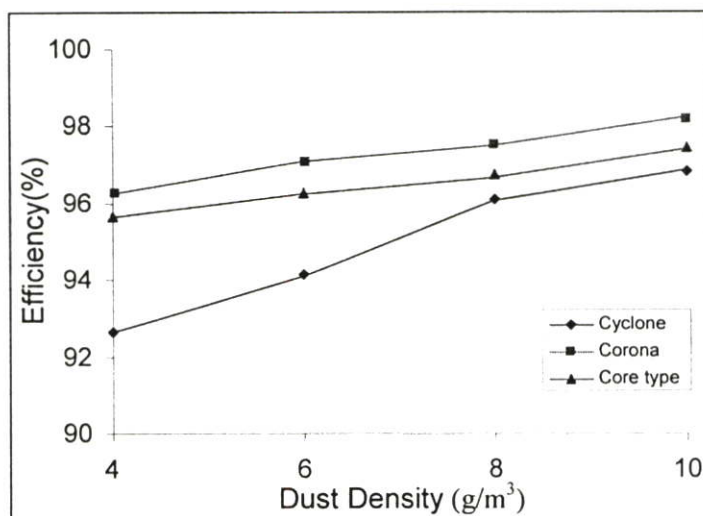
1. ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 30 kV ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์
3. จ่ายฝุ่นที่ความหนาแน่นฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$ ซึ่งมีความเร็วลม 15 m/s เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดพัดลม Blower และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
4. นำถุงดักฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไปกับฝุ่นที่ดักได้
5. ทำการทดสอบซ้ำ โดยเปลี่ยนชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแกนกลางไซโคลน
6. บันทึกผลการทดสอบ และเปรียบเทียบผลการทดสอบเพื่อเลือกลักษณะอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.25 การทดสอบประสิทธิภาพการดักด้วยฝุ่นไซโคลนสนามไฟฟ้า

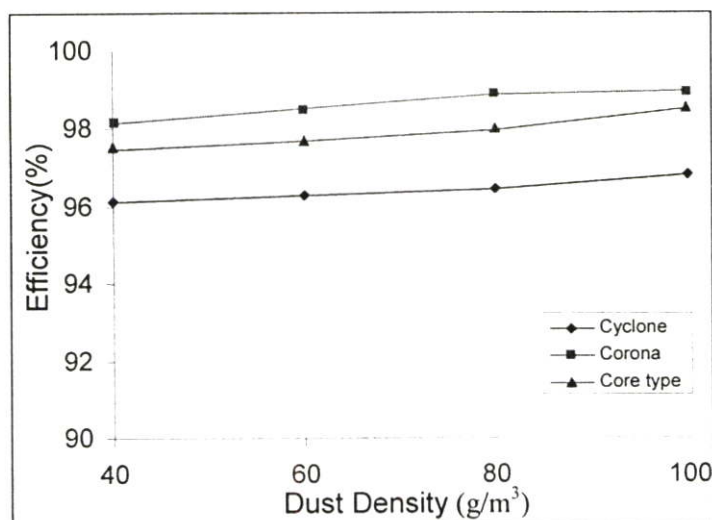
ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไซโคลนดักฝุ่นที่ไม่มีสนามไฟฟ้า และเมื่อต่อร่วมกับอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าด้วยอิเล็กโทรดทั้ง 2 แบบ โดยทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 30 kV ขั้วบวก



รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าของชุดอิเล็กโทรดแบบต่างๆ ที่อัตราการความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

ผลการทดสอบ(ตาราง ง.2, ง.15, ง16) พบว่าชุดอิเล็กโทรดแบบอิเล็กโทรดโคโรนาจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนได้ดีกว่าอิเล็กโทรดแบบแกนกลางไซโคลน โดยมีขีดความสามารถสูงสุดอยู่ที่ 97.74 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำมาทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่นสูง 40-100 g/m³



รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าของชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบต่างๆ ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

ผลการทดสอบ(ตาราง ง.5, ง.17, ง.18) พบว่าชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดโคโรนาจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนได้ดีกว่าอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบแกนกลางไซโคลน โดยมีขีดความสามารถสูงสุดอยู่ที่ 98.73 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงนำมาทดสอบแรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงขั้วบวก และขั้วลบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบแท่งโคโรนา จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงกว่า เมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 3.73 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 1.97 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบแท่งโคโรนา มาทำการทดสอบในหัวข้อต่อไป

3.6.3 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้ากับชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่นแบบมีสนามไฟฟ้า จะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกหรือขั้วลบ เพื่อให้ไซโคลนสามารถดักฝุ่นได้มากขึ้น และเลือกชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดที่ดีที่สุดไปทดสอบร่วมกับอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดอื่น ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

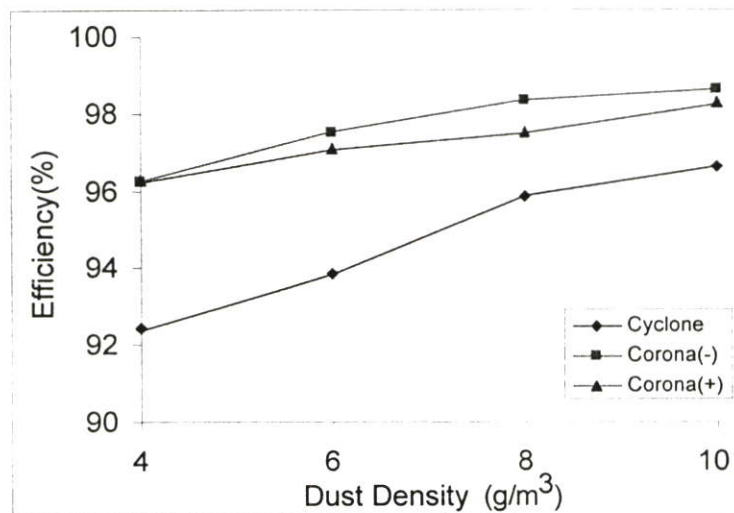
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV

2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งโคโรนา
4. ชุดไซโคลนดักฝุ่น
5. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนการทดสอบ

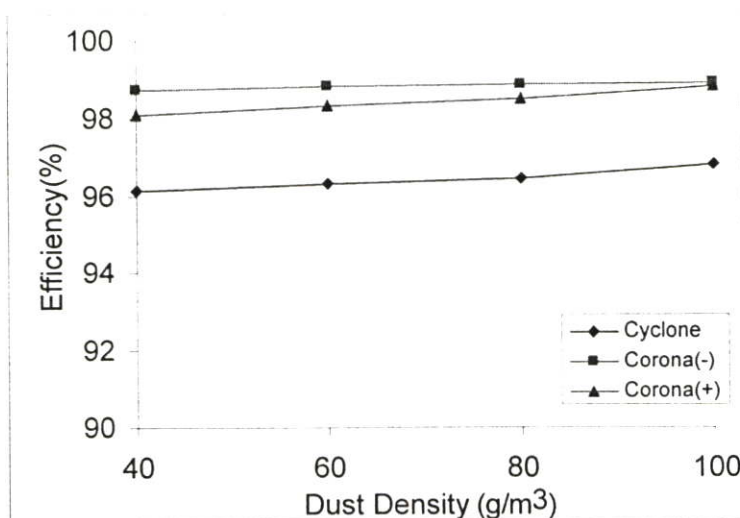
1. ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 30 kV ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์
3. จ่ายฝุ่นที่มีความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³ ซึ่งมีความเร็วลม 15 m/s เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดพัดลม Blower และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
4. นำถุงดักฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไปกับฝุ่นที่ดักได้
5. ทำการทดสอบซ้ำข้อ 2 โดยเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าขั้วลบ 30 kV
6. บันทึกผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.28 ประสิทธิภาพของชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า กับชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 3.28 (ตาราง ง.2, ง.16, ง.19) ผลการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ พบว่าชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่งโคโรนาเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกสร้างสนามไฟฟ้า โดยมีขีดความสามารถสูงสุดอยู่ที่ 98.15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.29 ประสิทธิภาพของชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า กับชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 3.29 (ตาราง ง.5, ง.17, ง.20) ผลการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ พบว่า ชุดอิเล็กโทรดแบบแท่งโคโรนาเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบ จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวก โดยมีขีดความสามารถสูงสุดอยู่ที่ 98.90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพการดักฝุ่น การใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วลบกับอิเล็กโทรดแบบแท่งโคโรนาเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงขึ้น เมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 4 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 3.75 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 40 g/m³ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนเดิมขึ้นอีกประมาณ 2.47 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้อิเล็กโทรดแบบแท่งโคโรนามาทำการทดสอบร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ในหัวข้อต่อไป

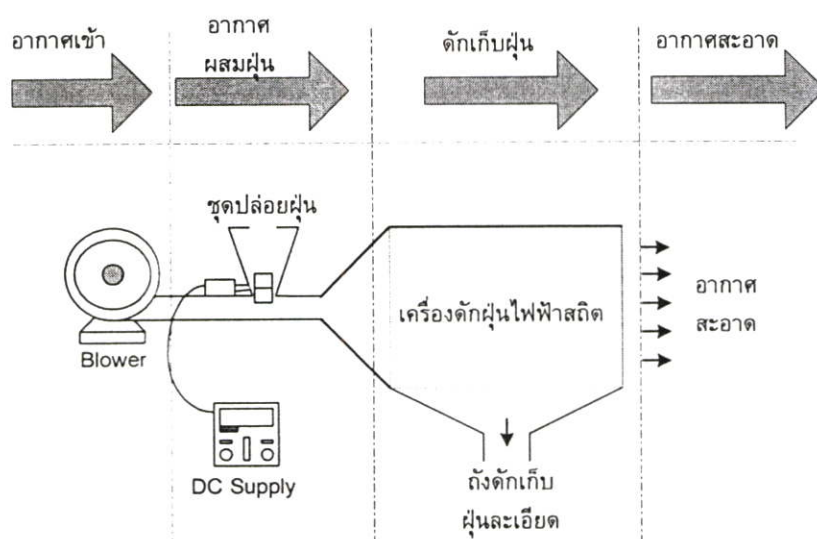
สรุปการออกแบบชุดดักฝุ่นด้วยอิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน

ชุดดักฝุ่นด้วยไซโคลนสนามไฟฟ้าประกอบด้วย อิเล็กโทรดสร้างสนามไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรดโคโรนา สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนได้สูงกว่าไซโคลนแบบเดิม โดยมีขีดความสามารถสูงสุดที่ 98.9 เปอร์เซ็นต์ และมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงกว่าอิเล็กโทรดแบบแกนกลางไซโคลน เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ ทิศทางของแรงสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกันแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลให้เกิดแรงสนามไฟฟ้าผลักร้อนภาค

ไม่ให้ฝุ่นเกาะที่ผิวด้านในของไซโคลนและลดแรงเสียดทานพื้นผิว อิเล็กโทรดแบบแท่งโคโรนาจะประกอบด้วยแท่งสแตนเลส ϕ 0.48 cm ยาว 30 cm ติดตั้งอยู่กึ่งกลางไซโคลน ยาว 8 cm ตามความยาวตัวถังไซโคลน

3.7 การออกแบบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ

เป็นอุปกรณ์ส่วน D ในรูปที่ 3.1 ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบจะต่อหลังจากไซโคลน ที่ท่อทางออกก๊าซดีทางด้านบนเพื่อดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งไซโคลนไม่สามารถดักได้ โดยออกแบบลักษณะอิเล็กโทรด 2 แบบ คือ แบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวนสองชั้นและแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวนชั้นเดียว



รูปที่ 3.38 โดอะแกรมการทำงานของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ

จากรูป 3.38 เป็นชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ เมื่อมีอากาศไหลผ่านชุดปล่อยฝุ่นจะเกิดเป็นอัตราความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ จากนั้นไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ โดยอาศัยหลักการสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุสถิตทำการดักฝุ่นที่ผสมมากับอากาศ เพื่อให้อากาศสะอาดก่อนจะไหลสู่ภายนอก

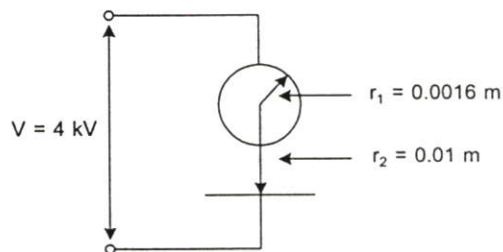
3.7.1 อิเล็กโทรดแบบฉนวนสองชั้น

ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวนสองชั้น อาศัยวิธีการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณฉนวนอากาศด้วยเทคนิคการฉนวนสองชั้น โดยการเคลือบอิเล็กโทรดด้วยชั้นฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ โดยจะมีลักษณะของแผ่นอิเล็กโทรดเป็นเพลททองแดงเคลือบด้วยฉนวนอีพ็อกซีหนา 2 mm ลวดโคโรนาจากเป้าหมายตอนแรกได้เลือกใช้

ลวดสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm แต่เนื่องจากว่าลวดขนาดที่เลือกใช้มีขนาดเล็กทำให้การยึดลวดให้อยู่ตรงกลางทำได้ลำบาก มีการโค้งงอ จึงเปลี่ยนมาเลือกใช้ลวดสแตนเลสแบบแท่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm แทน

คำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณที่อัดประจุ (E_0)

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณที่อัดประจุ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วมโดยมีรัศมีของ r_1 คือรัศมีของเส้นลวดโคโรนา(0.0016 m) และรัศมีของ r_2 คือจากจุดศูนย์กลางของเส้นลวดโคโรนาไปจนถึงแผ่นเพลท(0.01 m) จากการศึกษาดูงาน เครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่โรงงานผลิตปูนซิเมนต์ตราช้าง จ.สระบุรี พบว่าเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นแบบฉนวนชั้นเดียวคือฉนวนอากาศ ใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 4 kV/cm ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกความเข้มสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกัน คือในย่านดักฝุ่นที่เป็นฉนวนชั้นเดียวมีระยะเก็บ 1 cm จึงใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 4 kV สำหรับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ดังนั้นจึงใช้สมการคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ของทรงกระบอกซ้อนกันแกนร่วม นั่นคือ



รูปที่ 3.39 ระยะห่างระหว่างลวดโคโรนาและอิเล็กโทรดเพลทในย่านอัดประจุ

$$E_0 = \frac{V}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

เพราะฉะนั้นค่า

$$E_0 = \frac{4 \text{ kV}}{0.16 \ln\left(\frac{1}{0.16}\right)}$$

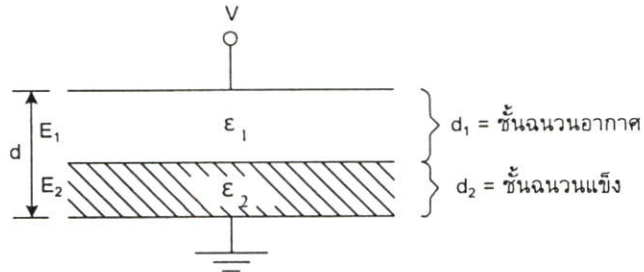
$$= 13.64 \text{ kV/cm}$$

ค่าของประจุอิมิตัว (q_s) ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคฝุ่นและความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จาก

$$q_s = 12 \times \left[\frac{3}{3+2} \right] \times (0.25 \times 10^{-6})^2 \times \pi \times 8.854 \times 10^{-12} \times 1.364 \times 10^6$$

$$= 1.71 \times 10^{-17} \text{ C}$$

ค่า E_p เป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลทในย่านดักฝุ่น ซึ่งลักษณะการวางของแผ่นเพลทเป็นการวางขนานกันไปในระยะเท่าๆกันในทุกๆแผ่น ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็เป็นสนามไฟฟ้าประเภทที่เกิดขึ้นกันอย่างสม่ำเสมอไปตลอดทั้งแผ่น

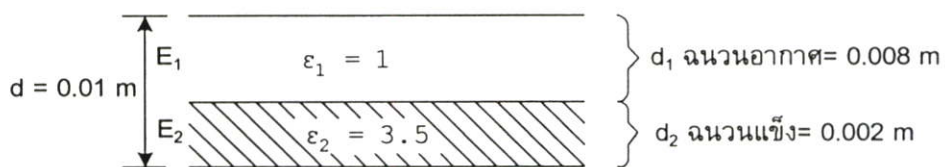


รูปที่ 3.40 ฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ในส่วนของการฉนวนนั้นเมื่อวางแผ่นเพลทซ้อนกันแล้วก็จะเกิดเป็นฉนวนสองชั้นขึ้นมา ดังแสดงในรูป 3.40 คือในชั้นแรกคือชั้นฉนวนที่เป็นอากาศและในส่วนที่สองคือชั้นที่เป็นฉนวนของแข็ง โดยค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่ฉนวนทั้งสองชั้น โดยในแต่ละชั้นนั้นจะไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นในการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงต้องคำนวณในส่วนของฉนวนทั้งสองชั้น ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณคือสมการชั้นฉนวนซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$E_1 = \frac{V}{d} \cdot \frac{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$

$$E_2 = \frac{V}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1}$$



รูปที่ 3.41 ความหนาของฉนวนในแต่ละชั้นที่ใช้ในย่านดักฝุ่น

เพราะฉะนั้นจะได้

$$E_1 = \frac{4 \text{ kV}}{0.01} \cdot \frac{\frac{3.5}{1}}{\frac{0.008}{0.01} \left(\frac{3.5}{1} - 1 \right) + 1}$$

$$= 466,667 \text{ V/m}$$

และ

$$E_2 = \frac{4 \text{ kV}}{0.01} \cdot \frac{1}{\frac{0.008}{0.01} \left(\frac{3.5}{1} - 1 \right) + 1}$$

$$= 133,333 \text{ V/m}$$

เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้า E_2 เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในเนื้อฉนวนแข็ง ส่วนความเข้มสนามไฟฟ้า E_1 เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าในฉนวนอากาศ ซึ่งเป็นทางผ่านของกระแสก๊าซและอนุภาคฝุ่น ดังนั้นจึงคำนวณความเร็วในการเคลื่อนย้ายอนุภาคในชั้นฉนวนอากาศนี้

คำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนย้ายอนุภาค (w)

ความเร็วในการเคลื่อนย้ายอนุภาค (Migration Velocity) [13] นั้นหมายความว่า ความเร็วสัมพัทธ์ที่ปลายของอนุภาคที่มีประจุ q เมื่อเทียบกับกระแสแก๊ซซึ่งมีค่าความหนืดของแก๊ซ (ที่บรรยากาศเท่ากับ $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m.sec}$) [5] ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.21

$$w = \frac{q_s E_p}{6\pi a_p \mu}$$

$$w = \frac{(1.71 \times 10^{-17})(466,667)}{6\pi(1 \times 10^{-6})(1.8 \times 10^{-5})}$$

$$= 0.02 \text{ m/s}$$

คำนวณหาปริมาตรอากาศ (Q)

วิทยานิพนธ์นี้มีการทดสอบร่วมกับเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน ดังนั้นปริมาตรอากาศที่ไหลเข้าในตัวเครื่องจึงมีค่าเท่ากับปริมาตรอากาศที่ทางออกของไซโคลนและความเร็วลมที่ท่อทางออกของไซโคลนซึ่งวัดได้ 5.5 m/s จึงคำนวณปริมาตรอากาศที่ไหลเข้าเครื่องได้โดย

$$Q = vA$$

$$= (5.5 \text{ m/s}) \times (0.025 \text{ m}^2)$$

$$= 0.138 \text{ m}^3/\text{s}$$

คำนวณพื้นที่หน้าตัดด้านลมเข้าของเครื่อง (A)

ความเร็วลมที่ไหลในเครื่องไม่ควรเกิน 1 m/s [7] เนื่องจากความยาวของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดจะมีความยาวมากจะทำให้เกิดปัญหาแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดโค้งงอขึ้นได้ ดังนั้นจึงเลือกความเร็วลมที่ 0.75 m/s และ Q ที่ $0.138 \text{ m}^3/\text{s}$ จึงสามารถคำนวณขนาดของพื้นที่หน้าตัดของเครื่องคักฝุ่นคือที่ขนาด 0.184 m^2 หรือประมาณ $31 \text{ cm} \times 59 \text{ cm}$

$$A = \frac{Q}{v}$$

จะได้

$$A = \frac{0.138 \text{ m}^3/\text{s}}{0.75 \text{ m/s}}$$

$$= 0.184 \text{ m}^2$$

คำนวณความยาวของอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลท (L)

การหาขนาดของความยาวอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลท ซึ่งกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลท (h) 0.01 m ความเร็วลมที่ไหลภายในเครื่อง 0.75 m/s

$$L = \frac{vh}{w}$$

จะได้

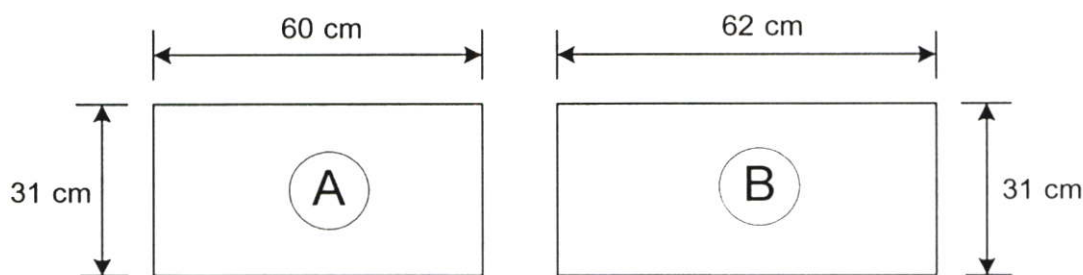
$$L = \frac{0.75 \text{ m/s} \times 0.01 \text{ m}}{0.02 \text{ m/s}}$$

$$L = 0.375 \text{ m}$$

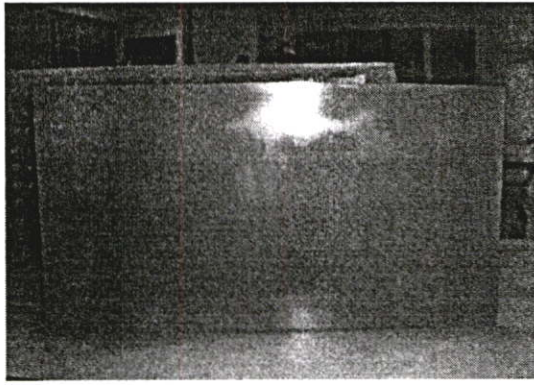
เพื่อระยะความยาวของแผ่นคักฝุ่นไว้ประมาณ 1.5 เท่า จะได้ระยะความยาวที่ 60 cm

การออกแบบตำแหน่งและการจัดวางอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลท

เนื่องจากเครื่องคักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตได้ออกแบบโดยมีอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลทที่ใช้จับฝุ่นและอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลทที่ผลักฝุ่นจึงต้องใช้แผ่นเพลททั้งสองวางขนานกัน

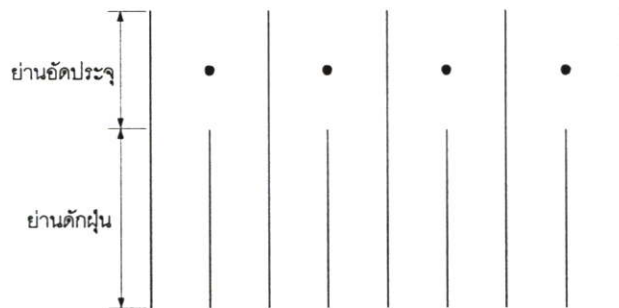


รูปที่ 3.42 ขนาดของอิเล็กทรอนิกส์โทรดเพลทที่ใช้ทั้งสองขนาด



รูปที่ 3.43 ลักษณะของอิเล็กโทรดเพลทเคลือบฉนวนอิพ็อกซีที่ใช้ในการทดสอบ

โดยอิเล็กโทรด A เป็นส่วนของชุดดักฝุ่นคือแผ่นที่มีขนาด 60 cm x 31 cm และอิเล็กโทรด B เป็นส่วนของชุดดักฝุ่นและชุดอัดประจุมีขนาด 62 cm x 31 cm ซึ่งคือแผ่นที่มีขนาดยาวกว่าและวางสลับกัน โดยมีเส้นลวดโคโรนาอยู่ในแนวเดียวกับอิเล็กโทรดเพลท A และอยู่ระหว่างอิเล็กโทรดเพลท B ดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.44 การวางแผ่นเพลทกับเส้นลวดโคโรนา

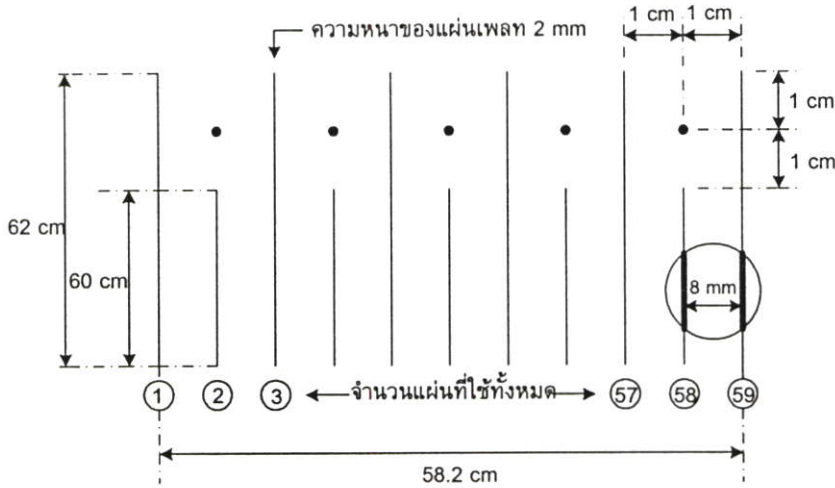
การวางระยะต่างๆของแผ่นเพลทกับเส้นลวดโคโรนา ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทแต่ละแผ่นจากระยะที่ได้คำนวณคือวางห่างกันแผ่นละ 1 cm ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนช่องทางเข้าของก๊าซได้จากสมการที่ 2.25

$$N_d = \frac{Q}{2MV_1h}$$

$$N_d = \frac{0.138}{2(0.01)(0.75)(0.31)}$$

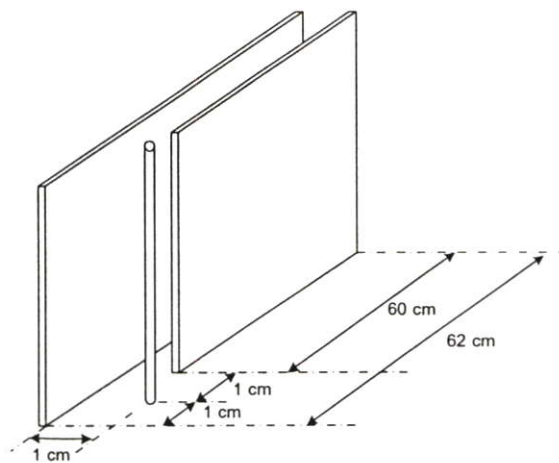
$$N_d = 29.67 \quad \text{ช่อง}$$

จากการคำนวณจะได้จำนวนช่องทางเข้าของก๊าซทั้งหมด 29 ช่อง ซึ่งเป็นจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดทั้งหมด 59 แผ่น ซึ่งจะได้ความกว้างของเครื่อง 58.2 cm โดยระยะห่างระหว่างเส้นลวดโคโรนา กับแผ่นเพลท B จะเท่ากับ 1 cm และระยะห่างจากเส้นลวดโคโรนา กับแผ่นดักฝุ่นเพลท A จะห่างเท่ากับ 1 cm ซึ่งก็คือระยะที่นำไปใช้คำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณอัดประจุ (E_0) นั้นเอง และเมื่อคิดความหนาของชั้นฉนวนอีพ็อกซี 2 mm ก็จะได้ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองแผ่นซึ่งก็คือ 8 mm ซึ่งค่าระยะต่างๆ และจำนวนแผ่นเพลทกับจำนวนของเส้นลวดโคโรนาที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูป 3.45, 3.46 และ 3.47



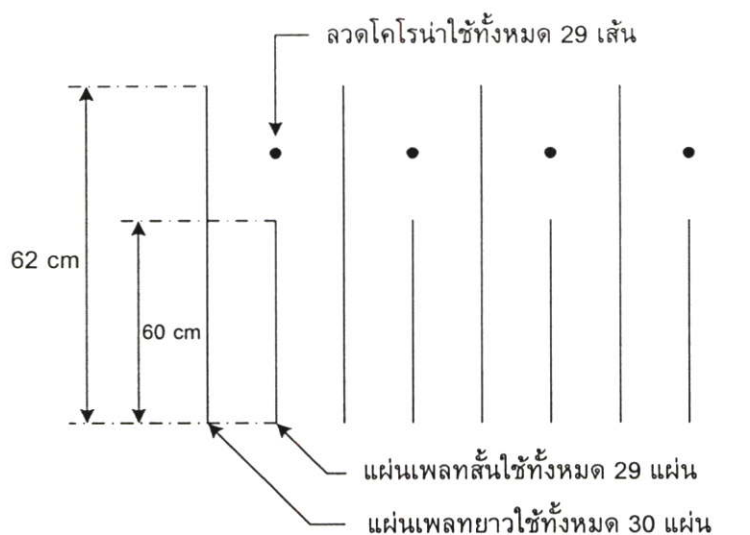
รูปที่ 3.45 ระยะห่างในการติดตั้งอิเล็กโทรดเพลท

จากรูปที่ 3.45 เป็นลักษณะการติดตั้งอิเล็กโทรดและขนาดของระยะแก็ปที่ใช้ในการออกแบบ โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรด 59 แผ่น



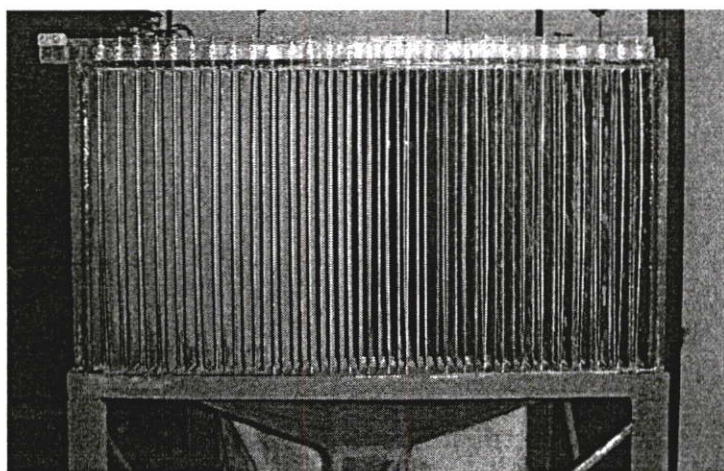
รูปที่ 3.46 ระยะห่างในการติดตั้งลวดโคโรนา

จากรูป 3.46 เป็นตำแหน่งการติดตั้งอิเล็กโทรดโคโรนา และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด รวมถึงความยาวของชุดอิเล็กโทรด



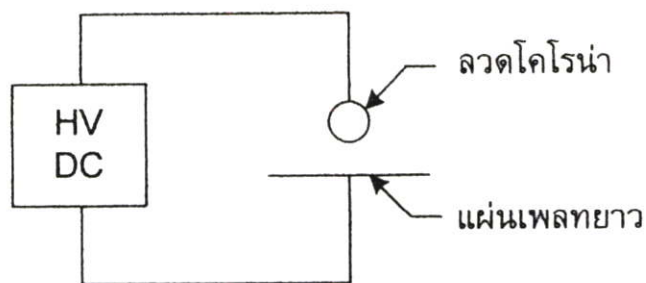
รูปที่ 3.47 จำนวนอิเล็กโทรดเพลทและจำนวนลวดโคโรนา

จากรูปแสดงจำนวนแผ่นอิเล็กโทรดและความยาวของชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยอิเล็กโทรดสั้น 29 แผ่น อิเล็กโทรดยาว 30 แผ่น และลวดโคโรนา 29 เส้น



รูปที่ 3.48 ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบจนวน 2 ชั้น

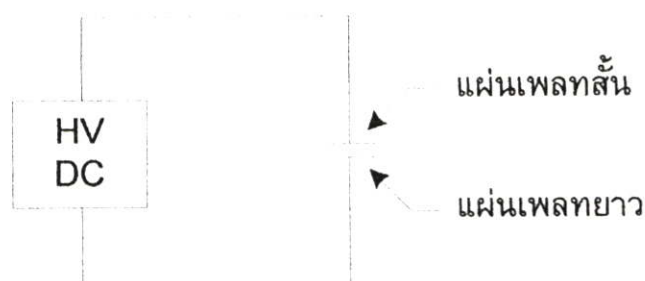
เมื่อออกแบบและสร้างอิเล็กโทรดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต จึงทดสอบแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่เกิดการไอออไนเซชัน และแรงดันสูงสุดที่ชุดอิเล็กโทรดสามารถทนได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกควาน์ในย่านอัดประจุ และค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกควาน์ย่านดักฝุ่น



รูปที่ 3.49 วงจรการทดสอบแรงดันเบรกควาน์ในย่านอัลตราสูง

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกควาน์ในย่านอัลตราสูง

สภาวะแวดล้อม		อุณหภูมิ : 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ : 82 % ระยะเก็บ : 1 cm	
ครั้งที่	แรงดันไออินซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกควาน์ (kV)
1	5.12	1	9.38
2	5.66	2	9.43
3	5.49	3	9.00
4	4.99	4	9.80
5	4.56	5	8.81
6	5.44	6	9.99
7	4.92	7	9.91
8	6.23	8	9.30
9	6.31	9	9.86
10	5.44	10	9.11
ค่าเฉลี่ย	5.42	ค่าเฉลี่ย	9.46



รูปที่ 3.50 วงจรการทดสอบแรงดันเบรกคาวน์ในย่านคักฝุ่น

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกคาวน์ในย่านคักฝุ่น

สภาวะแวดล้อม		อุณหภูมิ : 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์ : 82 % ระยะเก็บ : 1 cm	
ครั้งที่	แรงดันไอออไนซ์ (kV)	ครั้งที่	แรงดันเบรกคาวน์ (kV)
1	9.86	1	11.47
2	9.47	2	12.76
3	10.21	3	12.30
4	9.88	4	12.35
5	10.58	5	12.27
6	9.35	6	12.83
7	9.55	7	12.06
8	9.76	8	12.41
9	10.56	9	12.32
10	9.84	10	12.10
ค่าเฉลี่ย	9.91	ค่าเฉลี่ย	12.29

จากการทดสอบในย่านอัดประจุพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์เฉลี่ยอยู่ที่ 5.42 kV และแรงดันเบรกคาวน์เฉลี่ยอยู่ที่ 9.46 kV การทดสอบในย่านคักฝุ่นพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์เฉลี่ยอยู่ที่ 9.91 kV และแรงดันเบรกคาวน์เฉลี่ยอยู่ที่ 12.29 kV ในการทดสอบเล็กระดับแรงดันที่ 4 kV เนื่องจากเป็นแรงดันที่จะได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกับความเข้มสนามไฟฟ้าของเครื่องคักฝุ่นไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในอุตสาหกรรม และไม่ทำให้เกิดการเบรกคาวน์เมื่อมีการทดสอบเป็นเวลานาน

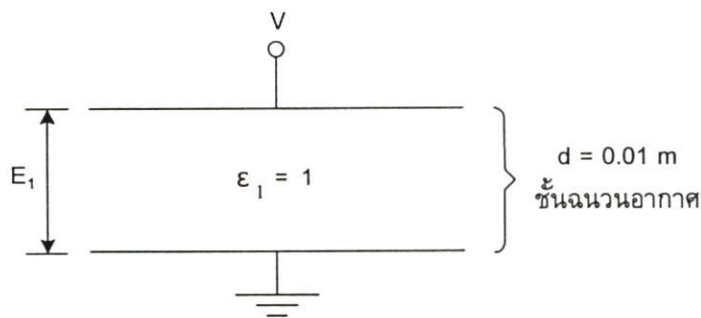
3.7.2 อิเล็กโทรดแบบฉนวนชั้นเดียว

เป็นแผ่นอิเล็กโทรดเพลทอีกหนึ่งชุดเป็นแผ่นเหล็กหนา 1 mm ขนาดกว้างและยาวเท่ากับอิเล็กโทรดเพลทแบบฉนวน 2 ชั้น โดยมีตำแหน่งการติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดเพลทเหมือนในหัวข้อ 3.7.1 เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของอิเล็กโทรดเพลทแบบฉนวนชั้นเดียวกับแบบฉนวนสองชั้น

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณที่อัดประจุ (E_p) และค่าประจุอิมิตัว (q_s) เนื่องจากมีลักษณะและขนาดเหมือนในหัวข้อ 3.7.1 ดังนั้นจึงมาพิจารณาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในย่านดักฝุ่น

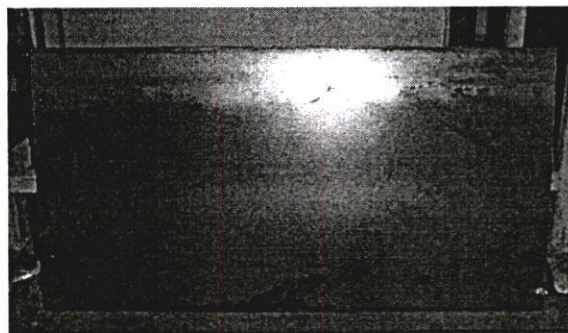
คำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณแผ่นดักฝุ่น (E_p)

ค่า E_p เป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นเพลท ซึ่งลักษณะการวางของแผ่นเพลทเป็นการวางขนานกันไปในระยะเท่าๆกันในทุกๆแผ่น ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็เป็นสนามไฟฟ้าประเภทที่เกิดขึ้นกันอย่างสม่ำเสมอไปตลอดทั้งแผ่น

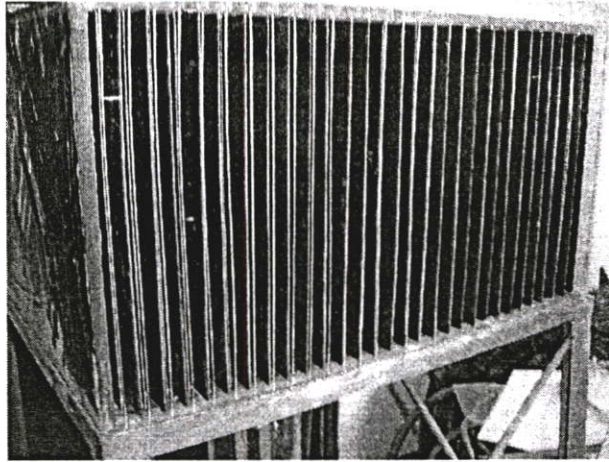


รูปที่ 3.51 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในฉนวนชั้นเดียว

ในส่วนของการฉนวนนั้นเมื่อวางแผ่นเพลทซ้อนกันแล้วก็จะเกิดเป็นฉนวนชั้นเดียวขึ้นมา ดังแสดงในรูป 3.51 คือชั้นฉนวนที่เป็นอากาศ และเป็นสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.52 ลักษณะของอิเล็กโทรดเพลทแบบฉนวนชั้นเดียวที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.53 ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวนชั้นเดียว

สำหรับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้ทดสอบจะพิจารณาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกับการทดสอบของอิเล็กโทรดแบบระนาบฉนวนสองชั้น เพื่อเปรียบเทียบความเข้มสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแบบฉนวนชั้นเดียวและอิเล็กโทรดแบบฉนวนสองชั้น ดังนั้นจึงเลือกแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดเท่ากันทั้งสองแบบ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ

$$E_p = \frac{V}{d}$$

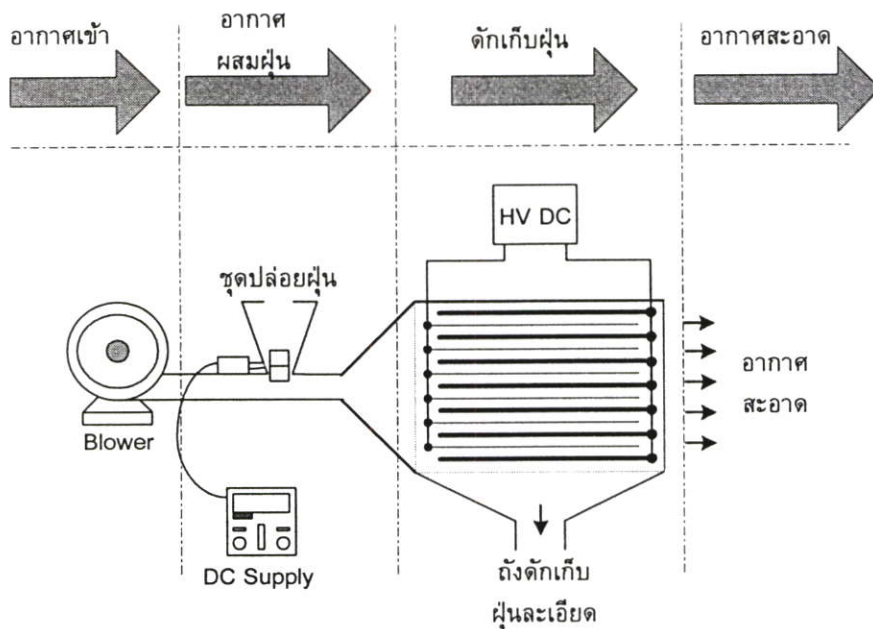
เพราะฉะนั้นจะได้

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{4 \text{ kV}}{0.01} \\ &= 400,000 \text{ V/m} \end{aligned}$$

3.7.3 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบแบบฉนวนชั้นเดียวและฉนวนหลายชั้น

การทดสอบนี้เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างฉนวนสองชนิดคือชั้นฉนวนแบบเก่าซึ่งเป็นฉนวนอากาศชั้นเดียวที่มีใช้กันทั่วไป กับฉนวนสองชั้นที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในวิทยานิพนธ์นี้ ในการทดสอบหาประสิทธิภาพความแตกต่างของฉนวนทั้งสองชนิดนี้จำเป็นต้องเพิ่มระยะเก็บโดยการดึงแผ่นเพลทออกเพื่อให้เปลี่ยนระยะเก็บจากเดิม 1 cm เป็น 3 cm เนื่องจากตามปกติประสิทธิภาพการดักฝุ่นของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปจะสูงอยู่แล้ว เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสำหรับการทดสอบอิเล็กโทรดทั้งสองแบบนี้จะสังเกตประสิทธิภาพที่แตกต่างได้ยาก สำหรับการวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นจะใช้ Universal Sample Pump ซึ่งได้กล่าวไว้ใน ภาคผนวก ข. อัตราความหนาแน่นฝุ่นทดสอบจะใช้ที่ 20, 40, 60 g/m^3 เนื่องจากที่อัตราความ

หนาแน่นฝุ่นมากกว่าค่านี้จะเกิดการตกตะกอนของฝุ่นภายในท่อลม ซึ่งมีความเร็วลมที่ออกจากไซโคลนเพียง 5.5 m/s และหากใช้อัตราความหนาแน่นฝุ่นต่ำกว่าค่านี้จะทำการวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นได้ยากและเห็นผลการทดสอบไม่ชัดเจน



รูปที่ 3.54 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์

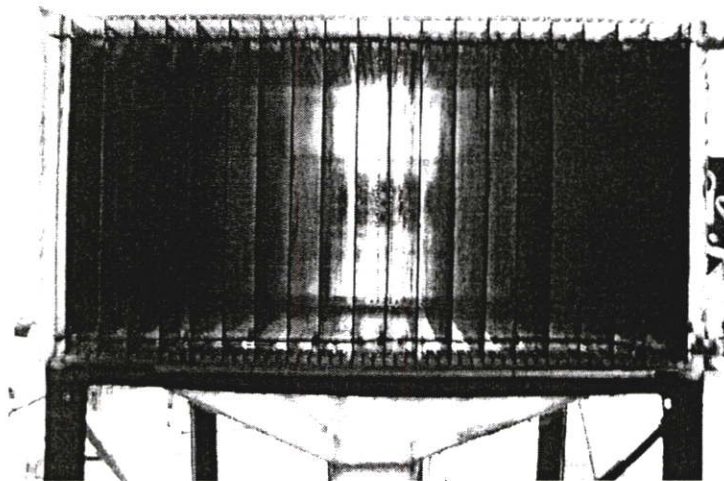
จากรูป 3.54 เป็นชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งไซโคลนไม่สามารถดักได้ เมื่อมีอากาศไหลผ่านชุดปล่อยฝุ่นจะเกิดเป็นอัตราความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ จากนั้นไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยหลักการสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อประจุสถิตทำการดักฝุ่นที่ผสมมากับอากาศ เพื่อให้อากาศสะอาดก่อนจะไหลสู่ภายนอก และฝุ่นที่ดักได้จะเกาะติดที่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์สามารถกำจัดด้วยการสั่นหรือเคาะเพื่อให้ฝุ่นตกลงมาในถังดักเก็บด้านล่าง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV
2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นแบบฉนวนสองชั้น
4. ชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นแบบฉนวนชั้นเดียว
5. Universal Sample Pump
6. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

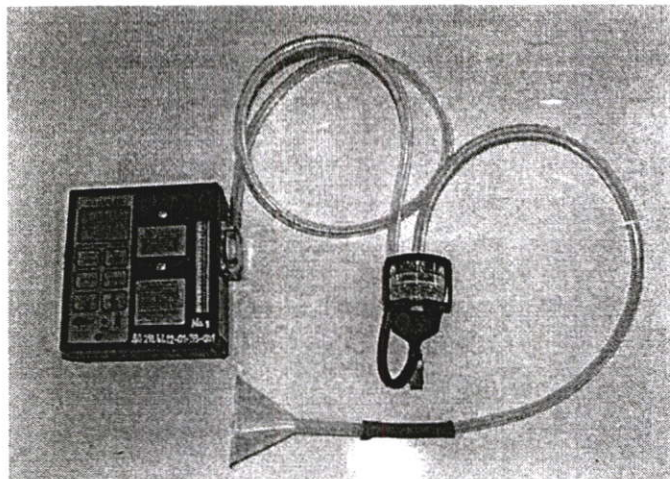
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ปรับระยะเก็บของชุดอิเล็กทรอนิกส์แบบจนวนสองชั้นที่ระยะ 3 cm
2. ต่อท่อปล่อยฝุ่นเข้ากับตัวเครื่องและทำความสะอาดชุดทดสอบก่อนเริ่มการทดสอบ
3. ปรับอัตราความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ 20, 40, 60 g/m³
4. ชั่งน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ในชุดปล่อยฝุ่นได้ตามที่คำนวณไว้
5. ติดตั้ง Universal Sample Pump ทั้งทางด้านเข้าและด้านออกของเครื่องดักฝุ่น
6. ปรับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก 4 kV
7. เปิดพัดลม Blower และเริ่มปล่อยฝุ่นเข้าเครื่องดักฝุ่น
8. เมื่อปล่อยฝุ่นหมดแล้วจึงทำการหยุดปล่อยฝุ่นและปิดพัดลม Blower 5.5 m/s
9. นำกระดาษกรองของ Universal Sample Pump ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ
10. เปลี่ยนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบจนวนชั้นเดียวหรือแบบแผ่นเหล็กแล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1 อีกครั้ง



รูปที่ 3.55 ชุดทดสอบที่ปรับระยะเก็บ 3 cm

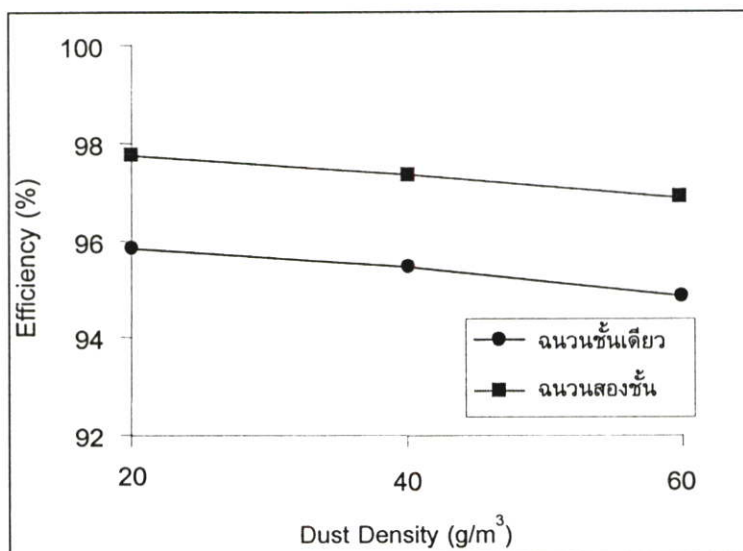
รูปที่ 3.55 เป็นการปรับระยะเก็บของชุดทดสอบเพื่อให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าลดลง พื้นที่ของขั้วเก็บฝุ่นน้อยลง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเพื่อจะได้ทำการทดสอบและวัดขีดความสามารถในการดักฝุ่นเด่นชัดขึ้น



รูปที่ 3.56 Universal Sample Pump

Universal Sample Pump เป็นเครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศหรือฝุ่นควัน โดยการต่อ พ่วงอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่าง เช่น ถังเก็บตัวอย่างอากาศ หรือคาสเซ็ทสำหรับใส่ฟิลเตอร์ดักฝุ่น สำหรับวิธีการใช้งาน จะแสดงในภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.57 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองแบบ

จากรูป 3.57 (ตาราง ง.31, ง.32) ผลการทดสอบพบว่าวิธีเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฉนวน 2 ชั้น จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงกว่าวิธีฉนวนชั้นเดียว โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 97.82 เปอร์เซ็นต์ที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าวิธีเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคจนวน 2 ชั้นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากวิธีจนวนชั้นเดียวประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 60 g/m³ และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นฝุ่นในการทดสอบ เนื่องจากที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงจะมีปริมาณฝุ่นมากทำให้มีอนุภาคฝุ่นเกาะสะสมที่พื้นผิวอิเล็กโทรด และเกิดการหลุดกระเด็นของอนุภาคฝุ่นที่ดักได้ [13] ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักฝุ่นลดลง จากนั้นจึงทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกและแรงดันไฟฟ้าขั้วลบในหัวข้อต่อไป

3.7.4 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบกับชนิดของขั้วแรงดัน

การทดสอบนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักฝุ่นชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวกและขั้วลบ เพื่อเปรียบเทียบกันรูปแบบการทดสอบจะใช้ระยะเก็บและวิธีวัดประสิทธิภาพเหมือนในหัวข้อ 3.7.3

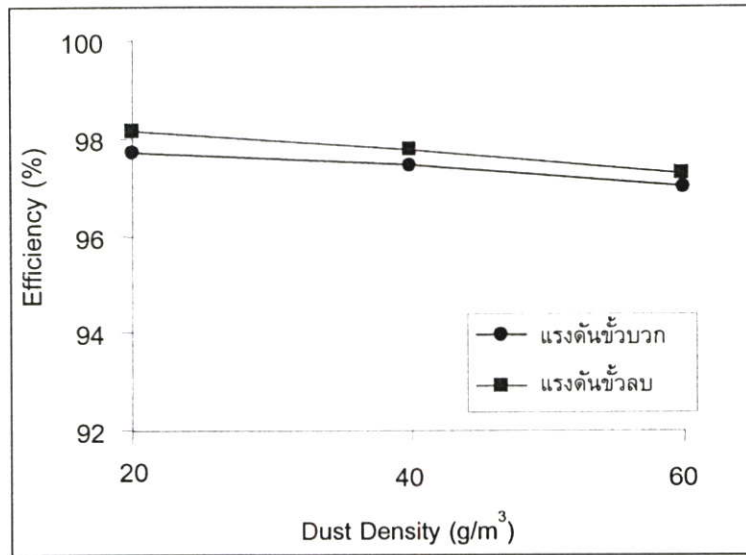
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0-50 kV
2. อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
3. ชุดอิเล็กโทรดดักฝุ่นแบบจนวนสองชั้น
4. Universal Sample Pump
5. เครื่องวัดความเร็วลม และเครื่องชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ปรับระยะเก็บของชุดอิเล็กโทรดแบบจนวนสองชั้นที่ระยะ 3 cm
2. ต่อท่อปล่อยฝุ่นเข้ากับตัวเครื่องและทำความสะอาดชุดทดสอบก่อนเริ่มการทดสอบ
3. ปรับอัตราความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ 20, 40, 60 g/m³
4. ชั่งน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ในชุดปล่อยฝุ่นได้ตามที่คำนวณไว้
5. ติดตั้ง Universal Sample Pump ทั้งทางด้านเข้าและด้านออกของเครื่องดักฝุ่น
6. ปรับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก 4 kV
7. เปิดพัดลม Blower และเริ่มปล่อยฝุ่นเข้าเครื่องดักฝุ่น
8. เมื่อปล่อยฝุ่นหมดแล้วจึงทำการหยุดปล่อยฝุ่นและปิดพัดลม Blower 5.5 m/s
9. นำกระดาษกรองของ Universal Sample Pump ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาประสิทธิภาพ
10. เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ 4 kV แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1 อีกครั้ง

ผลการทดสอบ



รูปที่ 3.58 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของอิเล็กทรอนิกส์แบบฉนวนสองชั้น ที่แรงดันขั้วบวกและแรงดันขั้วลบ

จากผลการทดสอบ(ตาราง ง.32, ง.34) พบว่าเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าขั้วลบกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรสดักฝุ่นแบบฉนวนสองชั้นเพื่อทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่น พบว่ามีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวก โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 98.14 เปอร์เซ็นต์ที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิธีเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฉนวน 2 ชั้นส่งผลให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากวิธีการเดิมและส่งผลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าขั้วลบจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 0.32 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³ และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นฝุ่นในการทดสอบ เนื่องจากปริมาณฝุ่นมากขึ้นทำให้เกิดการหลุดกระเด็นของอนุภาคฝุ่นที่ดักได้ [13] ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักฝุ่นลดลง

สรุปการออกแบบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบ

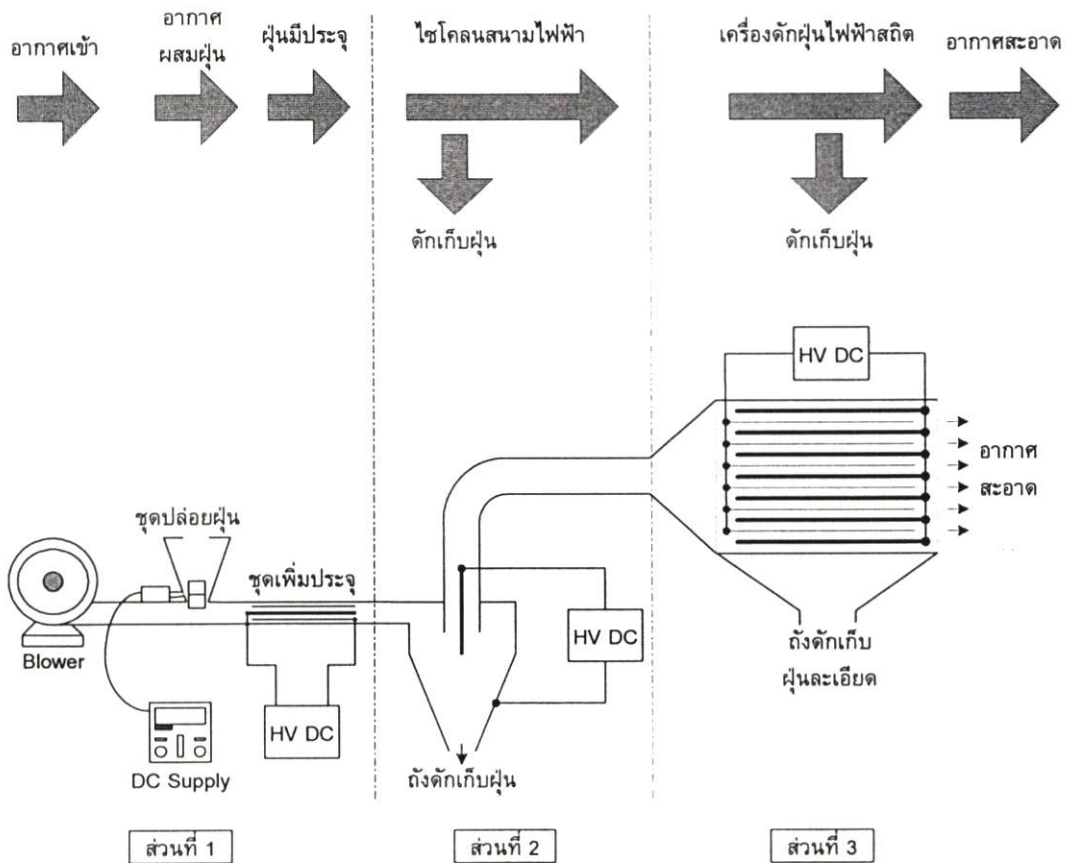
จากการทดสอบพบว่าที่ระยะเท่ากันอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบฉนวนสองชั้นมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่า จึงมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตมากกว่า จึงมีประสิทธิภาพในการดักฝุ่นสูงกว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบฉนวนชั้นเดียว และประสิทธิภาพสูงสุด 98.14 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³ และใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ

ชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ มีจำนวนช่องทางเข้าของ
ก๊าซทั้งหมด 29 ช่อง ซึ่งมีจำนวนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 59 แผ่น ซึ่งจะได้ความกว้างของเครื่อง
58.2 cm โดยระยะห่างระหว่างเส้นลวดโครนากับแผ่นเพลท B จะเท่ากับ 1 cm และระยะห่างจาก
เส้นลวดโครนากับแผ่นคักฝุ่นเพลท A จะห่างเท่ากับ 1 cm และระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กทรอนิกส์
A กับ B คือ 8 mm เมื่อคิดความหนาของชั้นฉนวนอีพ็อกซี 2 mm

การทดสอบชุดไซโคลนดักฝุ่นโดยใช้สนามไฟฟ้า

4.1 บทนำ

ต้นแบบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าเมื่อทำการออกแบบและจัดสร้างส่วนประกอบของชุดทดสอบครบทั้ง 3 ส่วนแล้วได้นำมาทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า อัตราความหนาแน่นของฝุ่นในอากาศ ความเร็วลม เพื่อให้ทราบคุณสมบัติของเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนเมื่อทำงานร่วมกับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าและชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซาซิสเตอร์ สำหรับนำไปพิจารณาเลือกระบบดักฝุ่นที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการดักฝุ่น

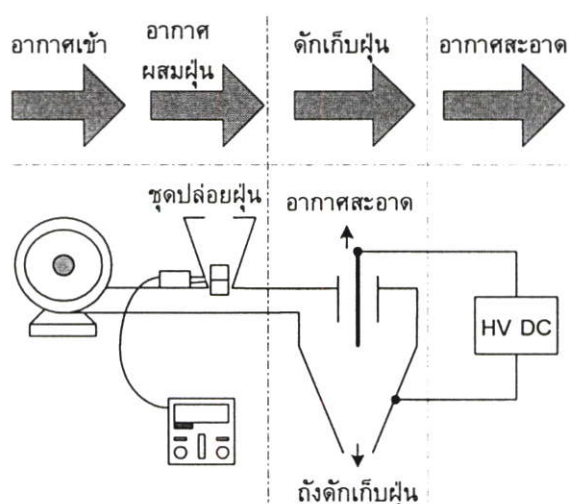


รูปที่ 4.1 ระบบดักฝุ่นทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานร่วมกัน

จากรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ออนุภาค ชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรครีนาบ เมื่ออากาศผ่านส่วนที่ 1 จะมีฝุ่นผสมมากับอากาศแล้วเคลื่อนผ่านชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า จากนั้นจะส่งผ่านฝุ่นที่มีประจุไปยังส่วนที่ 2 คือไซโคลนสนามไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ดักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุ โดยฝุ่นที่ดักได้จะตกลงด้านล่างของไซโคลนลงในถังเก็บฝุ่น และฝุ่นส่วนหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กและไซโคลนไม่สามารถดักได้จะไหลไปตามกระแสก๊าซออกทางด้านบนของไซโคลน จากนั้นไหลเข้าสู่ส่วนที่ 3 ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรครีนาบสำหรับดักฝุ่นละเอียด หลังจากอากาศไหลผ่านส่วนที่ 3 แล้วจะกลายเป็นอากาศสะอาดก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก

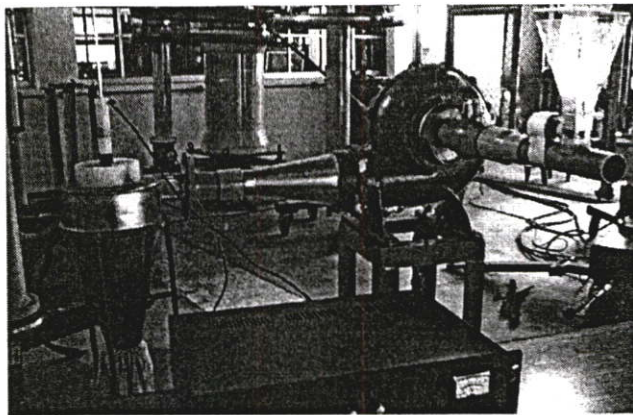
4.2 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้า

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 2 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดไซโคลนดักฝุ่นที่มีอิเล็กโทรครีนาบสร้างสนามไฟฟ้าภายใน เพื่อหาคุณสมบัติของแรงหนีศูนย์กลางในเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนร่วมกับแรงของสนามไฟฟ้า การทดสอบใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$ การหาขีดความสามารถในการดักฝุ่น ทำโดยการนำฝุ่นที่ดักได้ด้านล่างของไซโคลนมาชั่งน้ำหนักแล้วนำไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ป้อนเข้าไปในอากาศ และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดักได้แล้วบันทึกผล โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แบ่งการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน

จากรูปที่ 4.2 เมื่ออากาศไหลเข้า และผ่านชุดปล่อยฝุ่นจะมีฝุ่นมากับอากาศและจะไหลไปยังไซโคลนสนามไฟฟ้า โดยอาศัยแรงสนามไฟฟ้าและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการไหลวนของกระแสลม แสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน

การทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ

จากผลการทดสอบในบทที่ 3 จึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงชั่วคราวเพื่อศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลนที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

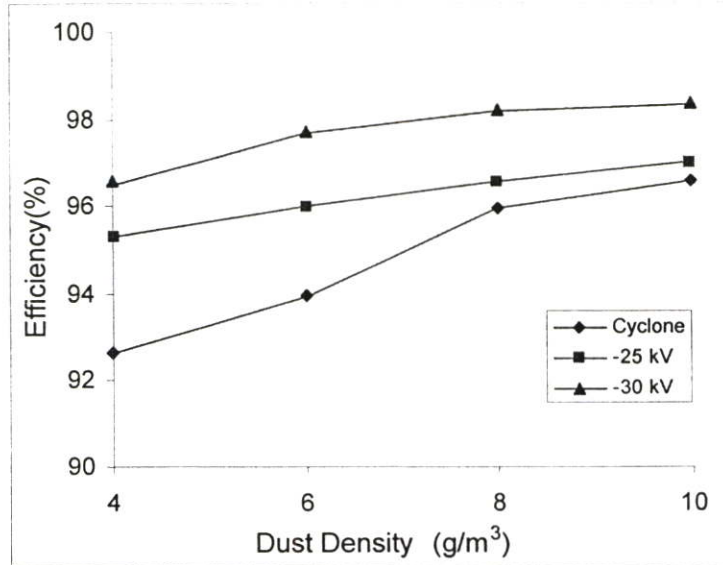
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ต้นแบบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน และชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า
3. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
4. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เครื่องชั่งดิจิตอล

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงกับอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้า
2. ปรับชุดปล่อยฝุ่น ให้มีอัตราการความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³
3. จัดเตรียมถุงผ้าสำหรับรองรับฝุ่นที่ไซโคลนดักได้
4. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
5. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าที่ระดับ -25 kV
6. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนจนหมด
7. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวด์

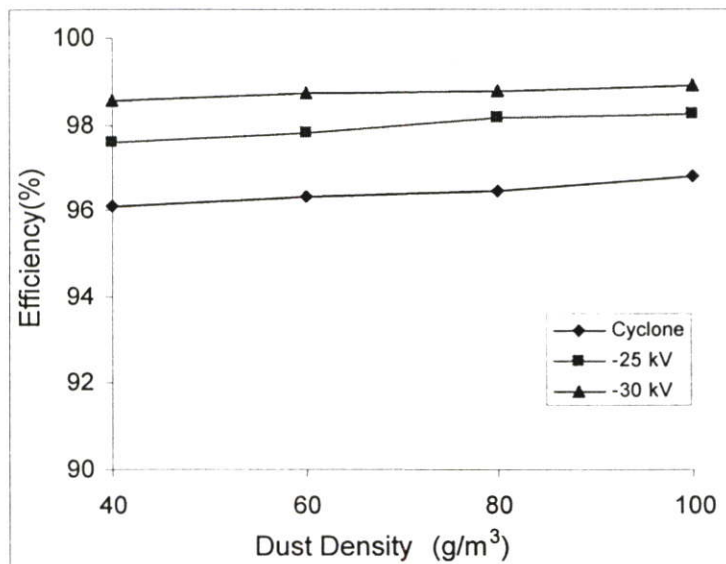
8. ทำการเก็บถุงผ้าดักฝุ่น ที่ถูกไซโคลนดักออกมาทางด้านล่างของไซโคลน มาทำการชั่งน้ำหนัก แล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไป บันทึกผลการทดสอบ
9. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 - ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า -30 kV ตามลำดับ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.4 ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้ากับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 4.4 (ตาราง ง.2, ง.19, ง.21) เป็นการทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลนสนามไฟฟ้า ทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าขั้วลบ 30 kV จะมีขีดความสามารถสูงสุด 98.15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 10 g/m³



รูปที่ 4.5 ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้ากับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

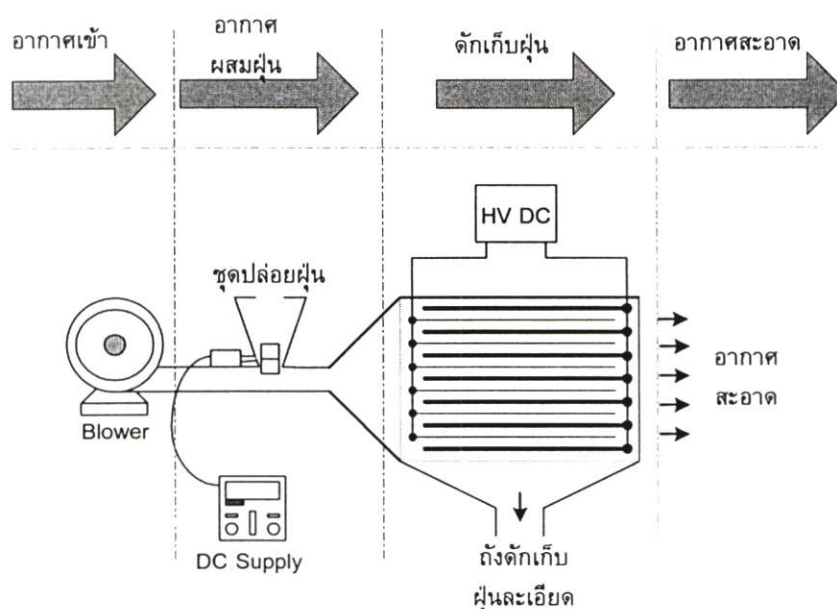
จากรูป 4.5 (ตาราง ง.5, ง.20, ง.22) ผลการทดสอบการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ระดับ -30 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุดอยู่ที่ระดับ 98.90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m^3

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า -30 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่น 98.90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรด และทิศทางของแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า มีทิศทางตรงข้ามกับแรงหนีศูนย์กลาง จึงส่งผลให้ฝุ่น เมื่อเคลื่อนที่มาชนผนังไซโคลอน โดยมีแรงต้านจากแรงสนามไฟฟ้าผลักให้ฝุ่นไม่เกาะติดผนังและลดแรงเสียดทานของฝุ่นกับผนังไซโคลอน และฝุ่นจะเคลื่อนที่ตามทิศทางลมและตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลอนได้ง่าย

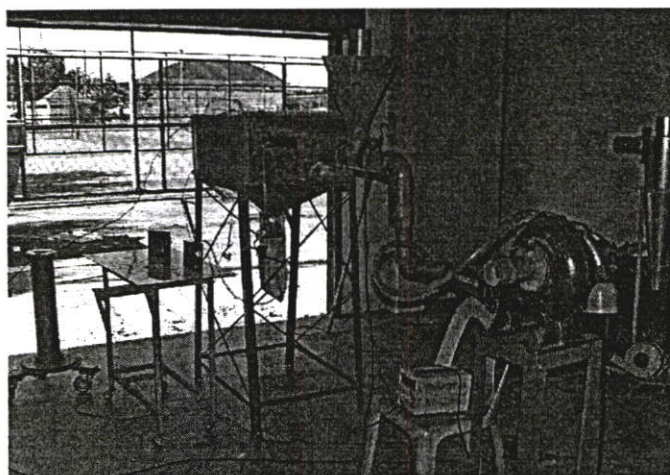
4.3 การทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 3 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบที่ใช้หลักการฉนวน 2 ชั้น เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าในการดักฝุ่น การทดสอบจะใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น $4\text{-}10 \text{ g/m}^3$ และ $40\text{-}100 \text{ g/m}^3$ การหาขีดความสามารถในการดักฝุ่น ทำโดยการนำกระดาษกรองของเครื่อง Universal Sample Pump ด้านอากาศออกจากเครื่องดักฝุ่น (ฝุ่นที่เครื่องไม่สามารถดักได้) มาชั่งน้ำหนักแล้วไปลบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้ามาจะทราบน้ำหนักฝุ่นที่เครื่องดักได้ แล้วนำไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้ามา และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดักได้แล้วบันทึกผล โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงวิธีการวัดประสิทธิภาพในภาคผนวก ข.



รูปที่ 4.6 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

จากรูป 4.6 เมื่ออากาศไหลผ่านชุดปล่อยฝุ่นจะมีฝุ่นผสมมากับอากาศและไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตซึ่งฝุ่นที่ดักได้จะถูกดูดติดกับแผ่นอิเล็กโทรด และใช้การสั่นหรือเคาะเพื่อเอากำจัดฝุ่นออกจากอิเล็กโทรด ส่วนอากาศสะอาดจะไหลผ่านเครื่องออกอีกด้านหนึ่ง



รูปที่ 4.7 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การทดสอบชุดอิเล็กโทรดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ

จากผลการทดสอบในบทที่ 3 จึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบเพื่อศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าสำหรับดักฝุ่น ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดอิเล็กโทรดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

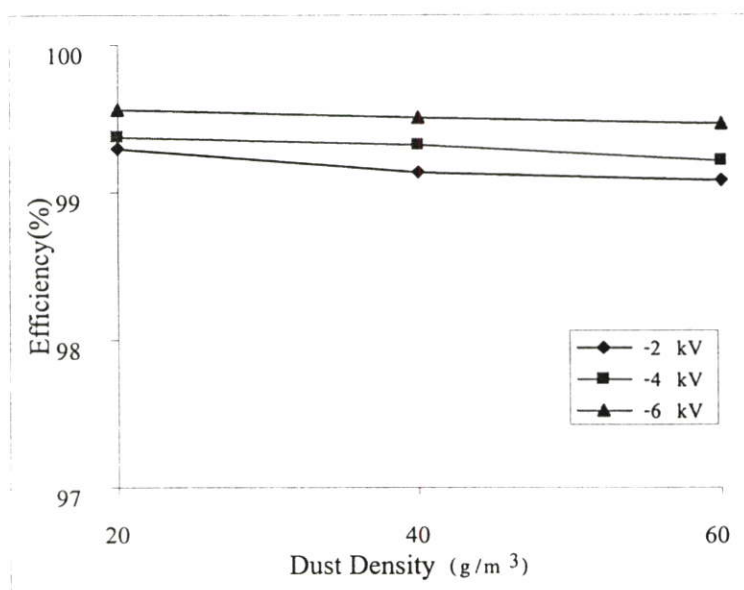
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ดันแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ
3. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
4. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เครื่องชั่งดิจิตอล
7. Universal Sample Pump และกระดาศยกรอง

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงกับอิเล็กโทรดดักฝุ่น
2. ปรับความเร็วของชุดปล่อยฝุ่น ที่อัตราความหนาแน่น 20-40 g/m³

3. จัดเตรียม Universal Sample Pump 2 เครื่อง สำหรับดักฝุ่นด้านอินพุตและเอาท์พุท
4. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 5.5 m/s
5. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นที่ระดับ -2 kV
6. ปลอ่ยฝุ่นทดสอบที่ซึ่งนำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปลอ่ยฝุ่น และปลอ่ยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าเครื่องดักฝุ่นจนหมด
7. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการคิซซาร์จลงกราวนด์
8. ทำการเก็บแผ่นกรองฝุ่นไปซึ่งนำหนัก ทางด้านอินพุทลบกับทางด้านเอาท์พุทจะทราบปริมาณฝุ่นที่ดักได้ แล้วไปคำนวณเทียบกับปริมาณฝุ่นด้านอินพุท บันทึกผลการทดสอบ
9. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า -4 และ -6 kV ตามลำดับ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.8 ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้ากับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 20-40 g/m³

จากรูป 4.8 (จ.33, จ.34, จ.35) ผลการทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³ จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.56 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่ระดับแรงดันสูงจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงทำให้ขีดความสามารถการดักฝุ่นสูงตาม

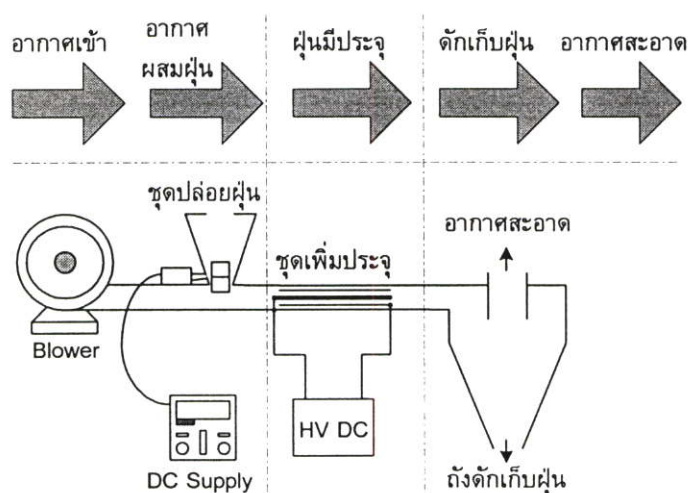
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.56

เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น 20 g/m^3 เนื่องจากความเข้มข้นของไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ โทรค และอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุบริเวณช่องทางเข้า เมื่อเคลื่อนผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์ โทรคจะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต อนุภาคฝุ่นจะเคลื่อนที่เข้ามาเกาะที่อิเล็กทรอนิกส์ โทรคคักฝุ่น เป็นผลให้ขีดความสามารถในการคักฝุ่นของเครื่องมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อทำการทดสอบที่ระดับความหนาแน่นฝุ่นสูง กลับพบว่าประสิทธิภาพในการคักฝุ่นจะมีค่าลดลง เนื่องจากที่ระดับความหนาแน่นฝุ่นสูงจะเกิดปริมาณฝุ่นสะสมบนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ โทรค เมื่อฝุ่นที่คักได้มีการสะสมมากขึ้นจะเกิดการกระเด็นหลุดไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคักฝุ่นลดลง

4.4 การทดสอบขีดความสามารถในการคักฝุ่นของไซโคลนเมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น

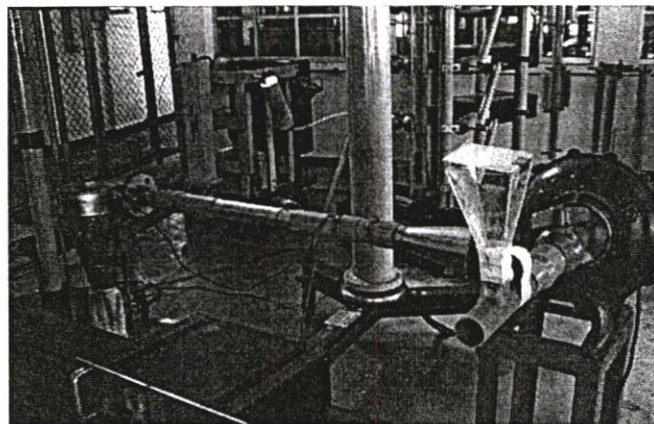
เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 1 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคร่วมกับชุดไซโคลนคักฝุ่น เพื่อหาคุณสมบัติของเครื่องคักฝุ่นแบบไซโคลนร่วมกับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าสำหรับการเลือกใช้งานในการคักฝุ่นให้มีขีดความสามารถที่สูงที่สุดและมีความเหมาะสมในการใช้งานจริง โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานจริงในสถานะที่แตกต่างกันได้ การทดสอบใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$ การหาขีดความสามารถในการคักฝุ่น ทำโดยการนำฝุ่นที่คักได้และตกลงไปยังด้านล่างของไซโคลนมาชั่งน้ำหนักฝุ่นที่คักได้แล้วนำไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ปนเข้าไปในอากาศ และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คักได้แล้วบันทึกผล ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการคักฝุ่นของไซโคลนเมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น

จากรูปที่ 4.9 เมื่ออากาศไหลเข้า และผ่านชุดปล่อยฝุ่นจะมีฝุ่นมากับอากาศและจะไหลผ่านชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า จากนั้นฝุ่นจะมีประจุสถิตและไหลผ่านไปยังไซโคลนคักฝุ่นซึ่งทำหน้าที่เป็น

อิเล็กทรอนิกส์ท้าวกราวนด์ ผุ่นซึ่งมีประจุมติจะเคลื่อนเข้าสู่ผ่นง ไซโคลน ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการไหลวนของกระแสลม แสดงการต่อชุดทดสอบดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การทดสอบประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนเมื่อเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น

การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ

จากการทดสอบชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นในบทที่ 3 จึงใช้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ขั้วบวกเพื่อศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ท้าวกราวนด์ที่ใช้ในการเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น ที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นของไซโคลน เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

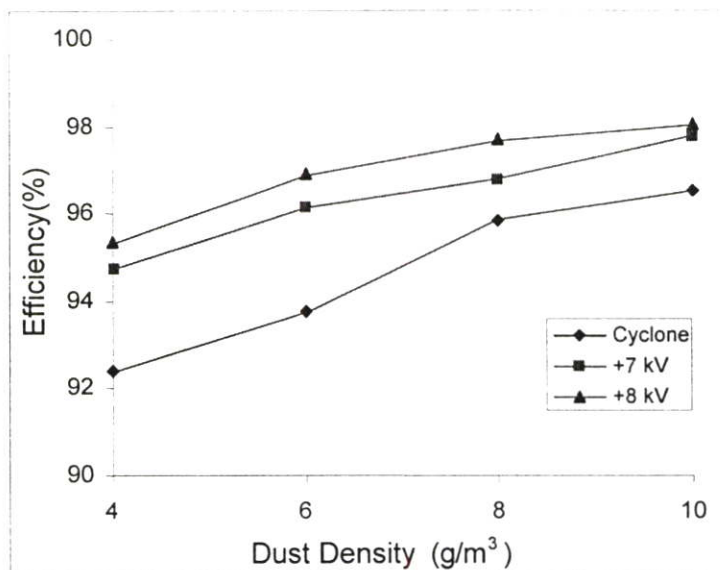
1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ดันแบบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน และชุดอิเล็กทรอนิกส์ท้าวกราวนด์เพิ่มประจุไฟฟ้า
3. ผุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
4. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
5. นาฬิกาจับเวลา
6. เครื่องชั่งดิจิตอล

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงกับอิเล็กทรอนิกส์ท้าวกราวนด์เพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น
2. ปรับชุดปล่อยฝุ่น ให้มีอัตราการความหนาแน่นฝุ่นที่ 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³
3. จัดเตรียมถุงผ้าสำหรับรองรับฝุ่นที่ไซโคลนดักได้
4. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
5. ป้อนแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก 7 kV ให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ท้าวกราวนด์เพิ่มประจุไฟฟ้า

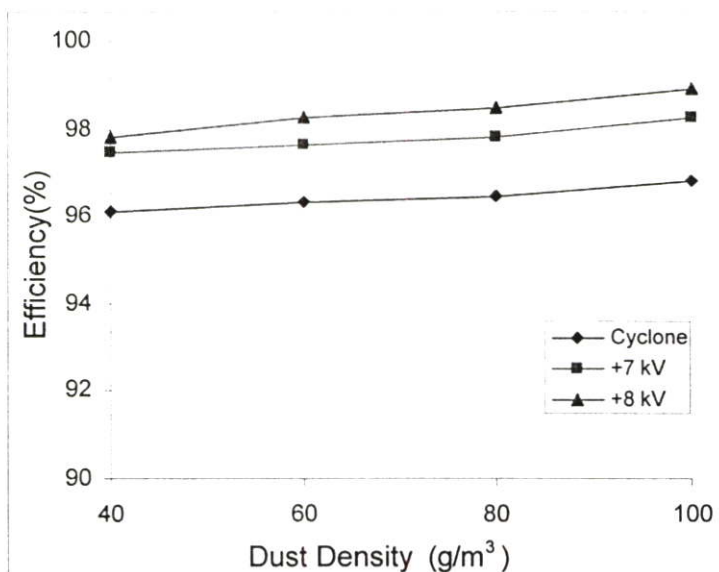
6. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ซั่งน้ำหนักร่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนจนหมด
7. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวนด์
8. ทำการเก็บถุงผ้าดักฝุ่น ที่ถูกไซโคลนดักออกมาทางด้านล่างของไซโคลน มาทำการซั่งน้ำหนัก แล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไป บันทึกผลการทดสอบ
9. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 8 kV

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.11 การทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 4.11 (ตาราง ง.2, ง.7, ง.10) ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประจุ ที่ความหนาแน่นฝุ่นต่ำพบว่าแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 8 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 97.63 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.12 การทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้าของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูปที่ 4.12 (ตาราง ง.5, ง.9, ง.11) ผลการทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ระดับแรงดันไฟฟ้าขั้วบวก 8 kV มีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงกว่า โดยมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 98.72 เปอร์เซ็นต์

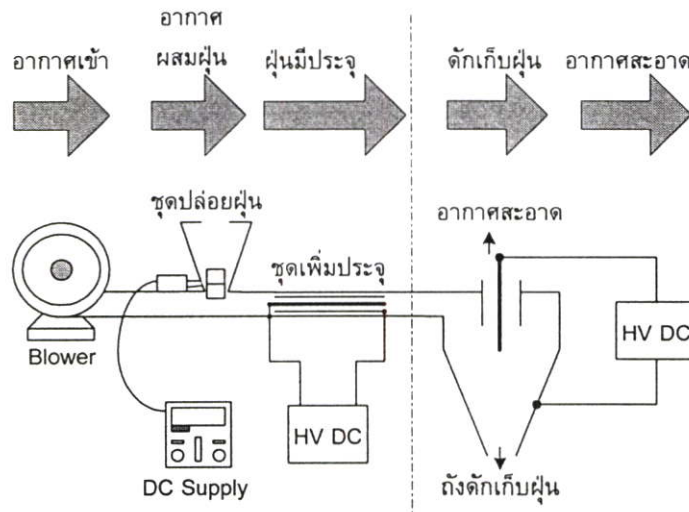
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นของเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลน โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 8 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่สูงสุด 98.72 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดการไอออไนซ์เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนรอบๆอิเล็กโตรดสูงขึ้น เมื่ออนุภาคฝุ่นถูกชนจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก และเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วกราวด์ (ตัวถังไซโคลน) ตามทิศทางของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในไซโคลน โดยมีขีดความสามารถสูงสุดเมื่อทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³

4.5 การทดสอบชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า

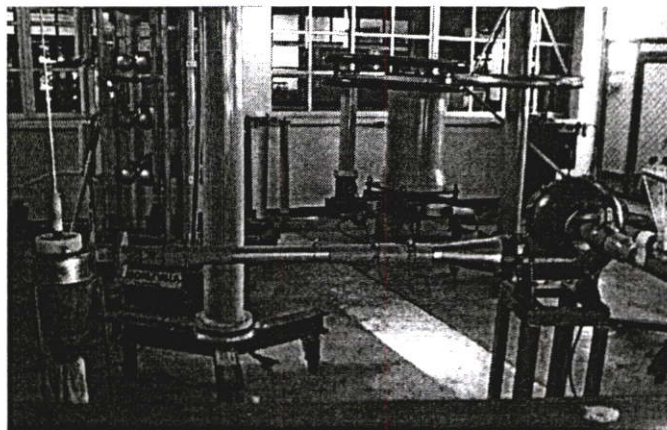
เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 1 ร่วมกับส่วนที่ 2 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาคฝุ่นร่วมกับชุดไซโคลนดักฝุ่นที่มีอิเล็กทรอนิกส์สร้างสนามไฟฟ้าภายใน เพื่อหาคุณสมบัติของแรงหนีศูนย์กลางในเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนร่วมกับแรงของสนามไฟฟ้า สำหรับการเลือกใช้งานในการดักฝุ่นให้มีขีดความสามารถที่สูงที่สุดและมีความเหมาะสมในการใช้งานจริง โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานจริงใน

สภาวะที่แตกต่างกันได้ การทดสอบใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น 4-10 g/m^3 และ 40-100 g/m^3 การหาขีดความสามารถในการดักฝุ่น ทำโดยการนำฝุ่นที่ดักได้และตกลงไปยังด้านล่างของไซโคลนมาชั่งหาน้ำหนักฝุ่นที่ดักได้แล้วนำไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่ปนเข้าไปในอากาศ และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ดักได้แล้วบันทึกผล โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แบ่งการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.13 วงจรการทดสอบชุดเพิ่มประจุร่วมกับชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า

จากรูป 4.13 ประกอบไปด้วย ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาค และชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า เมื่ออากาศผ่านชุดปล่อยฝุ่น จะมีฝุ่นผสมมากับอากาศแล้วเคลื่อนผ่านชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า จากนั้นจะส่งผ่านฝุ่นที่มีประจุไปยังไซโคลนสนามไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ดักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุ โดยฝุ่นที่ดักได้จะตกลงด้านล่างของไซโคลนลงในถังเก็บฝุ่น



รูปที่ 4.14 การทดสอบชุดเพิ่มประจุร่วมกับชุดไซโคลนสนามไฟฟ้า

การทดสอบอัตราการความหนาแน่นฝุ่นที่ระดับต่างๆ

เพื่อทดสอบอัตราการการเจือปนของฝุ่นในอากาศที่ความหนาแน่นระดับต่างๆ ที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่นของเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น เนื่องจากในการใช้งานจริงมีความหนาแน่นของฝุ่นแตกต่างกันออกไป ซึ่งการทดสอบผลของอัตราการความหนาแน่นของฝุ่นที่มีต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น ทำให้สามารถนำไปออกแบบและสร้างระบบดักฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ดันแบบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนและชุดอิเล็กทรอนิกส์สร้างไฟฟ้า
3. ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น
4. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
5. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องชั่งดิจิตอล

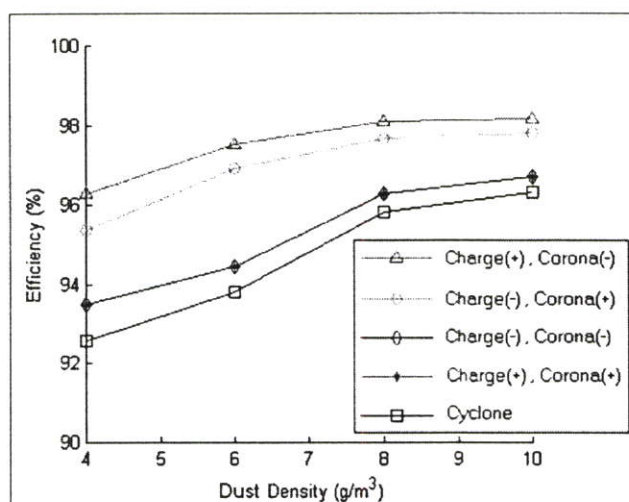
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงกับชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นแบบไซโคลนสนามไฟฟ้า
2. ปรับชุดปล่อยฝุ่น ที่อัตราการความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³
3. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
4. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้าที่ระดับ +8 kV
5. ป้อนแรงดันไฟฟ้าไซโคลนสนามไฟฟ้าที่ระดับ -30 kV
6. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนจนหมด
7. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวนด์
8. ทำการเก็บถุงผ้าดักฝุ่น ที่ถูกไซโคลนดักออกมาทางด้านล่างของไซโคลน มาทำการชั่งน้ำหนัก แล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้าไป บันทึกผลการทดสอบ
9. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 9 โดยเปลี่ยนอัตราการความหนาแน่นฝุ่นที่ 4, 6, 8, 10 g/m³ และ 40, 60, 80, 100 g/m³ ตามลำดับ
10. จากนั้นเปลี่ยนขั้วของแรงดันไฟฟ้า ดังนี้
 - ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า -8 kV และไซโคลนสนามไฟฟ้า +30 kV
 - ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า -8 kV และไซโคลนสนามไฟฟ้า -30 kV

-ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า +8 kV และไซโคลนสนามไฟฟ้า +30 kV

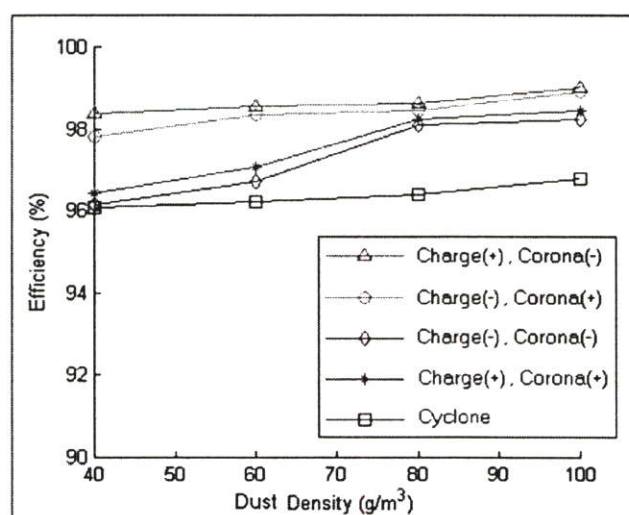
11. ทำการทดสอบซ้ำจนครบทุกเงื่อนไข และบันทึกผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 4.15 (ตาราง ง.2, ง.23, ง.24, ง.25, ง.26) เป็นการทดสอบเปรียบเทียบผลของชนิดขั้วแรงดันที่ใช้อัดประจุ และขั้วแรงดันที่ใช้กับไซโคลนสนามไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพสูงสุด 98.21 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นฝุ่น 10 g/m³



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการดักฝุ่นของชุดเพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

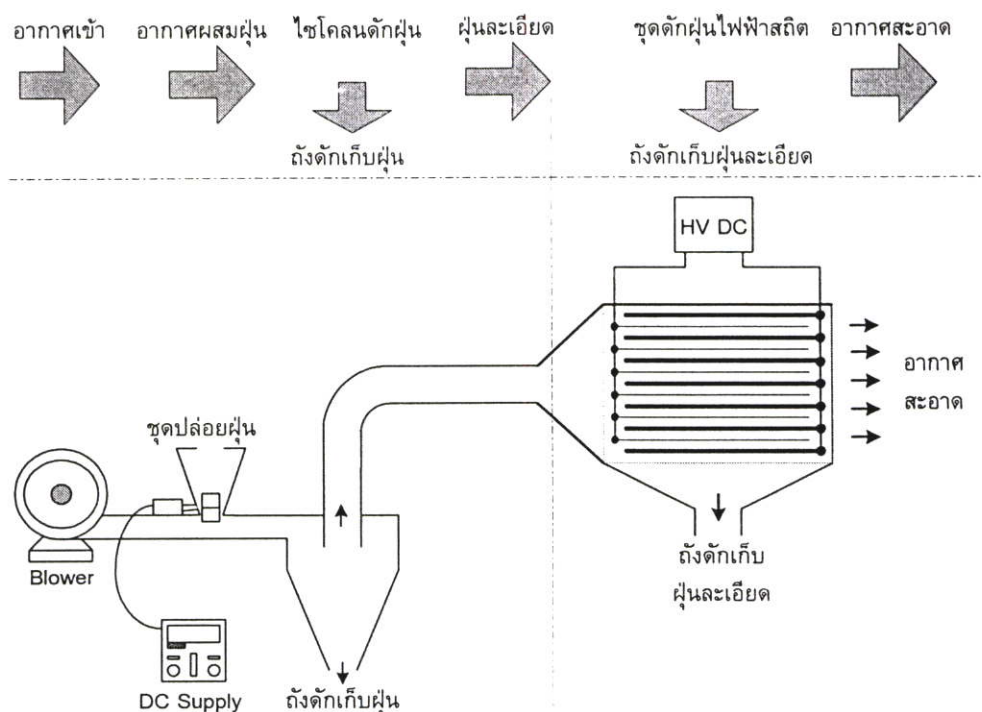
จากรูป 4.16 (ตาราง ง.5, ง.27, ง.28, ง.29, ง.30) ผลการทดสอบการทำงานร่วมกันของชุดเพิ่มประจุให้อุณหภูมิร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นฝุ่นสูง และการใช้ชนิดของแรงดันขั้วต่างๆ พบว่าขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.02 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แรงดันขั้วบวกในการเพิ่มประจุ และใช้แรงดันขั้วลบในการสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราการเจือปนของฝุ่นในอากาศเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยที่อัตราความหนาแน่นในช่วง 4-10 g/m^3 จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.21 เปอร์เซ็นต์ และอัตราความหนาแน่นในช่วง 40-100 g/m^3 จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.02 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออัตราความหนาแน่นฝุ่นสูงขึ้นจะทำให้ขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงขึ้น เนื่องจากที่ความหนาแน่นฝุ่นสูง อนุภาคฝุ่นจะเกิดการชนกันและทำให้เคลื่อนที่เข้าสู่ผนังของไซโคลนได้ง่ายขึ้น และฝุ่นที่เคลื่อนผ่านชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก เมื่อผนังไซโคลนเป็นขั้วกราวด์เป็นผลให้อนุภาคฝุ่นเคลื่อนที่เข้าสู่ผนังไซโคลนเร็วขึ้น และแรงจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางตรงข้ามกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะผลักอนุภาคฝุ่นออกจากผนังไซโคลนทำให้ไม่เกาะติดที่ผนังไซโคลนช่วยลดการเสียดสีกับผนังไซโคลนส่งผลให้ความสามารถของเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนสนามไฟฟ้าจึงสูงขึ้น

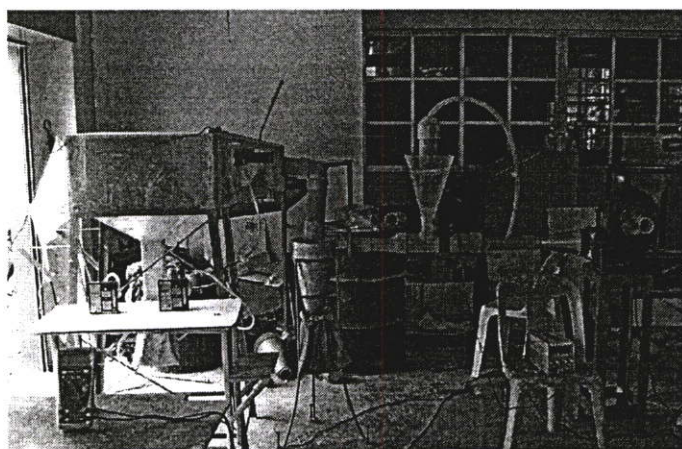
4.6 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 2 ร่วมกับส่วนที่ 3 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดไซโคลนดักฝุ่นแบบไม่มีสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรรระนาบ เพื่อหาขีดความสามารถในการดักฝุ่นเมื่อทำงานร่วมกัน ใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น 4-10 g/m^3 และ 40-100 g/m^3 เพื่อศึกษาผลของไซโคลนธรรมดาเมื่อทำงานร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรรระนาบ ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดสอบในบทที่ 3 จึงเลือกใช้แรงดันขั้วลบ



รูปที่ 4.17 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

จากรูป 4.17 ประกอบไปด้วยชุดไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เมื่ออากาศผ่านชุดปล่อยฝุ่น จะมีฝุ่นผสมมากับอากาศแล้วเคลื่อนผ่านชุดไซโคลนเพื่อดักฝุ่น ฝุ่นที่ดักได้จะเคลื่อนตกลงด้านล่าง ส่วนฝุ่นที่ดักไม่ได้จะเคลื่อนออกทางด้านบน ซึ่งมีความหนาแน่นฝุ่นต่ำ จากนั้นเครื่องตัวเข้าสู่ชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต ฝุ่นที่ถูกดักด้วยชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะทำการดักอากาศด้านเข้าและด้านออกของเครื่อง



รูปที่ 4.18 การทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

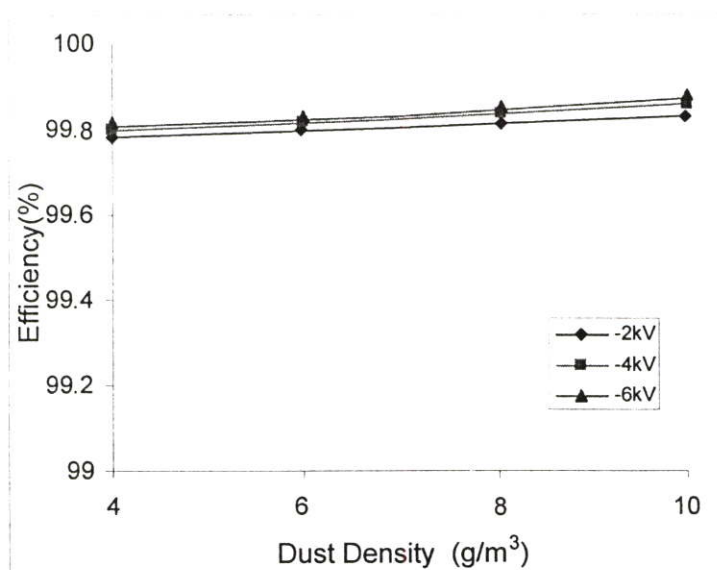
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ไซโคลนดักฝุ่น
3. ต้นแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวเซอร์
4. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
5. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องชั่งดิจิทัล
8. Universal Sample Pump และกระดาษกรอง

ขั้นตอนการทดสอบ

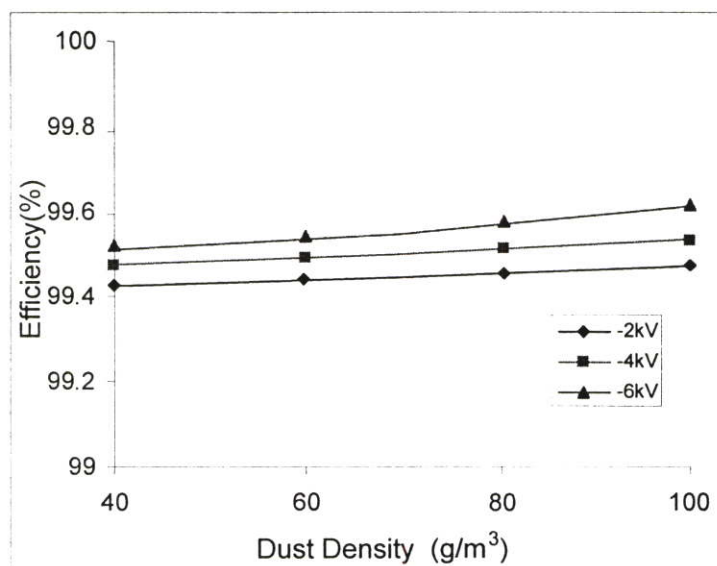
1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง -2 kV กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวเซอร์ของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ปรับความเร็วของชุดปล่อยฝุ่น ที่อัตราความหนาแน่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³
3. จัดเตรียม Universal Sample Pump 2 เครื่อง สำหรับดักฝุ่นด้านอินพุทและเอาต์พุท
4. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
5. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนดักฝุ่นจนหมด
6. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวนด์
7. ทำการเก็บแผ่นกรองฝุ่นที่ดักได้ทางด้านเอาต์พุท มาทำการชั่งน้ำหนักแล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักแผ่นกรองฝุ่นด้านหน้าชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อคำนวณหาปริมาณฝุ่นที่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตดักได้และนำไปรวมกับฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ จำนวนเทียบกับปริมาณฝุ่นที่ใส่เข้ามาทั้งหมด เพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบ
8. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า -4 และ -6 kV ตามลำดับ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบไซโคลนร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 4.19 (ตาราง ง.36, ง.37, ง.38) พบว่าที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงจะโดนไซโคลนดักไปก่อนแล้ว จากนั้นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะมีความหนาแน่นฝุ่นลดลง ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.87 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบไซโคลนร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 4.20 (ตาราง ง.39, ง.40, ง.41) พบว่าที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงจะโคนไซโคลนคักไปก่อนแล้ว จากนั้นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดคักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะมีความหนาแน่นฝุ่นลดลง ชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมีขีดความสามารถในการคักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.63 เปอร์เซ็นต์

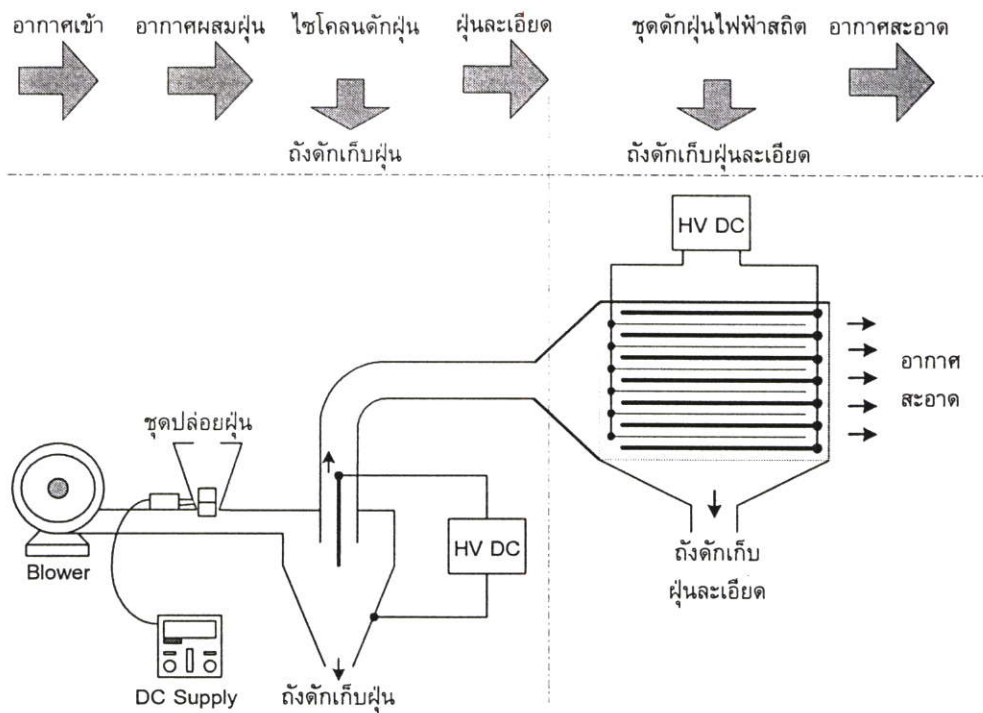
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการคักฝุ่น โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถในการคักฝุ่นสูงสุด 99.87 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 10 g/m^3 และจะมีขีดความสามารถในการคักฝุ่นสูงสุด 99.63 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 100 g/m^3 เนื่องจากความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับแรงดันที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ และอนุภาคฝุ่นที่ได้รับประจุบริเวณช่องทางเข้า เมื่อเคลื่อนผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต อนุภาคฝุ่นจะเคลื่อนที่เข้ามาเกาะที่อิเล็กทรอนิกส์คักฝุ่น เมื่อทำการทดสอบร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไซโคลน ปริมาณฝุ่นที่หลุดลอคมาจากไซโคลนจะมาปริมาณน้อย ทำให้ความหนาแน่นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีระดับความหนาแน่นฝุ่นต่ำ ส่งผลให้ชุดคักฝุ่นอิเล็กทรอนิกส์มีขีดความสามารถในการคักฝุ่นสูง

4.7 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 2 ร่วมกับส่วนที่ 3 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทรานซิมิตเตอร์ เพื่อหาขีดความสามารถในการคักฝุ่นเมื่อทำงานร่วมกัน ใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

จากรูปที่ 4.21 เมื่ออากาศผ่านชุดปล่อยฝุ่น จะมีฝุ่นผสมมากับอากาศแล้วไหลเข้าไซโคลนสนามไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่คักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุ โดยฝุ่นที่คักได้จะตกลงด้านล่างของไซโคลนลงในถังเก็บฝุ่น และฝุ่นส่วนหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กและไซโคลนไม่สามารถคักได้จะไหลไปตามกระแสก๊าซออกจากด้านบนของไซโคลน จากนั้นไหลเข้าสู่ชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทรานซิมิตเตอร์สำหรับคักฝุ่นละเอียด อากาศที่ไหลออกอีกด้านของเครื่องจะกลายเป็นอากาศสะอาดก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก



รูปที่ 4.21 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เพื่อศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดของไซโคลนและอิเล็กโทรดระนาบที่ใช้สำหรับดักฝุ่น ที่แรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆที่มีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดสอบในบทที่ 3 จึงเลือกใช้แรงดันขั้วลบ 30 kV กับไซโคลนสนามไฟฟ้าและแรงดันขั้วลบ 2 ถึง 6 kV กับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ไซโคลนสนามไฟฟ้า
3. ดันแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ
4. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
5. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องชั่งดิจิตอล
8. Universal Sample Pump และกระดาษกรอง

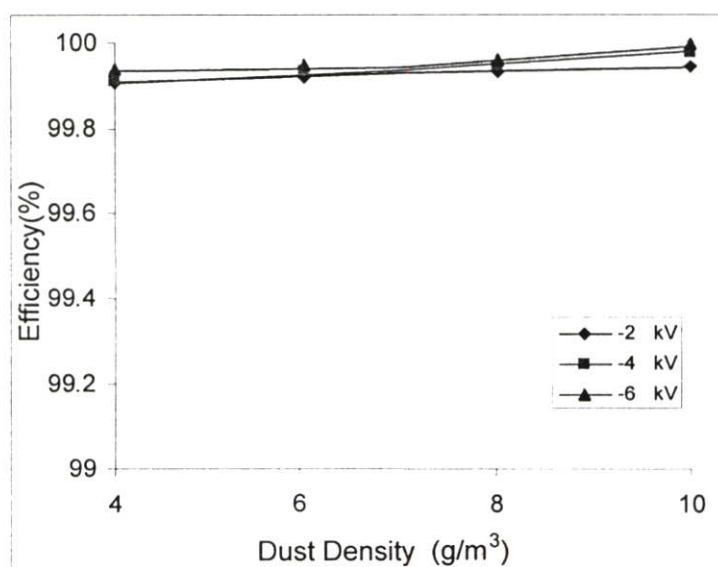
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 30 kV กับอิเล็กโทรดโคโรนาของ

ไซโคลนดักฝุ่น

2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 2 kV กับอิเล็กโตรดระนาบของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต
3. ปรับความเร็วของชุดปล่อยฝุ่น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$
4. จัดเตรียม Universal Sample Pump 2 เครื่อง สำหรับดักฝุ่นด้านอินพุตและเอาต์พุต
5. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
6. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดอิเล็กโตรดดักฝุ่นที่ระดับ 2 kV
7. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ซึ่งน้ำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนดักฝุ่นจนหมด
8. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวด์
9. ทำการเก็บแผ่นกรองฝุ่นที่ดักได้ทางด้านเอาต์พุต มาทำการชั่งน้ำหนักแล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักแผ่นกรองฝุ่นด้านอินพุต เพื่อหาปริมาณฝุ่นที่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตดักได้ และรวมกับปริมาณฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ จึงไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักฝุ่นที่ใส่เข้ามาทั้งหมด เพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบ บันทึกผลการทดสอบ
10. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า 4 และ 6 kV ตามลำดับ

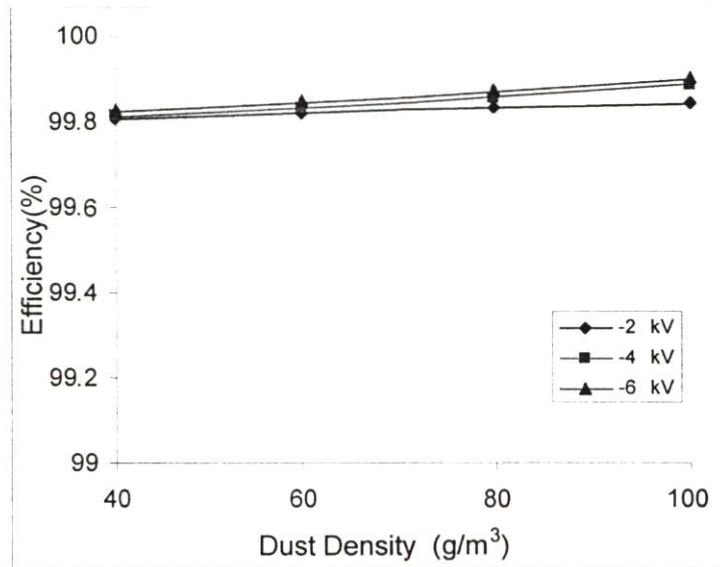
ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กโตรดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$

จากรูป 4.22 (ตาราง ง.42, ง.43, ง.44) พบว่าที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงจะโดนไซโคลนดักไปก่อนแล้ว จากนั้นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะมีความหนาแน่นฝุ่นลดลง ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้า

สถิติจึงมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.97 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์ดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

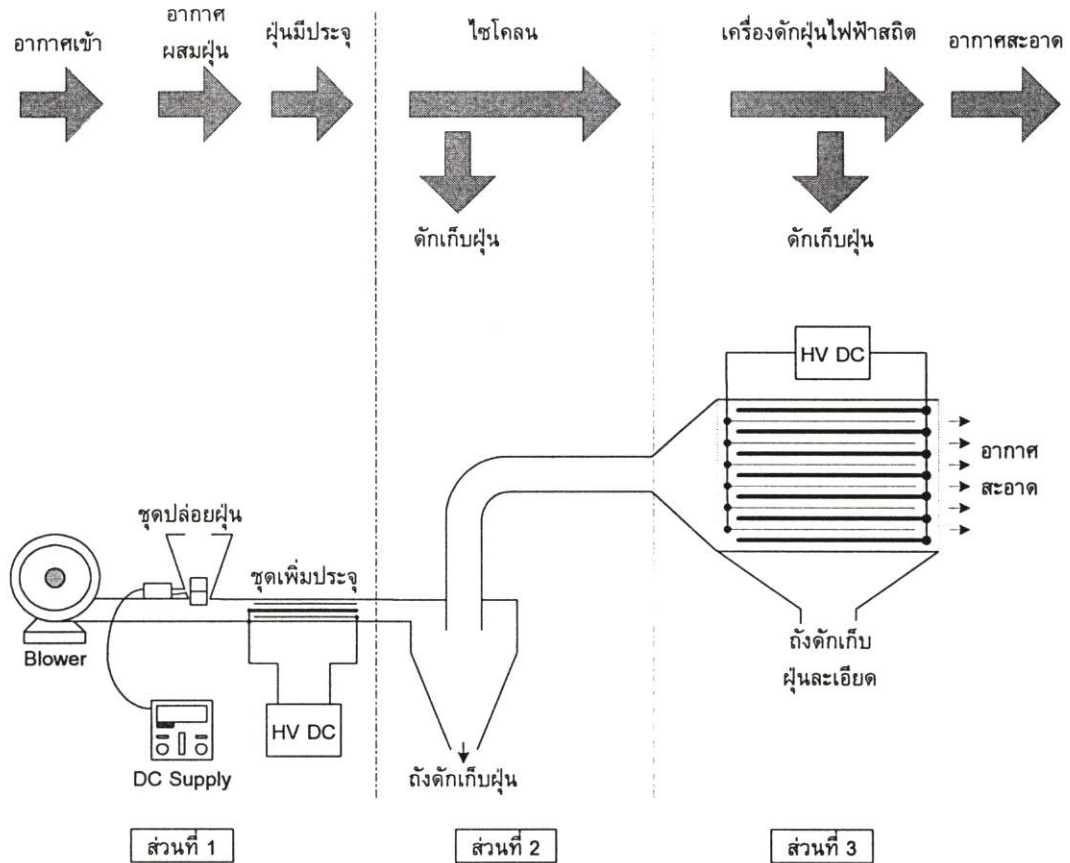
จากรูป 4.23 (ตาราง ง.45, ง.46, ง.47) พบว่าที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงจะโดนไซโคลนดักไปก่อนแล้ว จากนั้นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะมีความหนาแน่นฝุ่นลดลง ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.89 เปอร์เซ็นต์

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.97 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 10 g/m³ และจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.89 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 100 g/m³ เมื่อทำการทดสอบร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไซโคลนสนามไฟฟ้า ปริมาณฝุ่นที่หลุดลอดมาจากไซโคลนจะมาปริมาณน้อย ทำให้ความหนาแน่นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีระดับความหนาแน่นฝุ่นต่ำ ส่งผลให้ชุดดักฝุ่นอิเล็กทรอนิกส์มีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง

4.8 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าร่วมกับไซโคลนดักฝุ่นและชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เป็นการทดสอบอุปกรณ์ส่วนที่ 1 ร่วมกับส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3 ของรูป 4.1 ในการทดสอบชุดไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบ เพื่อหาขีดความสามารถในการดักฝุ่นเมื่อทำงานร่วมกัน ใช้อัตราการความหนาแน่นของฝุ่น $4-10 \text{ g/m}^3$ และ $40-100 \text{ g/m}^3$



รูปที่ 4.24 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าร่วมกับไซโคลน และชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

เมื่ออากาศผ่านชุดปล่อยฝุ่น จะมีฝุ่นผสมมากับอากาศแล้วไหลเข้าสู่ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่นก่อนไหลเข้าไซโคลนเพื่อทำหน้าที่ดักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยฝุ่นที่ดักได้จะตกลงด้านล่างของไซโคลนลงในถังเก็บฝุ่น และฝุ่นส่วนหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กและไซโคลนไม่สามารถดักได้จะไหลไปตามกระแสก๊าซออกจากด้านบนของไซโคลนซึ่งจะมีความหนาแน่นฝุ่นต่ำ จะไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบ อากาศที่ไหลออกอีกด้านของเครื่องจะกลายเป็นอากาศสะอาดก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก

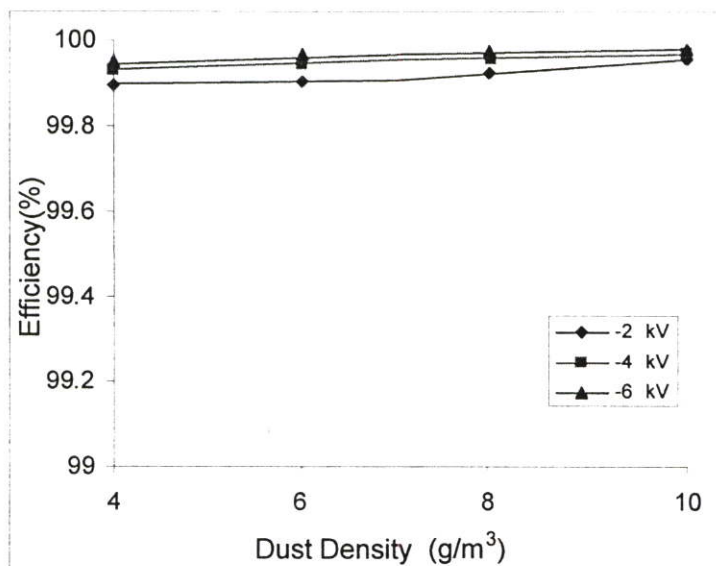
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 0 – 50 kV_{dc}
2. ไซโคลนสนามไฟฟ้า
3. ต้นแบบเครื่องดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิว
4. ฝุ่นทดสอบที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
5. พัดลม Blower และชุดปล่อยฝุ่น
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องชั่งดิจิทัล
8. Universal Sample Pump และกระดาษกรอง

ขั้นตอนการทดสอบ

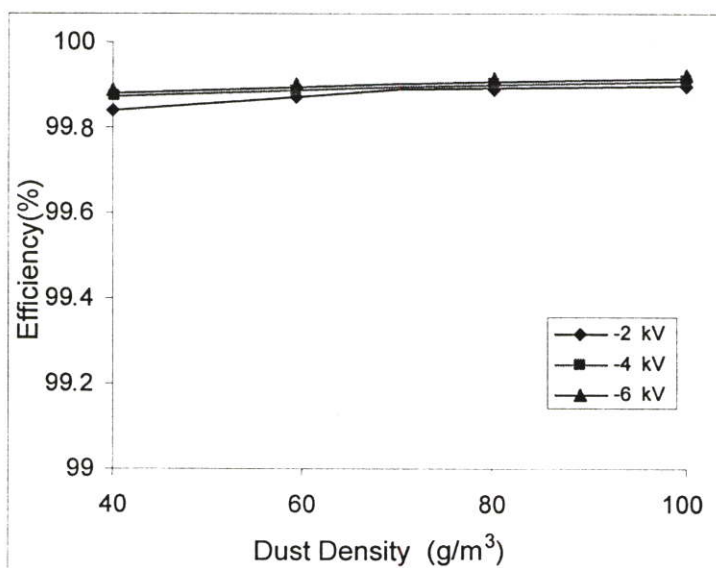
1. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง +8 kV กับชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้ฝุ่น
2. ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง -2 kV กับอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต
3. ปรับอัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ และ 40-100 g/m³
4. จัดเตรียม Universal Sample Pump 2 เครื่อง สำหรับดักฝุ่นด้านอินพุทและเอาต์พุท
5. ปรับวาล์วควบคุมความเร็วลมที่ 15 m/s
6. ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวที่ระดับ 2 kV
7. ปล่อยฝุ่นทดสอบที่ซึ่งน้ำหนักก่อนทดสอบ ลงในกล่องปล่อยฝุ่น และปล่อยให้ฝุ่นลงไปผสมกับอากาศที่ไหลในท่อ เพื่อเข้าไซโคลนดักฝุ่นทั้งหมด
8. ปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง แล้วทำการดิสชาร์จลงกราวนด์
9. ทำการเก็บแผ่นกรองฝุ่นที่ดักได้ทางด้านเอาต์พุท มาทำการชั่งน้ำหนักแล้วไปคำนวณเทียบกับน้ำหนักแผ่นกรองฝุ่นด้านอินพุท เพื่อหาน้ำหนักฝุ่นที่ดักได้ โดยรวมกับน้ำหนักฝุ่นที่ไซโคลนดักได้ จำนวนเทียบกับปริมาณฝุ่นที่ผสมเข้ามา เพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบ บันทึกผลการทดสอบ
10. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 2 – ข้อ 8 โดยเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า 4 และ 6 kV ตามลำดับ

ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

จากรูป 4.25 (ตาราง ง.48, ง.49, ง.50) พบว่าที่ไซโคลนจะทำหน้าที่ดักฝุ่นและทำให้ความหนาแน่นฝุ่นลดลงที่ด้านออกของไซโคลน ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.98 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดอิเล็กทรอนิกส์โทรดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

จากรูป 4.26 (ตาราง ง.51, ง.52, ง.53) พบว่าฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะมีความหนาแน่นฝุ่นลดลง เนื่องจากถูกไซโคลนดักไว้ก่อนแล้ว ส่งผลให้ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตจึงมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง และเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถอยู่ที่ระดับ 99.93 เปอร์เซ็นต์

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

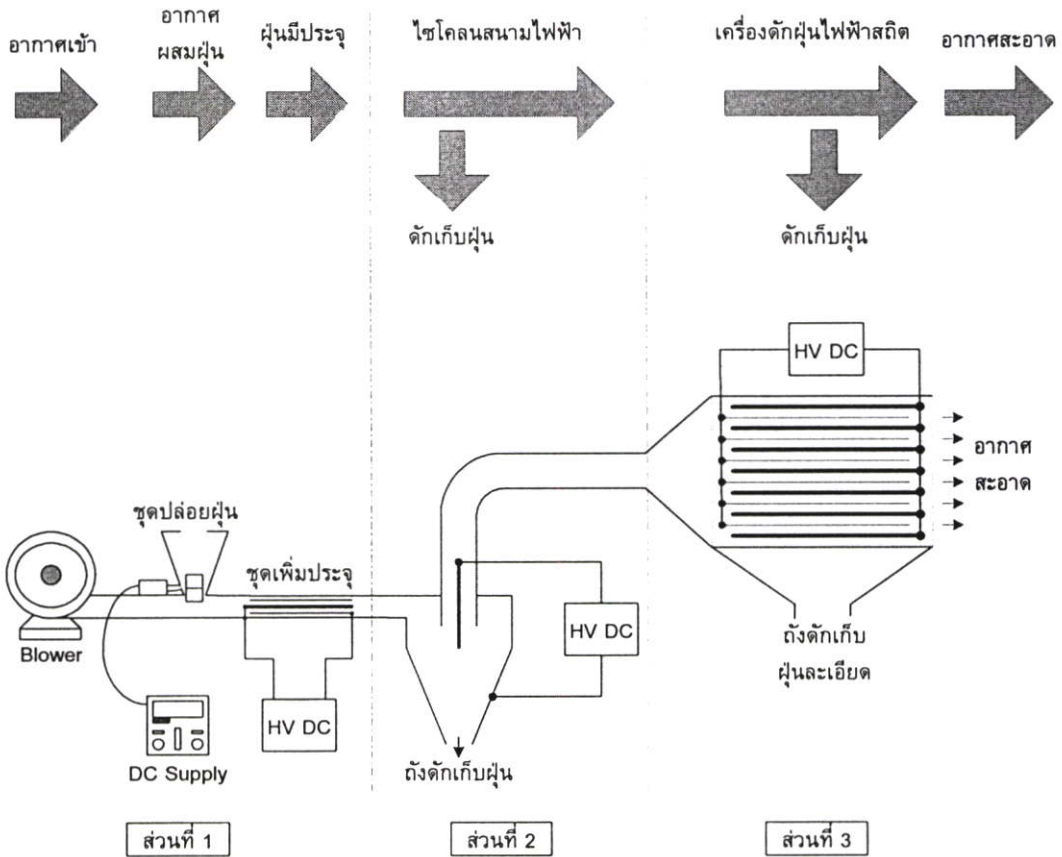
จากการทดสอบพบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อขีดความสามารถในการดักฝุ่น โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้า -6 kV จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.98 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 10 g/m^3 และจะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.93 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราความหนาแน่นของฝุ่น 100 g/m^3 เมื่อทำการทดสอบร่วมกันทั้ง 3 ส่วน ปริมาณฝุ่นที่หลุดออกมาจากไซโคลนจะมีปริมาณน้อย ทำให้ความหนาแน่นฝุ่นที่ไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีระดับความหนาแน่นฝุ่นต่ำ ส่งผลให้ชุดดักฝุ่นอิเล็กทรอนิกส์มีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูง

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ต้นแบบเครื่องดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าเมื่อทำการออกแบบและจัดสร้างส่วนประกอบของชุดทดสอบครบทั้ง 3 ส่วนแล้วได้นำมาทดสอบขีดความสามารถในการดักฝุ่นที่เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ชนิดของขั้วแรงดันไฟฟ้า อัตราความหนาแน่นของฝุ่นในอากาศ ความเร็วลม เพื่อให้ทราบคุณสมบัติของเครื่องดักฝุ่นสำหรับนำไปพิจารณาเลือกระบบดักฝุ่นที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการดักฝุ่น



รูปที่ 5.1 ระบบดักฝุ่นทั้ง 3 ส่วนเมื่อทำงานร่วมกัน

จากรูปที่ 5.1 ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น ทำหน้าที่เพิ่มประจุให้อนุภาคฝุ่นมีประจุสถิต ส่วนที่ 2 คือไซโคลนสนามไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ดักฝุ่นด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีประจุ และส่วนที่ 3 ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซาบสำหรับดักฝุ่นละเอียด

5.2 โครงสร้างของระบบดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต

โครงสร้างต้นแบบของระบบดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิต ได้มีการออกแบบในบทที่ 3 และการทดสอบประสิทธิภาพในบทที่ 4 โดยทำการศึกษาข้อมูลและสร้างชุดทดสอบให้สอดคล้องกับจุดมุ่งหมายของการนำไปใช้งานและความเป็นไปได้ในการเพิ่มขีดความสามารถของไซโคลนดักฝุ่นที่สูงและเหมาะสม สามารถสรุปคุณลักษณะของส่วนประกอบหลักทั้ง 3 ส่วน ดังนี้

- ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่น ประกอบด้วยอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่นให้มีประจุ ซึ่งอนุภาคที่มีประจุสถิตจะวิ่งเข้าสู่ผนังไซโคลนซึ่งเป็นขั้วกราวนด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงขึ้น ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าให้อนุภาคฝุ่นประกอบด้วยท่อสแตนเลสหนา 1 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 cm, 1.8 cm, 5.4 cm ซ้อนกันตามแนวยาว ติดตั้งบริเวณท่อก่อนทางเข้าของไซโคลน ออกแบบจากหลักมิติที่เหมาะสมเพื่อให้อนุภาคฝุ่นสามารถรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวของอิเล็กโทรด เมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก 8 kV โดยจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³ มีประสิทธิภาพในการดักฝุ่นสูงสุดที่ 98.72 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มจากไซโคลนธรรมดาประมาณ 1.96 เปอร์เซ็นต์ และที่ความหนาแน่นฝุ่น 10 g/m³ จะมีประสิทธิภาพในการดักฝุ่นของไซโคลนสูงสุดที่ 97.63 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มจากไซโคลนธรรมดา 3 เปอร์เซ็นต์

- ชุดดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้สนามไฟฟ้า ใช้อิเล็กโทรดโคโรนาทำจากแท่งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.48 mm ขนาดความยาว 30 cm และใช้ตัวถังของไซโคลนเป็นขั้วอิเล็กโทรดกราวนด์ ทำหน้าที่สร้างความเข้มสนามไฟฟ้า ชุดทดสอบตัวดักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้สนามไฟฟ้า มีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงเมื่อทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ 30 kV และที่ความหนาแน่นฝุ่น 100 g/m³ จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขีดความสามารถจากไซโคลนแบบเดิมประมาณ 2.68 เปอร์เซ็นต์ และที่ความหนาแน่นฝุ่น 10 g/m³ จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 98.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถเพิ่มขีดความสามารถจากไซโคลนแบบเดิมประมาณ 3.73 เปอร์เซ็นต์

- ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบ เป็นชุดดักฝุ่นที่ใช้อิเล็กโทรดแบบระนาบใช้เทคนิคการฉนวนเพื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนอากาศ เมื่ออนุภาคฝุ่นที่มีประจุเคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงจะเกิดแรงกระทำต่อประจุนั้นๆ ให้เคลื่อนไปเกาะติดที่แผ่นอิเล็กโทรด แผ่นอิเล็กโทรดเป็นแผ่นทองแดงเคลือบฉนวนอีพ็อกซีด้านเดียวหนา 2 mm เมื่อวางอิเล็กโทรดเพลทซ้อนกันช่องว่างระหว่างเพลทจะเป็นฉนวนอีกชั้นหนึ่งซึ่งเป็นอากาศ โดยมี

ประสิทธิภาพในการดักฝุ่นสูงเมื่อทำงานที่ความหนาแน่นฝุ่นต่ำ จะมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุดที่ 99.56 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบที่ความหนาแน่นฝุ่น 20 g/m³ และทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรงชั่วพลบ 6 kV

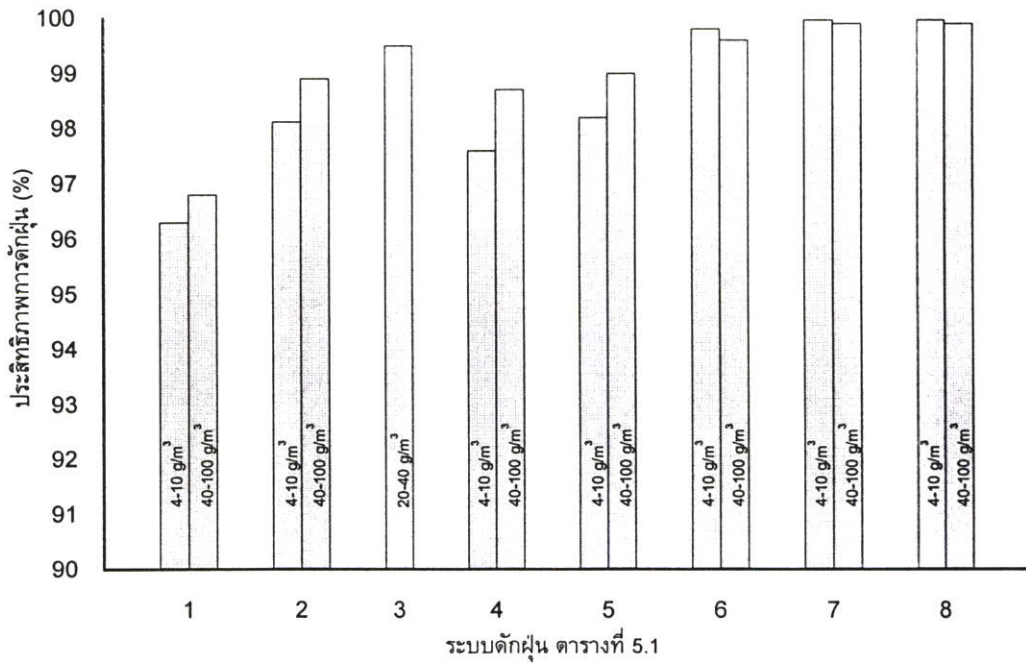
5.3 การพิจารณาขีดความสามารถในการดักฝุ่นของชุดทดสอบ

เป็นการนำขีดความสามารถในการดักฝุ่นของแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจและเลือกระบบดักฝุ่นให้เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดในการลดมลภาวะอากาศ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบขีดความสามารถในการดักฝุ่นในแต่ละส่วนของระบบรวม

ระบบดักฝุ่น	ความหนาแน่นฝุ่น (g/m ³)	ประสิทธิภาพ การดักฝุ่น (%)
1. ไชโคลน	4-10	96.34
	40-100	96.76
2. ไชโคลนสนามไฟฟ้า	4-10	98.15
	40-100	98.90
3. ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	20-60	99.56
4. ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า+ไชโคลน	4-10	97.63
	40-100	98.72
5. ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า+ไชโคลนสนามไฟฟ้า	4-10	98.21
	40-100	99.02
6. ไชโคลน+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	4-10	99.87
	40-100	99.63
7. ไชโคลนสนามไฟฟ้า+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	4-10	99.97
	40-100	99.89
8. ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า+ไชโคลน+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต	4-10	99.98
	40-100	99.93

จากตารางที่ 5.1 เมื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถสูงสุดของอุปกรณ์แต่ละส่วนและการนำอุปกรณ์ส่วนอื่นมาทำงานร่วมกัน จะสามารถเปรียบเทียบได้ ดังนี้



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของระบบเมื่อแต่ละส่วนทำงานร่วมกัน

จากรูปที่ 5.2 เมื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถสูงสุดของอุปกรณ์แต่ละส่วนและการนำอุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วนมาทำงานร่วมกัน พบว่า

1. ไซโคลนแบบธรรมดาจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่ความเร็วลม 15 m/s เหมาะกับการดักเก็บอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ โครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงได้ ประสิทธิภาพการดักฝุ่นประมาณ 96-97 %
2. ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าและไซโคลนสนามไฟฟ้า สามารถเพิ่มขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงกว่าไซโคลนแบบธรรมดากว่า 2.14 % และเมื่อต่อใช้งานร่วมกันจะต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง 2 ชุด แต่เพิ่มประสิทธิภาพในการดักฝุ่นเพียง 0.12 % เมื่อเทียบกับไซโคลนสนามไฟฟ้าเพียงตัวเดียว
3. ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต มีประสิทธิภาพในการดักฝุ่น 99 % เหมาะสำหรับงานที่มีอัตราความหนาแน่นฝุ่นต่ำ ไม่เหมาะกับการที่มีอัตราความหนาแน่นฝุ่นสูงเนื่องจากจะเกิดฝุ่นตกตะกอนและอุดตันภายในท่อ เมื่อมีฝุ่นสะสมบนผิวอิเล็กโทรดประสิทธิภาพการดักฝุ่นจะลดลง
4. ไซโคลนธรรมดา+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ไซโคลนจะช่วยดักฝุ่นเพื่อลดอัตราความหนาแน่นของฝุ่นก่อนจะไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบ สามารถใช้ได้กับงานที่มีความหนาแน่นฝุ่นสูงหรือความหนาแน่นฝุ่นต่ำก็ได้

ได้ ดังนั้นจึงเหมาะกับงานที่มีอัตราความหนาแน่นฝุ่นที่ไม่คงที่ ประสิทธิภาพสูงกว่า 99 % และเมื่อสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลนทำงานร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 2 ชุด แต่ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพไซโคลนธรรมดาได้กว่า 2.87 %

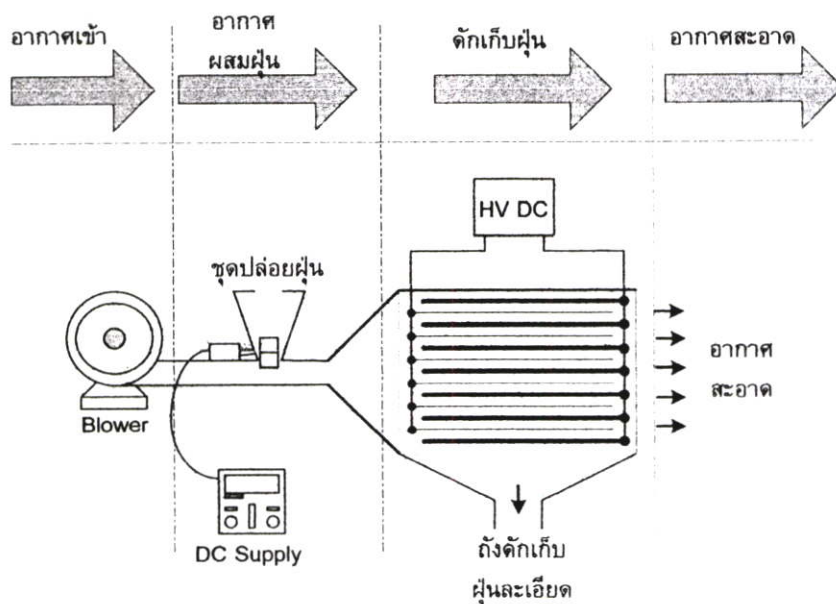
5. ชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า+ไซโคลนธรรมดา+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะต่อร่วมกันและทำงานร่วมกันทั้ง 3 ส่วน แต่ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับไซโคลนธรรมดา+ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

เทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไซโคลน โดยใช้หลักการไฟฟ้าสถิต เป็นการนำความรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและการเกิดไฟฟ้าสถิตมาประยุกต์สร้างระบบดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสก๊าซในวิถีโค้ง และแรงของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดโคโรนา กับผนังไซโคลนซึ่งเป็นกราวนด์ ทำให้แรงของสนามไฟฟ้ามีทิศทางจากศักย์สูงไปยังศักย์ต่ำ เมื่ออนุภาคฝุ่นเคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น แรงของสนามไฟฟ้าจะกระทำต่ออนุภาคฝุ่นไม่ให้เกาะผนังไซโคลนและจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของกระแสก๊าซไปยังด้านล่างของไซโคลน ส่วนกระแสก๊าซจะไหลย้อนออกทางด้านบนของไซโคลนและไหลเข้าสู่ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบใช้เทคนิคฉนวน 2 ชั้น เพื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าในย่านดักฝุ่น จากการทดสอบอุปกรณ์บางส่วนในบทที่ 3 และการทดสอบอุปกรณ์ร่วมกันในแต่ละส่วนในบทที่ 4 สามารถสรุปแนวทางการเลือกระบบดักฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงให้เหมาะสมกับลักษณะงานและความต้องการ โดยแบ่งจากความหนาแน่นฝุ่นเชิงปริมาตรอากาศ ดังนี้

1. ลักษณะงานที่มีความหนาแน่นฝุ่นต่ำและอัตราการไหลของลมไม่สูงนัก ควรเลือกใช้ชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรดระนาบฉนวน 2 ชั้น เนื่องจากมีขีดความสามารถในการดักฝุ่นสูงสุด 99.56 เปอร์เซ็นต์ และเหมาะกับการดักฝุ่นขนาดเล็กๆ



รูปที่ 6.1 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

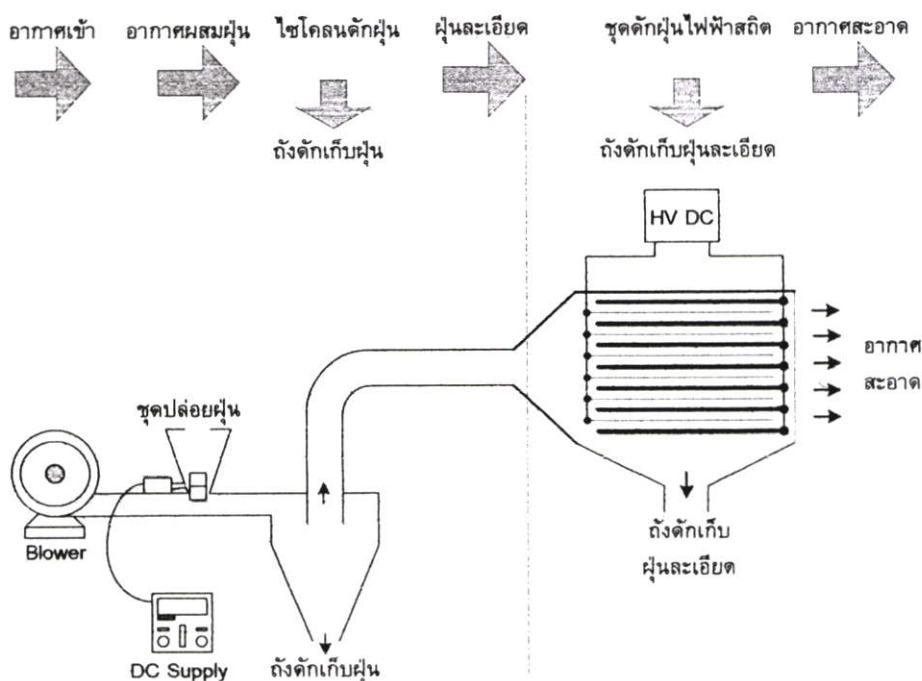
ข้อดีของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

- สามารถดักฝุ่นที่มีขนาดเล็กมากๆ
- ลดมลภาวะจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง
- สามารถติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบจนวน 2 ชั้นแทนอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบเดิมได้
- ไม่มีมลภาวะทางเสียง
- บำรุงรักษาได้ง่าย
- ต้นทุนในการสร้างไม่สูง เนื่องจากใช้วัสดุในประเทศ

ข้อเสียชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

- ไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมที่ฝุ่นมีความชื้นสูงหรือฝุ่นเปียก
- อุปกรณ์บางชิ้นไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้
- การติดตั้งต้องมีระบบกราวด์เพื่อความปลอดภัย
- เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะเกิดปริมาณฝุ่นสะสมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรดทำให้ประสิทธิภาพลดลง

2. ลักษณะงานที่มีความหนาแน่นฝุ่นสูงหรือความหนาแน่นฝุ่นไม่คงที่ ควรเลือกใช้ไซโคลนธรรมชาติร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดจนวน 2 ชั้น เนื่องจากมีขีดความสามารถสูงสุด 99.87 เปอร์เซ็นต์ และเหมาะกับการดักฝุ่นที่ความหนาแน่นฝุ่นสูงและความหนาแน่นฝุ่นต่ำ



รูปที่ 6.2 วงจรการทดสอบประสิทธิภาพไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ข้อดีของไซโคลนธรรมชาติกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

- สามารถใช้กับโรงสีที่มีกำลังการผลิตไม่คงที่ๆ
- ลดมลภาวะจากการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง
- สามารถติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์แบบจนวน 2 ชั้นแทนอิเล็กทรอนิกส์แบบเดิมได้
- ไม่มีมลภาวะทางเสียง
- บำรุงรักษาได้ง่าย
- ต้นทุนในการสร้างไม่สูง เนื่องจากใช้วัสดุในประเทศ

ข้อเสียไซโคลนธรรมชาติกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิต

- ไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมที่ฝุ่นมีความชื้นสูงหรือฝุ่นเปียก
- อุปกรณ์บางชิ้นไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้
- การติดตั้งต้องมีระบบกราวด์เพื่อความปลอดภัย
- เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะเกิดปริมาณฝุ่นสะสมบนอิเล็กทรอนิกส์โทรรคทำให้ประสิทธิภาพลดลง

จากการพิจารณาเลือกระบบคักฝุ่นประสิทธิภาพสูง น่าจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมประเภทโรงสีข้าวอย่างยิ่ง และสามารถแก้ปัญหาหมอกภาวะอากาศที่มีอยู่ในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี

แนวทางการพัฒนา

ระบบคักฝุ่นแบบไซโคลน โดยใช้ไฟฟ้าสถิต ควรมีการออกแบบจนวนที่ดีเนื่องจากมีการใช้แรงดันค่อนข้างสูง อาจมีการศึกษาการใช้เทคนิคจนวนหลายชั้นสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าในไซโคลน ชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ระนาบที่จัดสร้างขึ้นควรเพิ่มระบบเขย่าหรือเคาะชุดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อไม่ให้ฝุ่นเกาะสะสมบนอิเล็กทรอนิกส์หนาเกินไป วัสดุที่ใช้ในการทำชุดอิเล็กทรอนิกส์ควรมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนเนื่องจากการเสียดสีหรือฝุ่นที่มีคุณสมบัติเป็นกรด และเลือกใช้วัสดุที่สามารถทนอุณหภูมิสูง เพื่อความเหมาะสมสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรม

อย่างไรก็ตามผู้จัดทำวิทยานิพนธ์หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการทดลองค้นคว้าเรื่องเทคนิคใหม่สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวคักฝุ่นแบบไซโคลนโดยใช้ไฟฟ้าสถิตนี้พอจะเป็นประโยชน์และแนวทางต่อผู้อ่าน และผู้ที่สนใจในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สามารถนำไปพัฒนาและศึกษาทดลองค้นคว้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] E.Kuff, M.Abddulah “**High-Voltage Engineering**”, Oxford, Pergamon Press, 1977.
- [2] E.Kuff, W.S.Zaengl, J.Kufful “**High-Voltage Engineering**”, Second edition 2000, Oxford, Published by Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] L.L. Alston “**High-Voltage Technology**”, London, Oxford University Press, 1968.
- [4] Jaime Benitez “**Process engineering and design for air pollution control**”, PRT Prentice-Hall, Inc., pp.333-413, 1993.
- [5] M.Crawford “**Air Pollution Control Theory**”, McGraw-Hill, Inc., New York, 1976.
- [6] Noel de Nevers “**Air Pollution Control Engineering**”, McGraw-Hill, Inc., pp.201-274, 1989.
- [7] A Mizino “**Electrostatic Precipitation**”, *IEEE Trans. Educ.*, Vol. 7, no. 5, pp.615-624, Oct 2000.
- [8] J. L. G. Corrêa, D. R. Graminho, M. A. Silva, S. A. Nebra “**The cyclonic dryer - a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time**”, *Braz. J. Chem. Eng.*, Vol. 21, no. 1, Mar 2004.
- [9] P. Kerdonfag, P. Kotchapoom, S. Potivejkul, W. Khan-ngern “**A New Technique for Efficiency Increasing of Electrostatic Air Cleaner Using Multi Dielectric Collecting Plates**”, International Conference on Electromagnetic Compatibility ICEMC2005, Phuket, Thailand, pp. 242-245, 2005.
- [10] รศ.ศิริวัฒน์ โภชวิเชกุล “เอกสารประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2544.
- [11] ดร.สำรวย สังข์สะอาด “**วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [12] ศ.ดร.ชิตาโอะ คานาโอกะ, ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล “**มลภาวะอากาศ**”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2527.
- [13] รศ.ดร.ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ศ.ดร.ชิตาโอะ คานาโอกะ, จุฬามาศ เกตุทัต “**มลภาวะอากาศ**”, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

- [14] บ.ยูไนเต็ค แอนนาลิส แอนด์ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด “โครงการสำรวจและศึกษา เพื่อจัดทำมาตรฐานเหตุรำคาญด้านกลิ่น ฟุ้งละออง และเสียงดัง จากกิจการที่เป็นอันตราย ต่อสุขภาพ ประเภทการสีข้าวด้วยเครื่องจักร”, กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2543.
- [15] พงษ์เทพ เกิดคอนแฝก, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ, ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, จักรพงษ์ กลิ่นสะอาด “เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดักฝุ่นแบบไฮโคลนโดยใช้สนามไฟฟ้า”, การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 65-68, 2547.

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก. การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น
- ภาคผนวก ข. วิธีการวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นด้วย Universal Sample Pump
- ภาคผนวก ค. ตารางคุณสมบัติวัสดุ
- ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดสอบ
- ภาคผนวก จ. การ Simulation อิเล็กโทรดชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า
- ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ภาคผนวก ก.

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น

ก.1 การทดสอบหาค่า Permittivity (ϵ_r) ของอนุภาคฝุ่นโดยใช้เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a)

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่น เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a) เพื่อหาค่าคาปาซิแตนซ์ของอนุภาคฝุ่น

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. ฝุ่นที่ใช้ทดสอบขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน
2. อิเล็กโทรดแบบทรงกระบอก $r_1 = 0.5$ cm, $r_2 = 3$ cm, $l = 10$ cm
3. เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a)
4. เครื่องชั่งดิจิทัล

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ต่อชุดอิเล็กโทรดเข้ากับเครื่อง C Tan δ
2. นำตัวอย่างฝุ่นที่เตรียมไว้ใส่เข้าไปในชุดอิเล็กโทรดโดยใส่ให้เต็มและวัดค่าคาปาซิแตนซ์ บันทึกผล
3. เมื่อทราบค่า C ของอนุภาคฝุ่นแล้วทำการคำนวณกลับเพื่อหาค่า Permittivity (ϵ_r) จาก

$$C \text{ ของอนุภาคฝุ่น} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{res}l}{\ln\left(\frac{B}{A}\right)}$$

เมื่อ ϵ_0 คือ เพอร์มิตติวิตีของฟรีสเปซ = 8.85×10^{-12}

l คือ ความสูงของอิเล็กโทรด (m)

B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอิเล็กโทรดชั้นนอก (m)

A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอิเล็กโทรดชั้นใน (m)

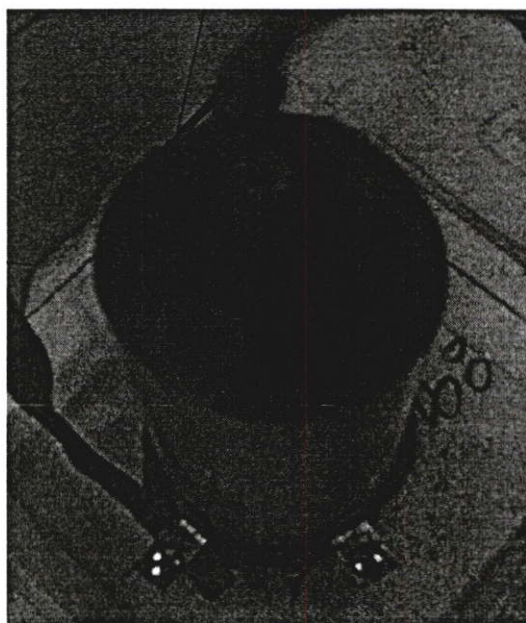
$$9.3 = \frac{2\pi\epsilon_{res}\left(8.854 \times 10^{-12}\right)(0.1)}{\ln\frac{0.03}{0.005}}$$

เมื่อ v_1 และ v_2 เป็นอัตราส่วนของปริมาตรวัสดุที่ผสมกัน จะสามารถหา ϵ_r ของฝุ่นได้จากสมการนี้

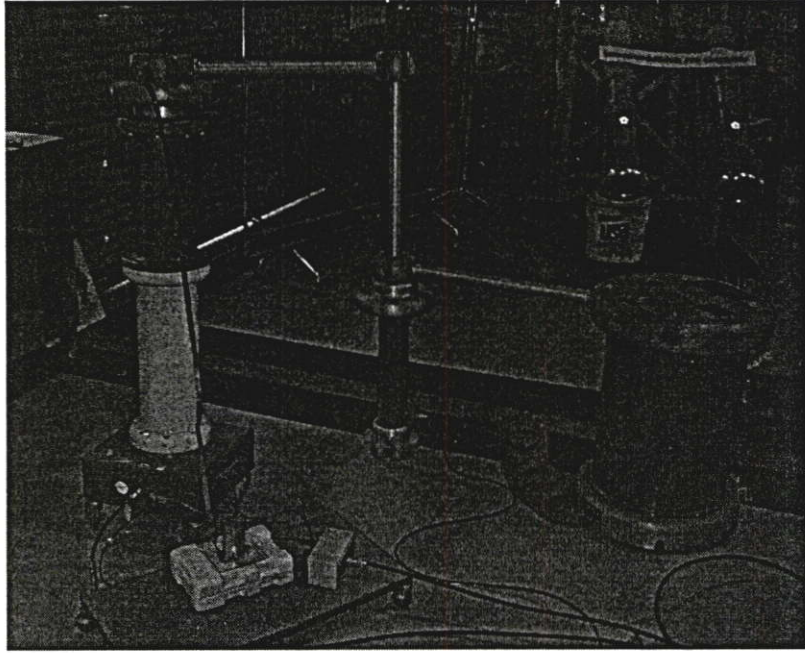
$$\epsilon_{res} = \frac{l}{\frac{v_1}{\epsilon_1} + \frac{v_2}{\epsilon_2}}$$



รูปที่ ก.1 เครื่อง C Tan δ (Tettex 2809a)



รูปที่ ก.2 ชุดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอร์บในการทดสอบ



รูปที่ ก.3 ชุดอุปกรณ์ในการทดสอบ

ภาคผนวก ข.

การวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นด้วย Universal Sample Pump

ข.1 การทดสอบประสิทธิภาพการดักฝุ่น

การคำนวณประสิทธิภาพการดักฝุ่นของไซโคลนสามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักฝุ่นที่ดักได้เทียบกับฝุ่นที่ใส่เข้ามาผสม



รูปที่ ข.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

การคำนวณประสิทธิภาพหาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{น้ำหนักฝุ่นที่ดักได้}}{\text{น้ำหนักฝุ่นที่ผสมกับ อากาศ}} \times 100\%$$

ข.2 การทดสอบประสิทธิภาพของ ESP ด้วย Universal Sample Pump

การคำนวณประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้โดยการสูมตัวอย่างอากาศด้วยเครื่อง Universal Sample Pump บริเวณหน้าเครื่องดักฝุ่นกับบริเวณหลังเครื่องดักฝุ่น แล้วนำแผ่นกรองฝุ่น ไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักฝุ่นก่อนเข้าเครื่องดักฝุ่น และน้ำหนักฝุ่นหลังออกจากเครื่องดักฝุ่นเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพ

การคำนวณประสิทธิภาพหาได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{น้ำหนักฝุ่นที่หน้าเครื่อง} - \text{น้ำหนักฝุ่นที่หลังเครื่อง}}{\text{น้ำหนักฝุ่นที่หน้าเครื่อง}} \times 100\%$$

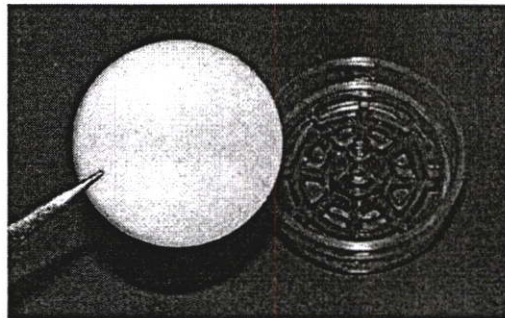
สำหรับวิธีการเตรียมเครื่อง Universal Sample Pump มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียม Support Pad และ Filter ขนาด 37 mm. 5 μm นำไปควบคุมความชื้นใน Dessicator เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



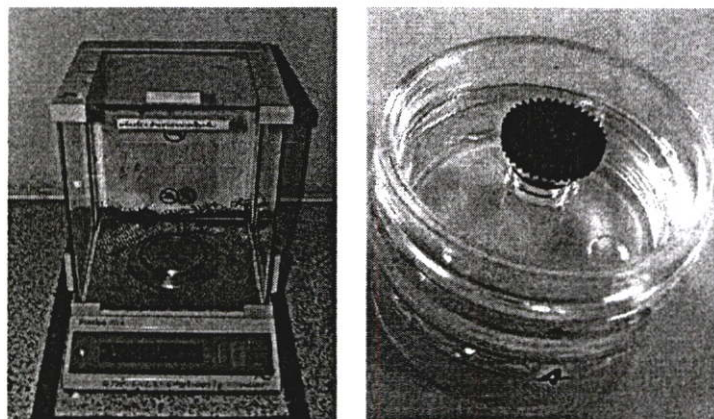
รูปที่ ข.2 แผ่นกรองที่ใช้ในการทดสอบ

2. วาง Support Pad และ Filter ลงใน Cassette (ห้ามใช้มือสัมผัสโดยตรง)



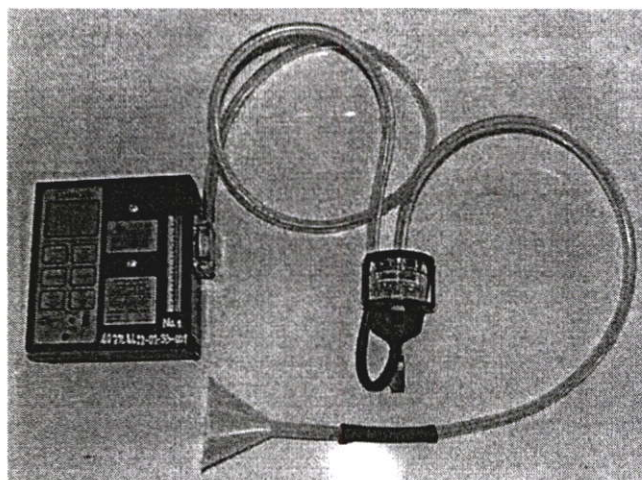
รูปที่ ข.3 แผ่น Support Pad สำหรับรองแผ่นกรองที่ใช้ในการทดสอบ

3. นำ Cassette ที่ประกอบเสร็จแล้วไปชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ



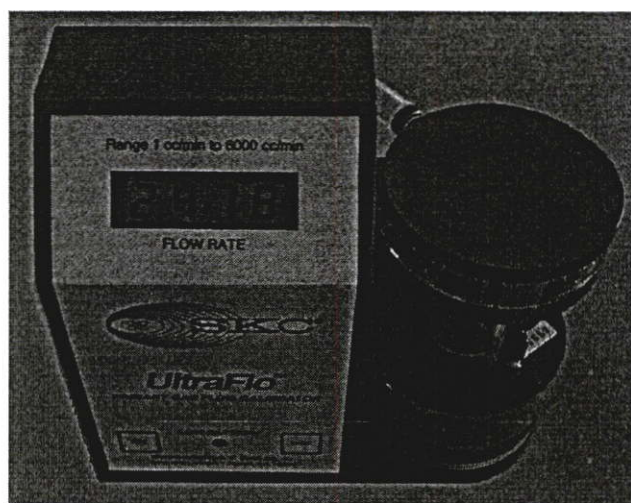
รูปที่ ข.4 ชั่งน้ำหนัก Cassette เป่าก่อนจะนำไปทดสอบ

4. ประกอบ Cassette เข้ากับ Universal Sample Pump

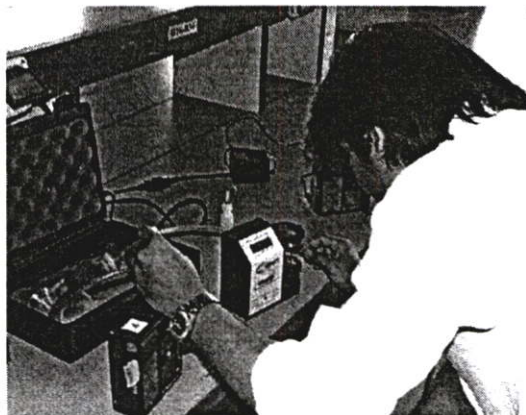


รูปที่ ข.5 เครื่อง Universal Sample Pump อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

5. ทำการตั้งค่าอัตราการไหลของอากาศที่ 2500 cc/min เนื่องจากเป็นอัตราการไหลเดียวกับที่ มนุษย์หายใจ โดยใช้ Gas Flow Calibrator

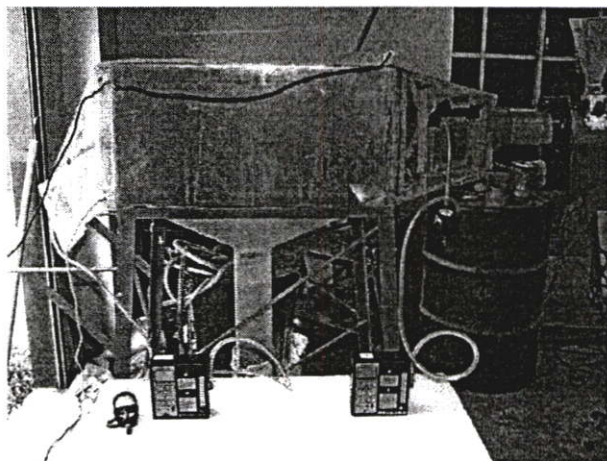


รูปที่ ข.6 เครื่องมือสำหรับปรับอัตราการไหลของ Universal Sample Pump



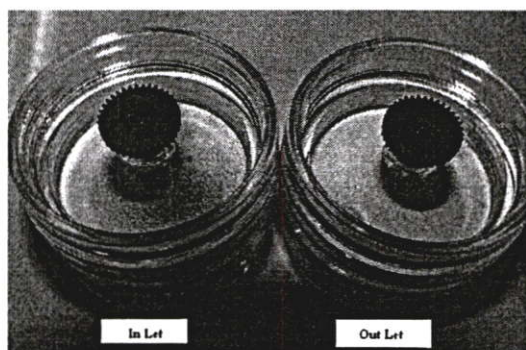
รูปที่ ข.7 การปรับอัตราการไหลของ Universal Sample Pump

6. เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศแล้ว จึงนำไปติดตั้งในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด



รูปที่ ข.8 การวัดประสิทธิภาพการดักฝุ่นของชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวเบอร์

7. ทำการทดสอบตามเงื่อนไขที่กำหนด และนำ Cassette ไปชั่งน้ำหนักฝุ่นที่ดักได้



รูปที่ ข.9 เปรียบเทียบ Cassette ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ภาคผนวก ค.
ตารางคุณสมบัติวัสดุ

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของวัสดุ[13]

Insulating material	ϵ_r (air=1) at 50 Hz	Loss factor		Specific Resistance At 20°C Ωcm	Breakdown Strength kV/cm
		at 50 Hz	at 1 MHz		
Glass	3.5-9	5-100	5-100	$>10^{10}$	10-40
Ceramic insulators					
Glazed porcelain	6	170-250	10-120	$>10^{11}$	35
Steatite	6	10-30	3-20	$10^{12}-10^{13}$	30-45
SINTERKORUND	11	15	10	10^{15}	25-45
Mineral oil (transformer oil)	2-2.5	1-5	1-5	$10^{13}-10^{14}$	10-25
Paper (insulating paper)	2-2.5	25-40	200-400	10^{15}	10-20
Dry					
Soaked in oil	3-4	10-30	240-260	10^{15}	40-50
Phenolic resin moulding	5-15	100-300	50-700	10^9-10^{14}	20-45
Polyamide PA	3.5-4	300-1000	230-270	10^8-10^{11}	10-40
Polyethylene PE	2.3	2-4	2-4	10^6	50
Polyethylene terephthalate	3.2	20	190	$>10^5$	160
PETP					
Polycarbonate PC	3	7	110	$>10^{16}$	>100
Polyacetal POM	4	10-15	55	10^5	70
Polymethylmethacrylate	3.5-4.5	500-600	150-300	10^{16}	≈ 35
PMMA					
Polypropylene PP	2.3-2.5		5-6	10^{16}	75
Polystyrene PS	2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	10^{17}	≈ 55
Polytetrafluorethylene	2.0	< 2	< 2	10^{17}	≈ 25
TPFE					
Polyvinyl choride hard	3.8-4.3	120-1500	60-1000	$10^{15}-10^{16}$	40
PVC					

หมายเหตุ: From SIEMENS Technical Tables 1982 Edition

ภาคผนวก ง.
ตารางผลการทดสอบ

ตารางที่ ง.1 การทดสอบไซโคลนคักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ ความเร็วลม 13 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
13	4	3.9	1	3.5587	91.25
			2	3.5158	90.15
			3	3.5805	91.81
			ค่าเฉลี่ย	3.5517	91.07
	6	5.85	1	5.3498	91.45
			2	5.3223	90.98
			3	5.3755	91.89
			ค่าเฉลี่ย	5.3492	91.44
	8	7.8	1	7.2524	92.98
			2	7.2111	92.45
			3	7.1065	91.11
			ค่าเฉลี่ย	7.1900	92.18
	10	9.75	1	8.8988	91.27
			2	9.0460	92.19
			3	9.1193	93.48
			ค่าเฉลี่ย	9.0197	92.51

ตารางที่ ง.2 การทดสอบไซโคลนคักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ ความเร็วลม 15 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.1404	92.01
			2	4.185	93.00
			3	4.1634	92.52
			ค่าเฉลี่ย	4.1629	92.51
	6	6.75	1	6.2808	93.05
			2	6.3396	93.92
			3	6.3780	94.49
			ค่าเฉลี่ย	6.3328	93.82
	8	9.02	1	8.6573	95.98
			2	8.6393	95.78
			3	8.6487	95.88
			ค่าเฉลี่ย	8.6483	95.88
	10	11.25	1	10.8056	96.05
			2	10.8506	96.45
			3	10.8585	96.52
			ค่าเฉลี่ย	10.8382	96.34

ตารางที่ ง.3 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ ความเร็วลม 17 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
17	4	5.1	1	4.7149	92.45
			2	4.7475	93.09
			3	4.6379	90.94
			ค่าเฉลี่ย	4.7001	92.16
	6	7.65	1	7.1152	93.01
			2	6.9844	91.30
			3	7.0670	92.38
			ค่าเฉลี่ย	7.0555	92.23
	8	10.2	1	9.4452	92.60
			2	9.5747	93.87
			3	9.3370	91.54
			ค่าเฉลี่ย	9.4523	92.67
	10	12.75	1	12.0232	44.30
			2	12.1125	95.00
			3	11.8957	93.3
			ค่าเฉลี่ย	12.0105	94.20

ตารางที่ ๓.๔ การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ ความเร็วลม 13 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
13	40	39	1	36.6522	93.98
			2	36.66	94.00
			3	35.8839	92.01
			ค่าเฉลี่ย	36.3987	93.33
	60	58.5	1	54.9783	93.98
			2	55.0953	94.18
			3	54.5805	93.3
			ค่าเฉลี่ย	54.8847	93.82
	80	78	1	74.1858	95.11
			2	72.579	93.05
			3	73.4526	94.17
			ค่าเฉลี่ย	73.4058	94.11
	100	97.5	1	93.5805	95.98
			2	90.6555	92.98
			3	91.5915	93.94
			ค่าเฉลี่ย	91.9425	94.30

ตารางที่ ๓.5 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ ความเร็วลม 15 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.1865	95.97
			2	44.0415	97.87
			3	42.5475	94.55
			ค่าเฉลี่ย	43.2585	96.13
	60	67.5	1	64.7865	95.98
			2	65.5425	97.10
			3	64.476	95.52
			ค่าเฉลี่ย	64.935	96.20
	80	90	1	86.886	96.54
			2	86.58	96.20
			3	86.922	96.58
			ค่าเฉลี่ย	86.796	96.44
	100	112.5	1	108.8663	96.77
			2	111.139	98.79
			3	106.56	94.72
			ค่าเฉลี่ย	108.855	96.76

ตารางที่ ๖.๖ การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ ความเร็วลม 17 m/s

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.54 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78.4 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
17	40	51	1	47.43	93.00
			2	48.0879	94.29
			3	47.0322	92.22
			ค่าเฉลี่ย	47.5167	93.17
	60	76.5	1	71.1373	92.99
			2	72.5756	94.87
			3	71.8335	93.9
			ค่าเฉลี่ย	71.8488	93.92
	80	102	1	97.002	95.10
			2	95.829	93.95
			3	94.9926	93.13
			ค่าเฉลี่ย	95.9412	94.06
	100	127.5	1	102.4748	94.49
			2	119.863	94.01
			3	121.0103	94.91
			ค่าเฉลี่ย	120.4493	94.47

ตารางที่ ง.7 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตเตอร์แบบอเนกประสงค์ อัตราความ
หนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดันทดสอบ +8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2691	94.87
			2	4.3402	96.45
			3	4.2453	94.34
			ค่าเฉลี่ย	4.2848	95.22
	6	6.75	1	6.4395	95.40
			2	6.5549	97.11
			3	6.5266	96.69
			ค่าเฉลี่ย	6.507	96.40
	8	9.02	1	8.7115	96.58
			2	8.9397	99.11
			3	8.7458	96.96
			ค่าเฉลี่ย	8.799	97.55
	10	11.25	1	11.0227	97.98
			2	10.8878	96.78
			3	11.0396	98.13
			ค่าเฉลี่ย	10.5834	97.63

ตารางที่ ๖.๘ การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์โทรดแบบระนาบกับเส้นลวด อัตราความ
หนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดันทดสอบ +8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2201	93.78
			2	4.2813	95.14
			3	4.2709	94.91
			ค่าเฉลี่ย	4.2574	94.61
	6	6.75	1	6.4193	95.10
			2	6.4199	95.11
			3	6.5644	97.25
			ค่าเฉลี่ย	6.4679	95.82
	8	9.02	1	8.5916	95.25
			2	8.5789	95.11
			3	8.8856	98.51
			ค่าเฉลี่ย	8.6854	96.29
	10	11.25	1	10.9125	97.00
			2	11.0374	98.11
			3	10.9091	96.97
			ค่าเฉลี่ย	10.953	97.36

ตารางที่ ง.9 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์แบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม อัตรา
ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดันทดสอบ +8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.65	97.00
			2	44.001	97.78
			3	44.3925	98.65
			ค่าเฉลี่ย	44.0145	97.81
	60	67.5	1	66.2243	98.11
			2	66.2243	98.11
			3	66.528	98.56
			ค่าเฉลี่ย	66.3255	98.26
	80	90	1	87.399	97.11
			2	89.883	99.87
			3	88.479	98.31
			ค่าเฉลี่ย	88.587	98.43
	100	112.5	1	110.2613	98.01
			2	111.4875	99.10
			3	111.4313	99.05
			ค่าเฉลี่ย	111.0600	98.72

ตารางที่ ง.10 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม อัตรา
ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดันทดสอบ +7 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2534	94.52
			2	4.3592	96.87
			3	4.1855	93.01
			ค่าเฉลี่ย	4.2660	94.80
	6	6.75	1	6.4402	95.41
			2	6.4881	96.12
			3	6.5502	97.04
			ค่าเฉลี่ย	6.4928	96.19
	8	9.02	1	8.6646	96.06
			2	9.0083	99.87
			3	8.4698	93.90
			ค่าเฉลี่ย	8.7142	96.61
	10	11.25	1	10.9328	97.18
			2	11.0801	98.49
			3	10.8765	96.68
			ค่าเฉลี่ย	10.9631	97.45

ตารางที่ ง.11 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม อัตรา
ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดันทดสอบ +7 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.0415	97.87
			2	43.704	97.12
			3	43.7445	97.21
			ค่าเฉลี่ย	43.83	97.40
	60	67.5	1	65.88	97.60
			2	65.5763	97.15
			3	66.2243	98.11
			ค่าเฉลี่ย	65.8935	97.62
	80	90	1	88.182	97.98
			2	89.199	99.11
			3	86.706	96.34
			ค่าเฉลี่ย	88.029	97.81
	100	112.5	1	109.1475	97.02
			2	111.465	99.08
			3	110.576	98.29
			ค่าเฉลี่ย	110.3961	98.13

ตารางที่ ง.12 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม อัตรา
ความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดันทดสอบ -8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2692	94.87
			2	4.2799	95.11
			3	4.1949	93.22
			ค่าเฉลี่ย	4.248	94.40
	6	6.75	1	6.4199	95.11
			2	6.4206	95.12
			3	6.4294	95.25
			ค่าเฉลี่ย	6.4233	95.16
	8	9.02	1	8.6592	96.00
			2	8.8297	97.89
			3	8.5753	95.07
			ค่าเฉลี่ย	8.6880	96.32
	10	11.25	1	11.0441	98.17
			2	10.9743	97.55
			3	10.773	95.76
			ค่าเฉลี่ย	10.9304	97.16

ตารางที่ ง.13 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกซ้อนกันร่วม อัตรา
ความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดันทดสอบ -8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	42.759	95.02
			2	44.599	99.11
			3	40.919	90.93
			ค่าเฉลี่ย	42.759	95.02
	60	67.5	1	66.224	98.11
			2	66.319	98.25
			3	64.955	96.23
			ค่าเฉลี่ย	65.833	97.53
	80	90	1	89.469	99.41
			2	87.426	97.14
			3	88.947	98.83
			ค่าเฉลี่ย	88.614	98.46
	100	112.5	1	109.294	97.15
			2	111.938	99.50
			3	111.240	98.88
			ค่าเฉลี่ย	110.824	98.51

ตารางที่ ง.14 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิมิตเตอร์กับเส้นลวด อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดันทดสอบ +8 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.5 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.6 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.001	97.78
			2	43.250	96.11
			3	44.276	99.39
			ค่าเฉลี่ย	43.992	97.76
	60	67.5	1	66.218	98.10
			2	65.484	96.87
			3	67.068	99.36
			ค่าเฉลี่ย	66.257	98.11
	80	90	1	88.299	98.11
			2	89.199	99.11
			3	87.723	97.47
			ค่าเฉลี่ย	88.407	98.23
	100	112.5	1	110.250	98.00
			2	111.229	98.87
			3	110.419	98.15
			ค่าเฉลี่ย	110.633	98.34

ตารางที่ ง.15 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ จ่ายแรงดันที่

แกนกลาง +30 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.3403	96.45
			2	4.2764	95.03
			3	4.3124	95.83
			ค่าเฉลี่ย	4.3097	95.77
	6	6.75	1	6.4611	95.72
			2	6.4881	96.12
			3	6.5273	96.70
			ค่าเฉลี่ย	6.4922	96.18
	8	9.02	1	8.6123	95.48
			2	8.7395	96.89
			3	8.7801	97.34
			ค่าเฉลี่ย	8.7106	96.57
	10	11.25	1	10.9373	97.22
			2	11.0464	98.19
			3	10.8923	96.82
			ค่าเฉลี่ย	10.9586	97.41

ตารางที่ ง.16 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ จ่ายแรงดันที่
แท่งโคโรนา +30 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จับความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2849	95.22
			2	4.3578	96.84
			3	4.3497	96.66
			ค่าเฉลี่ย	4.3308	96.24
	6	6.75	1	6.6164	98.02
			2	6.5482	97.01
			3	6.4881	96.12
			ค่าเฉลี่ย	6.5509	97.05
	8	9.02	1	8.7196	96.67
			2	8.8342	97.94
			3	8.7837	97.38
			ค่าเฉลี่ย	8.7792	97.33
	10	11.25	1	11.0408	98.14
			2	10.9215	97.08
			3	11.0250	98.00
			ค่าเฉลี่ย	10.9958	97.74

ตารางที่ ง.17 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ จำแรงแดันที่
แท่งโคโรนา +30 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จับความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.2260	98.28
			2	44.7930	99.54
			3	43.4970	96.66
			ค่าเฉลี่ย	44.1720	98.16
	60	67.5	1	65.5763	97.15
			2	67.3920	99.84
			3	66.1703	98.03
			ค่าเฉลี่ย	66.3795	98.34
	80	90	1	88.5960	98.44
			2	89.1180	99.02
			3	88.7220	98.58
			ค่าเฉลี่ย	88.8120	98.68
	100	112.5	1	110.1263	97.89
			2	111.3975	99.02
			3	111.6900	99.28
			ค่าเฉลี่ย	111.0713	98.73

ตารางที่ ง.18 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ จ่ายแรงดันที่
แกนกลาง +30 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.5780	96.84
			2	44.1540	98.12
			3	43.8795	97.51
			ค่าเฉลี่ย	43.8795	97.49
	60	67.5	1	66.2513	98.15
			2	65.7720	97.44
			3	65.4548	96.97
			ค่าเฉลี่ย	65.8260	97.52
	80	90	1	88.4520	98.28
			2	87.3180	97.02
			3	88.2090	98.01
			ค่าเฉลี่ย	87.9930	97.77
	100	112.5	1	110.6438	98.35
			2	111.4988	99.11
			3	109.8900	97.68
			ค่าเฉลี่ย	110.6775	98.38

ตารางที่ ง.19 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ จ่ายแรงดันที่
แท่งโคโรนา -30 kV

สถานะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.315	95.88
			2	4.367	97.05
			3	4.313	95.44
			ค่าเฉลี่ย	4.332	96.26
	6	6.75	1	6.579	97.46
			2	6.600	97.78
			3	6.577	97.44
			ค่าเฉลี่ย	6.585	97.56
	8	9.02	1	8.932	99.02
			2	8.841	98.01
			3	8.768	97.21
			ค่าเฉลี่ย	8.847	98.08
	10	11.25	1	11.150	99.11
			2	11.007	97.84
			3	10.969	97.50
			ค่าเฉลี่ย	11.042	98.15

ตารางที่ ง.20 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ จ่ายแรงดันที่
แท่งโคโรนา -30 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.4 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 74.8 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.9965	97.77
			2	44.4915	98.87
			3	44.622	99.16
			ค่าเฉลี่ย	44.37	98.60
	60	67.5	1	66.8993	99.11
			2	66.339	98.28
			3	66.528	98.56
			ค่าเฉลี่ย	66.5887	98.65
	80	90	1	87.831	97.59
			2	89.001	98.89
			3	89.874	99.86
			ค่าเฉลี่ย	88.902	98.78
	100	112.5	1	110.3738	98.11
			2	111.6675	99.26
			3	111.7463	99.33
			ค่าเฉลี่ย	111.2625	98.90

ตารางที่ ง.21 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่น อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ จ่ายแรงดันที่
โคโรนา -25 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2498	94.44
			2	4.2962	95.47
			3	4.9250	96.11
			ค่าเฉลี่ย	4.2903	95.34
	6	6.75	1	6.5232	96.64
			2	6.4287	95.24
			3	6.4679	95.82
			ค่าเฉลี่ย	6.4733	95.90
	8	9.02	1	8.7747	97.28
			2	8.6691	96.11
			3	8.6556	95.96
			ค่าเฉลี่ย	8.6998	96.45
	10	11.25	1	10.7865	95.88
			2	10.9114	96.99
			3	11.0295	98.04
			ค่าเฉลี่ย	10.9091	96.97

ตารางที่ ง.22 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นอัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ จ่ายแรงดันที่
แท่งโคโรนา -25 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จับความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.9740	97.72
			2	44.1090	98.02
			3	43.6905	97.09
			ค่าเฉลี่ย	43.9245	97.61
	60	67.5	1	66.2243	98.11
			2	65.9543	97.71
			3	65.9273	97.67
			ค่าเฉลี่ย	66.0353	97.83
	80	90	1	88.1280	97.92
			2	88.2990	98.11
			3	88.6050	98.45
			ค่าเฉลี่ย	88.3440	98.16
	100	112.5	1	111.4988	99.11
			2	110.5200	98.24
			3	109.4063	97.25
			ค่าเฉลี่ย	110.4750	98.20

ตารางที่ ง.23 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.3574	96.83
			2	4.3065	95.70
			3	4.3272	96.16
			ค่าเฉลี่ย	4.3304	96.23
	6	6.75	1	6.4510	95.57
			2	6.5468	96.99
			3	6.6953	99.19
			ค่าเฉลี่ย	6.5644	97.25
	8	9.02	1	8.8622	98.25
			2	8.9118	98.80
			3	8.7720	97.25
			ค่าเฉลี่ย	8.8486	98.10
	10	11.25	1	11.0824	98.51
			2	108878	96.78
			3	11.1758	99.34
			ค่าเฉลี่ย	11.0486	98.21

ตารางที่ ง.24 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.2795	95.10
			2	4.2692	94.87
			3	4.3088	95.75
			ค่าเฉลี่ย	4.2858	95.24
	6	6.75	1	6.5414	96.91
			2	6.4199	95.11
			3	6.6508	98.53
			ค่าเฉลี่ย	6.5374	96.85
	8	9.02	1	8.9388	99.10
			2	8.6394	95.78
			3	8.8432	98.04
			ค่าเฉลี่ย	8.8071	97.64
	10	11.25	1	10.9114	96.99
			2	11.0104	97.87
			3	11.0824	98.51
			ค่าเฉลี่ย	11.0014	97.79

ตารางที่ ง.25 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จับความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.0586	90.19
			2	4.2674	94.83
			3	4.3034	95.63
			ค่าเฉลี่ย	4.2098	93.55
	6	6.75	1	6.3457	94.01
			2	6.4672	95.81
			3	6.2748	92.96
			ค่าเฉลี่ย	6.3626	94.26
	8	9.02	1	8.6682	96.10
			2	8.5843	95.17
			3	8.7710	97.24
			ค่าเฉลี่ย	8.6745	96.17
	10	11.25	1	10.8551	96.49
			2	10.8315	96.28
			3	10.8518	96.46
			ค่าเฉลี่ย	10.8461	96.41

ตารางที่ ง.26 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่ง โคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.1886	93.08
			2	4.2728	94.95
			3	4.1679	92.62
			ค่าเฉลี่ย	4.2098	93.55
	6	6.75	1	6.4672	95.81
			2	6.4199	95.11
			3	6.2006	91.86
			ค่าเฉลี่ย	6.3626	94.26
	8	9.02	1	8.6565	95.97
			2	8.7476	96.98
			3	8.6195	95.56
			ค่าเฉลี่ย	8.6745	96.17
	10	11.25	1	10.8191	96.17
			2	10.8551	96.49
			3	10.8641	96.57
			ค่าเฉลี่ย	10.8461	96.41

ตารางที่ ง.27 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	จีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9415	99.87
			2	43.7175	97.15
			3	44.2485	98.33
			ค่าเฉลี่ย	44.3025	98.45
	60	67.5	1	66.4200	98.40
			2	67.4123	99.87
			3	65.5898	97.17
			ค่าเฉลี่ย	66.4740	98.48
	80	90	1	89.2530	99.17
			2	89.8290	99.81
			3	86.9490	96.61
			ค่าเฉลี่ย	88.6770	98.53
	100	112.5	1	111.6563	99.25
			2	110.4525	98.18
			3	112.0838	99.63
			ค่าเฉลี่ย	111.3975	99.02

ตารางที่ ง.28 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	43.6500	97.00
			2	43.5915	96.87
			3	44.8425	99.65
			ค่าเฉลี่ย	44.0280	97.84
	60	67.5	1	65.6033	97.19
			2	67.4190	99.88
			3	65.7720	97.44
			ค่าเฉลี่ย	66.2648	98.17
	80	90	1	87.3990	97.11
			2	89.1990	99.11
			3	88.5690	98.41
			ค่าเฉลี่ย	88.3890	98.21
	100	112.5	1	110.4188	98.15
			2	111.4988	99.11
			3	111.9038	99.47
			ค่าเฉลี่ย	111.2738	98.91

ตารางที่ ง.29 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน -8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่ง โคโรนา -30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	42.7995	95.11
			2	42.5540	94.12
			3	44.5950	99.10
			ค่าเฉลี่ย	43.2495	96.11
	60	67.5	1	65.2793	96.71
			2	64.1993	95.11
			3	66.1365	97.98
			ค่าเฉลี่ย	65.2050	96.60
	80	90	1	89.1090	99.01
			2	89.1900	99.10
			3	86.3550	95.95
			ค่าเฉลี่ย	88.2180	98.02
	100	112.5	1	110.3625	98.10
			2	110.0363	97.81
			3	111.2625	98.90
			ค่าเฉลี่ย	110.5538	98.27

ตารางที่ ง.30 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้า แรงดัน +8 kV ร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้า
จ่ายแรงดันที่แท่งโคโรนา +30 kV อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.40 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 75.5 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่น ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	42.8715	95.27
			2	43.6995	97.11
			3	43.3935	96.43
			ค่าเฉลี่ย	43.3215	96.27
	60	67.5	1	65.4750	97.00
			2	67.4123	99.87
			3	63.6390	94.28
			ค่าเฉลี่ย	65.5088	97.05
	80	90	1	87.3900	97.10
			2	88.9830	98.87
			3	88.7670	98.63
			ค่าเฉลี่ย	88.3800	98.20
	100	112.5	1	110.9700	98.64
			2	110.1488	97.91
			3	111.3188	98.95
			ค่าเฉลี่ย	110.8125	98.50

ตารางที่ ง.31 การทดสอบชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบจนวนชั้นเดียว ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m³ แรงดัน +4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.35 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.8 %			
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่น (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นที่คักได้ จากกระดาษกรอง(g)		ประสิทธิภาพ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	
5.5	20	16.5	1	0.0211	0.0011	94.79
			2	0.0200	0.0008	96.00
			3	0.0231	0.0008	96.54
			เฉลี่ย	0.0214	0.0009	95.77
	40	33	1	0.0350	0.0017	95.14
			2	0.0221	0.0007	96.83
			3	0.0259	0.0015	94.21
			เฉลี่ย	0.0277	0.0013	95.39
	60	49.5	1	0.2201	0.0091	95.87
			2	0.2310	0.0125	94.59
			3	0.2034	0.0119	94.15
			เฉลี่ย	0.2182	0.0112	94.87

ตารางที่ ง.32 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m³ แรงดัน +4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.35 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.8 %			
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่น (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นที่ดักได้ จากกระดาษกรอง(g)		ประสิทธิภาพ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	
5.5	20	16.5	1	0.0311	0.0009	97.11
			2	0.0251	0.0007	97.21
			3	0.0230	0.0002	99.13
			เฉลี่ย	0.0264	0.0006	97.82
	40	33	1	0.1414	0.0018	98.73
			2	0.2505	0.0072	97.13
			3	0.2613	0.0102	96.10
			เฉลี่ย	0.2177	0.0064	97.32
	60	49.5	1	0.4990	0.0193	96.13
			2	0.5871	0.0106	98.16
			3	0.6010	0.0174	97.10
			เฉลี่ย	0.5624	0.0158	97.14

ตารางที่ ง.33 การทดสอบชุดตัดฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m³ แรงดัน-2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.35 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.8 %			
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่น (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นที่ตัดได้ จากกระดาษกรอง(g)		ประสิทธิภาพ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	
5.5	20	16.5	1	0.0348	0.0002	99.43
			2	0.0411	0.0004	99.03
			3	0.0333	0.0001	99.70
			เฉลี่ย	0.0364	0.0002	99.38
	40	33	1	0.1530	0.0007	99.54
			2	0.1448	0.0012	99.19
			3	0.2311	0.0025	98.92
			เฉลี่ย	0.1774	0.0015	99.20
	60	49.5	1	0.3270	0.0004	99.88
			2	0.2929	0.0015	99.49
			3	0.3340	0.0067	97.99
			เฉลี่ย	0.3179	0.0029	99.12

ตารางที่ ง.34 การทดสอบชุดตัดฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m³ แรงดัน-4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.35 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.8 %			
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่น (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นที่ตัดได้ จากกระดาษกรอง(g)		ประสิทธิภาพ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	
5.5	20	16.5	1	0.1178	0.0017	98.56
			2	0.1332	0.0038	97.15
			3	0.2340	0.0030	98.72
			เฉลี่ย	0.1617	0.0028	98.14
	40	33	1	0.2780	0.0059	97.88
			2	0.3541	0.0081	97.71
			3	0.2519	0.0059	97.66
			เฉลี่ย	0.2947	0.0066	97.75
	60	49.5	1	0.4941	0.0133	97.31
			2	0.5250	0.0099	98.11
			3	0.4781	0.0173	96.38
			เฉลี่ย	0.4991	0.0135	97.27

ตารางที่ ง.35 การทดสอบชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซามิเตอร์ 2 ชั้น ที่อัตราการความหนาแน่นฝุ่น 20-60 g/m³ แรงดัน-6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 28.35 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 77.8 %			
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่น (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นที่ดักได้ จากกระดาษกรอง(g)		ประสิทธิภาพ (%)
				ด้านหน้า	ด้านหลัง	
5.5	20	16.5	1	0.1408	0.0013	99.08
			2	0.2378	0.0003	99.87
			3	0.2133	0.0006	99.72
			เฉลี่ย	0.1973	0.0007	99.56
	40	33	1	0.3331	0.0018	99.45
			2	0.2879	0.0017	99.41
			3	0.2521	0.0008	99.68
			เฉลี่ย	0.2910	0.0014	99.51
	60	49.5	1	0.4182	0.0022	99.47
			2	0.4830	0.0043	99.11
			3	0.2811	0.0004	99.86
			เฉลี่ย	0.0937	0.0023	99.48

ตารางที่ ง.36 การทดสอบไซโคลนคักฝุ่นร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	5.1	1	5.0908	99.82
			2	5.0873	99.75
			3	5.0883	99.77
			ค่าเฉลี่ย	5.0888	99.78
	6	7.65	1	7.6332	99.78
			2	7.6324	99.77
			3	7.6385	99.85
			ค่าเฉลี่ย	7.6347	99.8
	8	10.2	1	10.1847	99.85
			2	10.1806	99.81
			3	10.1796	99.8
			ค่าเฉลี่ย	10.1816	99.82
	10	12.75	1	12.7360	99.89
			2	12.7245	99.8
			3	12.7283	99.83
			ค่าเฉลี่ย	12.7296	99.84

ตารางที่ ง.37 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	5.1	1	5.0908	99.82
			2	5.0903	99.81
			3	5.0883	99.77
			ค่าเฉลี่ย	5.0898	99.8
	6	7.65	1	7.6369	99.83
			2	7.6385	99.85
			3	7.6309	99.75
			ค่าเฉลี่ย	7.6355	99.81
	8	10.2	1	10.1847	99.85
			2	10.1857	99.86
			3	10.1776	99.78
			ค่าเฉลี่ย	10.1826	99.83
	10	12.75	1	12.7334	99.87
			2	12.7308	99.85
			3	12.7283	99.83
			ค่าเฉลี่ย	12.73088	99.85

ตารางที่ ง.38 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	5.1	1	5.0924	99.85
			2	5.0918	99.84
			3	5.0883	99.77
			ค่าเฉลี่ย	5.0908	99.82
	6	7.65	1	7.6446	99.93
			2	7.6355	99.81
			3	7.6309	99.75
			ค่าเฉลี่ย	7.6370	99.83
	8	10.2	1	10.1888	99.89
			2	10.1857	99.86
			3	10.1796	99.8
			ค่าเฉลี่ย	10.1847	99.85
	10	12.75	1	12.7347	99.88
			2	12.7347	99.88
			3	12.7309	99.85
			ค่าเฉลี่ย	12.7334	99.87

ตารางที่ ง.39 การทดสอบไซโคลนดักฝุ่นร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.7705	99.49
			2	44.7300	99.40
			3	44.7165	99.37
			ค่าเฉลี่ย	44.7390	99.42
	60	67.5	1	67.1287	99.45
			2	67.1287	99.45
			3	67.0882	99.39
			ค่าเฉลี่ย	67.1153	99.43
	80	90	1	89.5050	99.45
			2	89.5230	99.47
			3	89.4600	99.40
			ค่าเฉลี่ย	89.4960	99.44
	100	112.5	1	111.9375	99.50
			2	111.8925	99.46
			3	111.8475	99.42
			ค่าเฉลี่ย	111.8925	99.46

ตารางที่ ง.40 การทดสอบไซโคลนคักฝุ่นร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.7930	99.54
			2	44.7300	99.40
			3	44.7615	99.47
			ค่าเฉลี่ย	44.7615	99.47
	60	67.5	1	67.1625	99.50
			2	67.1287	99.45
			3	67.1557	99.49
			ค่าเฉลี่ย	67.1490	99.48
	80	90	1	89.6130	99.57
			2	89.5230	99.47
			3	89.5140	99.46
			ค่าเฉลี่ย	89.5500	99.50
	100	112.5	1	111.9825	99.54
			2	111.8925	99.46
			3	112.0050	99.56
			ค่าเฉลี่ย	111.9600	99.52

ตารางที่ ง.41 การทดสอบไซโคลนคักฝุ่นร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโตรโครนาบ
 ฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.7930	99.54
			2	44.7840	99.52
			3	44.7615	99.47
			ค่าเฉลี่ย	44.7795	99.51
	60	67.5	1	67.2030	99.56
			2	67.1895	99.54
			3	67.1557	99.49
			ค่าเฉลี่ย	67.1827	99.53
	80	90	1	89.7120	99.68
			2	89.5230	99.47
			3	89.6040	99.56
			ค่าเฉลี่ย	89.6130	99.57
	100	112.5	1	112.0500	99.60
			2	112.0950	99.64
			3	112.1063	99.65
			ค่าเฉลี่ย	112.0838	99.63

ตารางที่ ง.42 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระบายจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4941	99.87
			2	4.4964	99.92
			3	4.4973	99.94
			ค่าเฉลี่ย	4.4959	99.91
	6	6.75	1	6.7425	99.89
			2	6.7466	99.95
			3	6.7446	99.92
			ค่าเฉลี่ย	6.7446	99.92
	8	9.02	1	8.9937	99.93
			2	8.9928	99.92
			3	8.9946	99.94
			ค่าเฉลี่ย	8.9937	99.93
	10	11.25	1	11.2466	99.97
			2	11.2443	99.95
			3	11.2387	99.90
			ค่าเฉลี่ย	11.2432	99.94

ตารางที่ ง.43 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4955	99.90
			2	4.4973	99.94
			3	4.4950	99.89
			ค่าเฉลี่ย	4.4959	99.91
	6	6.75	1	6.7439	99.91
			2	6.7459	99.94
			3	6.7439	99.91
			ค่าเฉลี่ย	6.7446	99.92
	8	9.02	1	9.0154	99.95
			2	9.0136	99.93
			3	9.0145	99.94
			ค่าเฉลี่ย	9.0145	99.94
	10	11.25	1	11.2466	99.97
			2	11.2443	99.95
			3	11.2455	99.96
			ค่าเฉลี่ย	11.2455	99.96

ตารางที่ ง.44 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4968	99.93
			2	4.4973	99.94
			3	4.4964	99.92
			ค่าเฉลี่ย	4.4968	99.93
	6	6.75	1	6.7486	99.98
			2	6.7432	99.90
			3	6.7439	99.91
			ค่าเฉลี่ย	6.7452	99.93
	8	9.02	1	9.0145	99.94
			2	9.0172	99.97
			3	9.0145	99.94
			ค่าเฉลี่ย	9.0155	99.95
	10	11.25	1	11.2477	99.98
			2	11.2466	99.97
			3	11.2455	99.96
			ค่าเฉลี่ย	11.2466	99.97

ตารางที่ ง.45 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9190	99.82
			2	44.8965	99.77
			3	44.9280	99.84
			ค่าเฉลี่ย	44.9145	99.81
	60	67.5	1	67.3515	99.78
			2	67.3987	99.85
			3	67.3852	99.83
			ค่าเฉลี่ย	67.3785	99.82
	80	90	1	89.8650	99.85
			2	89.8200	99.80
			3	89.8560	99.84
			ค่าเฉลี่ย	89.8470	99.83
	100	112.5	1	112.2863	99.81
			2	112.3425	99.86
			3	112.3313	99.85
			ค่าเฉลี่ย	112.3200	99.84

ตารางที่ ง.46 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระบายจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.8920	99.76
			2	44.9370	99.86
			3	44.9280	99.84
			ค่าเฉลี่ย	44.9190	99.82
	60	67.5	1	67.3920	99.84
			2	67.3987	99.85
			3	67.3650	99.8
			ค่าเฉลี่ย	67.3853	99.83
	80	90	1	89.8830	99.87
			2	89.8560	99.84
			3	89.8560	99.84
			ค่าเฉลี่ย	89.8650	99.85
	100	112.5	1	112.3650	99.88
			2	112.3650	99.88
			3	112.3313	99.85
			ค่าเฉลี่ย	112.3538	99.87

ตารางที่ ง.47 การทดสอบไซโคลนสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์
 ระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9235	99.83
			2	44.9190	99.82
			3	44.9280	99.84
			ค่าเฉลี่ย	44.9235	99.83
	60	67.5	1	67.3717	99.81
			2	67.3987	99.85
			3	67.4055	99.86
			ค่าเฉลี่ย	67.3920	99.84
	80	90	1	89.9010	99.89
			2	89.8380	99.82
			3	89.8560	99.84
			ค่าเฉลี่ย	89.8650	99.85
	100	112.5	1	112.3763	99.89
			2	112.3650	99.88
			3	112.3875	99.90
			ค่าเฉลี่ย	112.3763	99.89

ตารางที่ ง.48 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดคัก
ฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น
4-10 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4955	99.90
			2	4.4946	99.88
			3	4.4964	99.92
			ค่าเฉลี่ย	4.4955	99.90
	6	6.75	1	6.7419	99.88
			2	6.7459	99.94
			3	6.7439	99.91
			ค่าเฉลี่ย	6.7439	99.91
	8	9.02	1	9.0145	99.94
			2	9.0118	99.91
			3	9.0145	99.94
			ค่าเฉลี่ย	9.0136	99.93
	10	11.25	1	11.2390	99.91
			2	11.2470	99.98
			3	11.2455	99.96
			ค่าเฉลี่ย	11.2443	99.95

ตารางที่ ง.49 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดดักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กโทรระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 4-10 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่นของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ทดสอบ (g)	ครั้งที่ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวมที่เก็บได้ (g)	จีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4964	99.92
			2	4.4977	99.95
			3	4.4964	99.92
			ค่าเฉลี่ย	4.4968	99.93
	6	6.75	1	6.7459	99.94
			2	6.7466	99.95
			3	6.7473	99.96
			ค่าเฉลี่ย	6.7466	99.95
	8	9.02	1	9.0190	99.99
			2	9.0154	99.95
			3	9.0145	99.94
			ค่าเฉลี่ย	9.0163	99.96
10	11.25	1	11.2477	99.98	
		2	11.2466	99.97	
		3	11.2455	99.96	
		ค่าเฉลี่ย	11.2466	99.97	

ตารางที่ ง.50 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดดัก
ฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โรตารีนานจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น
4-10 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	4	4.5	1	4.4973	99.94
			2	4.4977	99.95
			3	4.4982	99.96
			ค่าเฉลี่ย	4.4977	99.95
	6	6.75	1	6.7452	99.93
			2	6.7486	99.98
			3	6.7479	99.97
			ค่าเฉลี่ย	6.7473	99.96
	8	9.02	1	9.0181	99.98
			2	9.0154	99.95
			3	9.0181	99.98
			ค่าเฉลี่ย	9.0172	99.97
	10	11.25	1	11.2488	99.99
			2	11.2466	99.97
			3	11.2477	99.98
			ค่าเฉลี่ย	11.2477	99.98

ตารางที่ ง.51 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดคักฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรกระนาบฉนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น 40-100 g/m³ แรงดัน -2 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9460	99.88
			2	44.9235	99.83
			3	44.9145	99.81
			ค่าเฉลี่ย	44.9280	99.84
	60	67.5	1	67.4257	99.89
			2	67.3785	99.82
			3	67.4122	99.87
			ค่าเฉลี่ย	67.4055	99.86
	80	90	1	89.8740	99.86
			2	89.8920	99.88
			3	89.8830	99.87
			ค่าเฉลี่ย	89.8830	99.87
	100	112.5	1	112.3875	99.90
			2	112.3763	99.89
			3	112.3313	99.85
			ค่าเฉลี่ย	112.3650	99.88

ตารางที่ ง.52 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดคัก
ฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอบจนวน 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น
40-100 g/m³ แรงดัน -4 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9370	99.86
			2	44.9505	99.89
			3	44.9370	99.86
			ค่าเฉลี่ย	44.9415	99.87
	60	67.5	1	67.4190	99.88
			2	67.4257	99.89
			3	67.4122	99.87
			ค่าเฉลี่ย	67.4190	99.88
	80	90	1	89.9280	99.92
			2	89.9190	99.91
			3	89.8830	99.87
			ค่าเฉลี่ย	89.9100	99.90
	100	112.5	1	112.4100	99.92
			2	112.3763	99.89
			3	112.4438	99.95
			ค่าเฉลี่ย	112.4100	99.92

ตารางที่ ง.53 การทดสอบชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในอนุภาคฝุ่นร่วมกับไซโคลนสนามไฟฟ้าและชุดดัก
ฝุ่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวเวอร์ 2 ชั้น ที่อัตราความหนาแน่นฝุ่น
40-100 g/m³ แรงดัน -6 kV

สภาวะแวดล้อม			อุณหภูมิ 29.23 C ^o ความชื้นสัมพัทธ์ 78 %		
ความเร็วลม (m/s)	ความหนาแน่น ของฝุ่น (g/m ³)	น้ำหนักฝุ่นที่ ทดสอบ (g)	ครั้งที่ ทดสอบ	น้ำหนักฝุ่นรวม ที่เก็บได้ (g)	ขีดความสามารถ (%)
15	40	45	1	44.9595	99.91
			2	44.9415	99.87
			3	44.9370	99.86
			ค่าเฉลี่ย	44.9460	99.88
	60	67.5	1	67.4257	99.89
			2	67.4392	99.91
			3	67.4122	99.87
			ค่าเฉลี่ย	67.4257	99.89
	80	90	1	89.9550	99.95
			2	89.9100	99.90
			3	89.8920	99.88
			ค่าเฉลี่ย	89.9190	99.91
	100	112.5	1	112.3650	99.88
			2	112.4550	99.96
			3	112.4438	99.95
			ค่าเฉลี่ย	112.4213	99.93

ภาคผนวก จ.

การการ Simulation ชุดอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มประจุไฟฟ้า

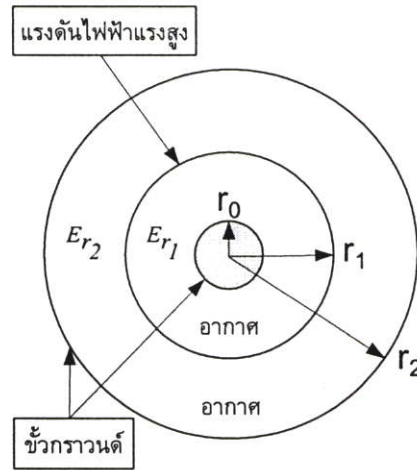
การ Simulation ชุดอิเล็กโทรดเพิ่มประจุไฟฟ้า

จากการออกแบบขนาดและรูปร่างของอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้นของชุดเพิ่มประจุไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.5.1 จะได้ขนาดอิเล็กโทรดดังนี้

$$r_0 = 0.6 \text{ cm}$$

$$r_1 = 1.8 \text{ cm}$$

$$r_2 = 5.4 \text{ cm}$$



รูปที่ จ.1 อิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกันสามชั้น

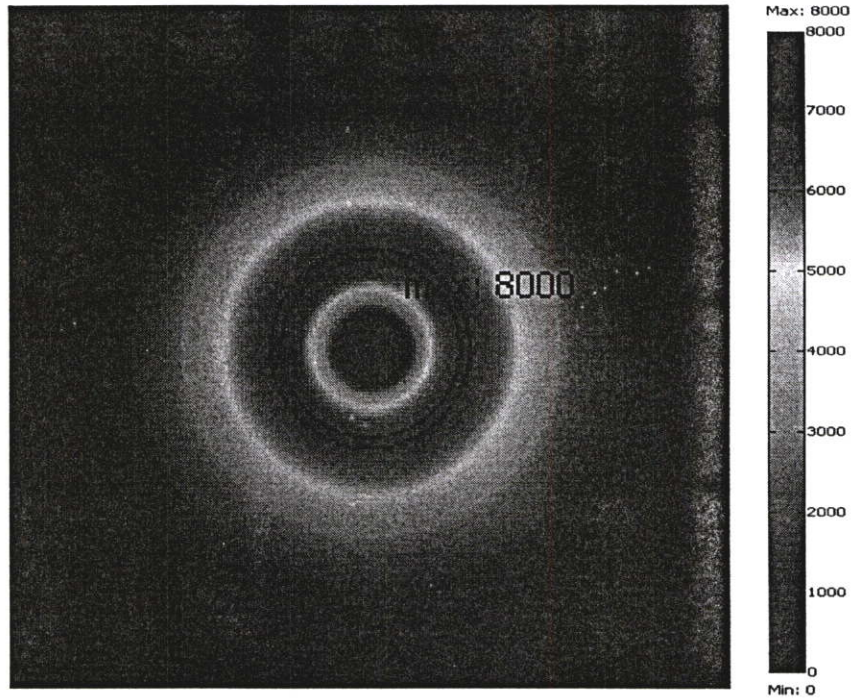
จากรูปจะเห็นว่ามีความหนาแน่นไฟฟ้าอยู่ 2 ชั้นคือ E_{r_1} (เป็นสนามไฟฟ้าบริเวณ r_0 และ r_1) และ E_{r_2} (เป็นสนามไฟฟ้าบริเวณ r_1 และ r_2) ซึ่งจากสมการ 2.10 สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_{r_2} = \frac{v}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{8}{0.9 \ln \frac{2.7}{0.9}} = 8.09 \text{ kV/cm}$$

$$E_{r_1} = \frac{v}{r_0 \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{8}{0.3 \ln \frac{0.9}{0.3}} = 24.27 \text{ kV/cm}$$

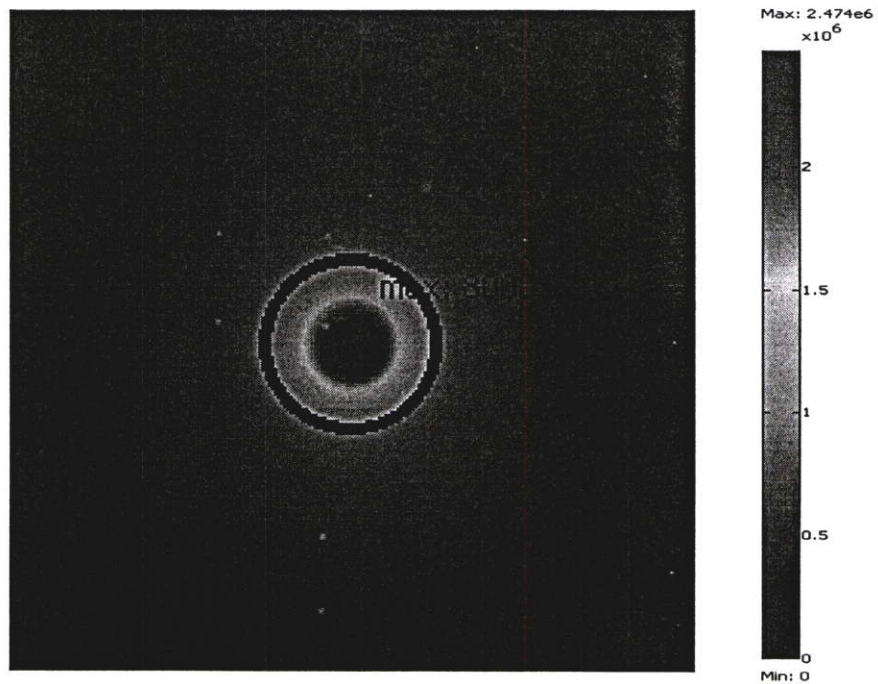
จึงทำการ Simulation การกระจายของศักดาไฟฟ้า การกระจายของสนามไฟฟ้า บริเวณที่เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้โปรแกรม FEM LAB

ในกรณีจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่อิเล็กโทรด r_1



รูปที่ จ.2 การกระจายของ Electric potential ในอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น

จากรูปที่ จ.2 การกระจายศักดาไฟฟ้าจะมีศักดาไฟฟ้าสูงสุดบริเวณผิวของอิเล็กโทรด r_1 และจะมีค่าลดลงที่ระยะห่างออกไปและจะเป็นศูนย์ที่อิเล็กโทรด r_0 และ r_2



รูปที่ จ.3 การกระจายของ Electric Field ในอิเล็กโทรดทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น

จากรูปที่ ๓.๓ การกระจายความเข้มสนามไฟฟ้า พบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดบริเวณผิวของอิเล็กโทรด r_0 เนื่องจากบริเวณอิเล็กโทรด r_0 มีความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าสูง

ภาคผนวก ฉ.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility

EMC'04 Sendai

June 1-4, 2004, Sendai International Center,
Sendai, JAPAN

SPONSORED BY



The Institute of Electronics, Information
and Communication Engineers,
Communications Society (IEICE-CS)



Cosponsored by

Intelligent Cosmos Academic Foundation, Sendai



In cooperation with

The Institute of Electrical Engineers of Japan,
Technical Committee on EMC (IEEJ TC-EMC)



IEEE EMC Society (IEEE EMC-S)
IEEE Sendai Section
IEEE EMC-S Japan and Sendai Chapters

Volume 1

A New Technique for Increasing Efficiency of Cyclonic Dust Trap Using Electrostatic Field

*P. Kotchapoom **W. Tasnangkura **P. Kerdonfag *S. Potivejkul *W. Khan-ngern

*ReCCIT, and Faculty of Engineering, KMITL, Bangkok, Thailand

E-mail: kkveerac@kmitl.ac.th

**Electrical Engineering Department, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand, E-mail: pongtep@mut.ac.th

Abstract - This paper presents a new technique for increasing efficiency of cyclonic dust trap using electrostatic method. The principle is to add electric charges to dust particle and enhance centrifugal force by the electric field. This paper shows trapping the dust test that dust have a size less than $75 \mu\text{m}$ at dust density level of $4\text{-}10 \text{ g/m}^3$ and $40\text{-}100 \text{ g/m}^3$. The results are analyzed and revealed that this technique improve efficiency of original cyclonic dust trap up to efficiency at 99%.

Key word : electrostatic field, dust particle, cyclone, dust trap

1. Introduction

Cyclone separators have been used for about 100 years, and are still one of the most widely used of all industrial gas-cleaning devices. The main reasons for the widespread use of cyclones are that they are inexpensive to purchase, have no moving parts, and can be constructed to withstand harsh operating conditions. Cyclonic devices by themselves are generally not adequate to meet stringent particulate emission standards, but they serve an important purpose. With low capital cost and their maintenance-free operation, it can make them ideal for use as precleaners for more expensive control devices such as fabric filters. Cyclonic devices can work together with electrostatic devices that produce electric field between corona electrode, which locate at the center core of cyclone, and cyclone wall [2][3]. Various parameters: density, charges, polarity and force direction are studied and showed that the efficiency of dust trap can be to improved the conventional dust treatment system.

2. Theory

2.1 Cyclonic Devices

Cyclones use the centrifugal force create by a spinning gas stream to separate particles from a gas [2]. Fig.1 shows a tangential inlet, reverse flow cyclone separator. The particulate laden gas enters tangentially near the top of the device. The cyclone's shape and the tangential entry force the gas flow into a downward spiral. Centrifugal force and inertia cause the particles to move outward, collide with the outer wall, and then slide downward to the bottom of the device. Near the bottom of the cyclone, the gas reverses its downward spiral and moves upward in a

smaller inner spiral. The "clean" gas exits from the top through a vortex-finder tube, and the particles exit from the bottom of the cyclone through a pipe sealed by a spring-loaded flapper valve or a rotary valve.

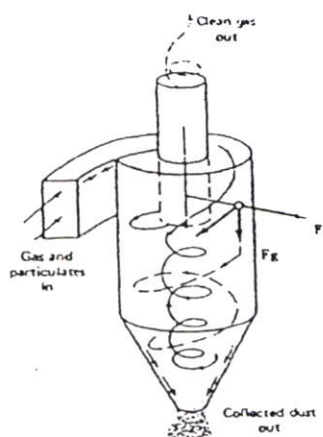


Fig. 1. Basic cyclone collector

The centrifugal force can be found from Eq.(1)

$$F_S = \frac{M_p V_p^2}{g_c R} \quad (1)$$

where

F_S = the centrifugal force (N)

M_p = particle's mass (kg)

V_p = tangential velocity of particle (m/s)

R = radius of spinning of particle (m)

g_c = $9.80 \text{ (m/s}^2\text{)}$

If the velocity of particles equal to tangential velocity of gas particle's mass can be shown in Eq.(2)

$$M_p = \beta D_p^3 \rho_p \quad (2)$$

where

ρ_p = gas density (kg/m^3)

D_p = particle diameter (m)

$$\beta = \frac{\pi}{6}$$

Gravity force treated to dust particle can be calculated from Eq.(3)

$$F_g = M_p g_c \quad (3)$$

2D2-4

2.2 Electrostatic Precipitator

An electrostatic precipitator (ESP) is a particle control device that uses electrical forces to move the particles out of the flowing gas stream and on to collector electrodes. Which electric field stress [1] can be calculated from Eq.(4).

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (4)$$

where

E_{max} = maximum electric field stress (V/cm)
 V = voltage supply (kV)
 r_1 = inner radius (cm)
 r_2 = outer radius (cm)

The electric field in the collecting zone produces a force on a particle proportional to the magnitude of the field and to the particle charge.

$$F_e = q \cdot E \quad (5)$$

where

E = electric field stress (V/m)
 q = charge on the particle (C)

Key equations to add the electric field based on Eq.(6)–(7) are introduced[1]. The saturation charge is given by.

$$q_s = 12 \left[\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right] a_p^2 \pi \epsilon_0 E_0 \quad (6)$$

Field charging also exhibits at characteristic time dependence, given by

$$q(t) = \frac{q_s}{(1 + \tau/t)} \quad (7)$$

The field charging time constant [3] is given by

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{(N_0 e \mu_i)} \quad (8)$$

where

q_s = saturation charge (charged at infinite time)(C)
 $q(t)$ = field charge (C)
 E_0 = electric field applied to the particle (V/m)
 a_p = particle diameter (m)
 e = electron charge (1.67×10^{-19} C)
 ϵ_0 = free space permittivity (8.854×10^{-12} F/m)
 N_0 = ion density (2×10^{15} ions/m³)
 μ_i = ion mobility (2.2×10^{-4} m²/V-s)

So the length of added electric charge can be found from Eq.(9).

$$S = v \times t \quad (9)$$

where

S = length of added electric charge (m)
 v = velocity of gas (m/s)
 t = charge saturation time (s)

3. Design

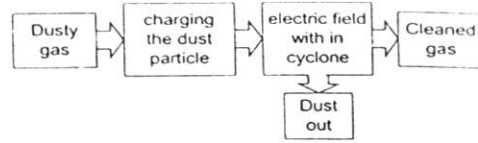


Fig. 2. Diagram of a increasing efficiency process.

Fig. 2 shows the diagram of proposed process. The key process is done by adding the charges by applying the E-field in the dust particles.

3.1 Set up electric field with in cyclone

Cyclonic device that use for this research is shown in Fig. 3.

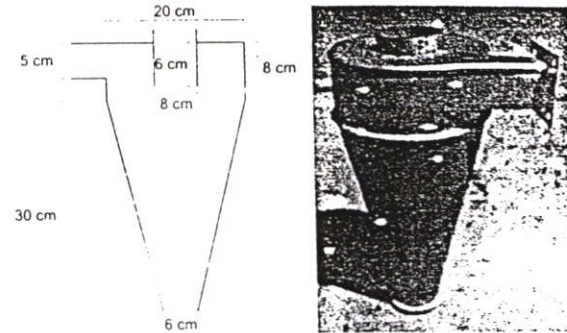


Fig. 3. Dimensions of a cyclone.

Setting up electrostatic in cyclone will be done by using DC high voltage magnitude 40 kV supply to corona electrode (ϕ 0.48 cm). From Eq.(4), to the maximum electric field stress with in cyclone equal to 107.25 kV/m and from Eq.(5) electric field force equal to 1.42×10^{-18} N.

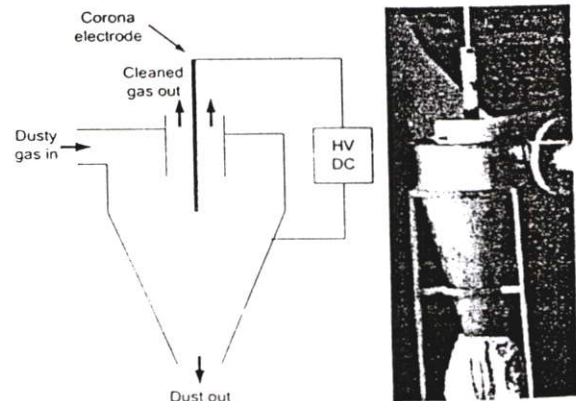


Fig. 4. Setting up electrostatic in cyclone.

3.2 A set of charging the dust particle

Electrodes are used in this research made of stainless pipe coaxial type. The dust particle charge can be up to 1.859×10^{-17} C by 8 kV. This result is calculated from Eq.(4). The length of electrode can be calculated based on Eqs.(7-9) as shown in Fig. 5.

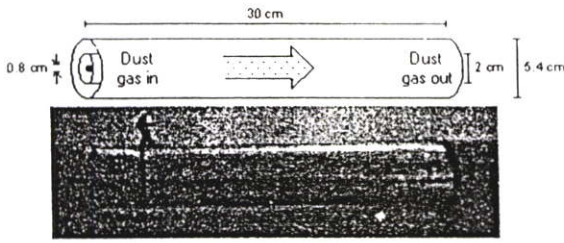


Fig. 5. Set of charging the dust particle.

4. The result of testing

The testing efficiency of cyclones is done by applying the wind at velocity of 15 m/s to them and test at low(4-10g/m³) level and high(40-100g/m³) level of dust density. The dust test associates with the dust have a size less than 75 μm. The efficiency of cyclones determined from dust weight that it can be captured. Three test methods are as follows:

Case 1: Testing by charging the dust particles at different dust density

The test will release mixed air with dust particles and flow pass through a set of electric charging that shown in Fig. 6 and the results are shown in Figs. 7 and 8. The result shows that positive charge can improve the dust separation efficiency about 2% over of that conventional cyclone at the dust high density (40-100g/m³) and the low dust density (4-10g/m³). The improvement is about 2-3% slightly is achieved. It can be described that positive charge can adding more and can affect the efficiency of the separation.

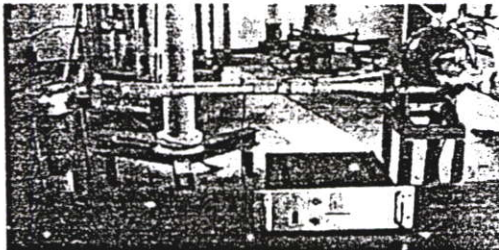


Fig. 6. Testing by charging the dust particles.

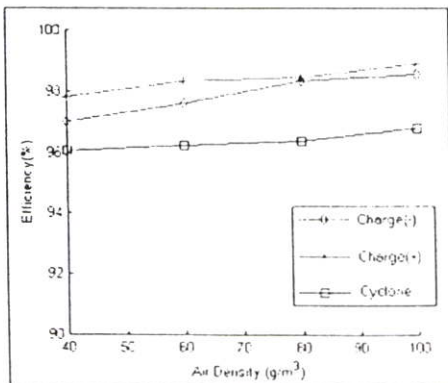


Fig. 7. Testing by charging the dust particles high density.

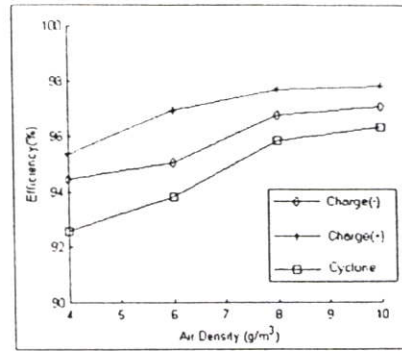


Fig. 8. Testing by charging the dust particles low density.

Case 2: Testing using electrostatic

The different between the case 2 and case 1 is setting up the positive electrostatic in case 2 as detailed in Fig. 4. The efficiency of dust separation are quite similar to those of case 1. Slightly improvement of the efficiency is achieved on case 2.

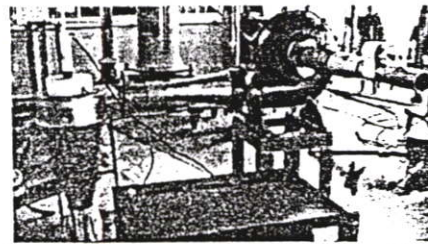


Fig. 9. Testing using electrostatic application.

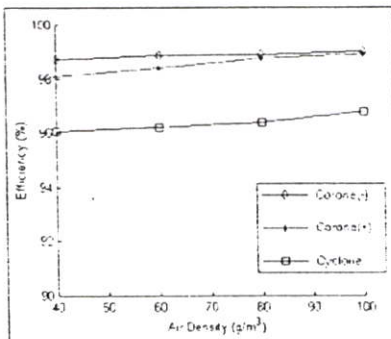


Fig. 10. Testing by using electrostatic with dust particles high density.

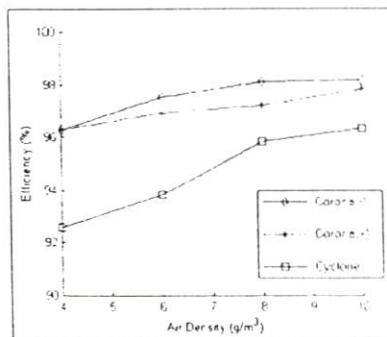


Fig. 11. Testing by using electrostatic with dust particles low density.

2D2-4

Case 3: Testing by charging the dust particle together with electrostatic cyclone

The test are the combination of case 1 and case 2 condition. For example the condition of best result of both case 1 and case 2 is tested: positive charging with positive electrostatic, negative charging with positive electrostatic, positive charging with negative electrostatic and negative charging with negative electrostatic.

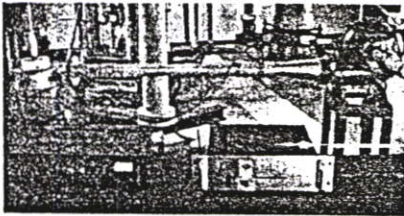


Fig. 12. Testing by charging the dust particle together with electrostatic cyclone.

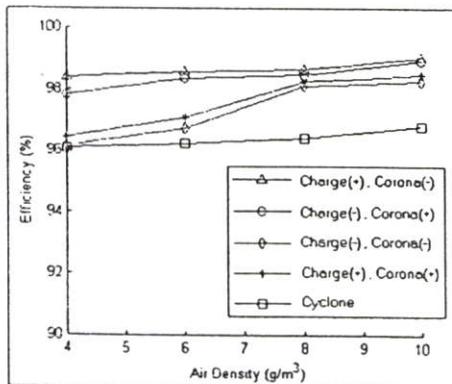


Fig. 13. Testing by charging the dust particle together with electrostatic cyclone and dust particles high density.

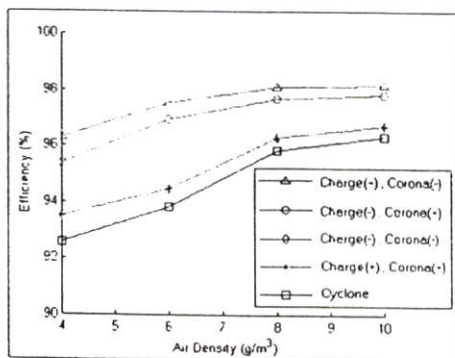


Fig. 14. Testing by charging the dust particle together with electrostatic cyclone and dust particles low density.

5. Conclusion

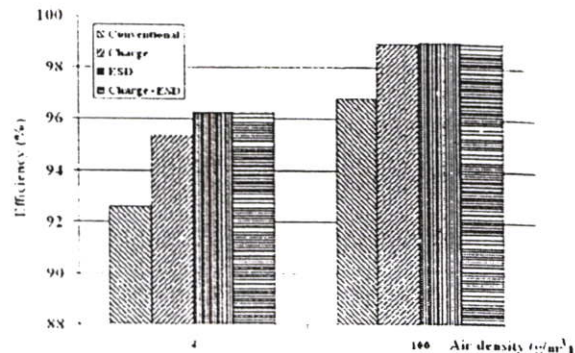


Fig. 15. The comparison of three cases comparing to conventional cyclone at low and high dust density.

Fig. 15 shows the comparison of the dust separation efficiencies at the three cases: first case by charging the dust particle, second case by applying the electrostatic and third case by applying both charging and electrostatic technique at air density 4 g/m^3 and 100 g/m^3 . The second case results the highest efficiency with the 3-4% over conventional cyclone. The third case (combination) shows no advantage comparing to the second case. More modification in the third case should be revised.

From the obtain results, the conclusion are as follows.

1. Charging positive charge to dust particle can increase efficiency of cyclonic devices more than charging negative charge
2. Electrostatic from negative DC high voltage has ability to improve efficiency of cyclonic device more than positive one.
3. At low density of dust will affect as raising electrostatic in cyclonic devices which can help to improve efficiency.
4. Charging the dust particles together with electrostatic cyclone can increase efficiency up to 99%.

The future work will be done and focused on the operating at low density of dust and corona pole design.

References

- [1] E.Kuff and M.Abddulah, "High-Voltage Engineering," Pergamon Press, Oxford, 1977.
- [2] Jaime Benitez, "Process engineering and design for air pollution control," PRT Prentice-Hall, Inc., pp. 333-413, 1993.
- [3] Crawford, M "Air Pollution Control Theory," McGraw-Hill, Inc., New York, 1976.

ประวัติผู้เขียน



นายพงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ เกิดเมื่อ วันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปี 2542 ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2545