



การพัฒนาอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ

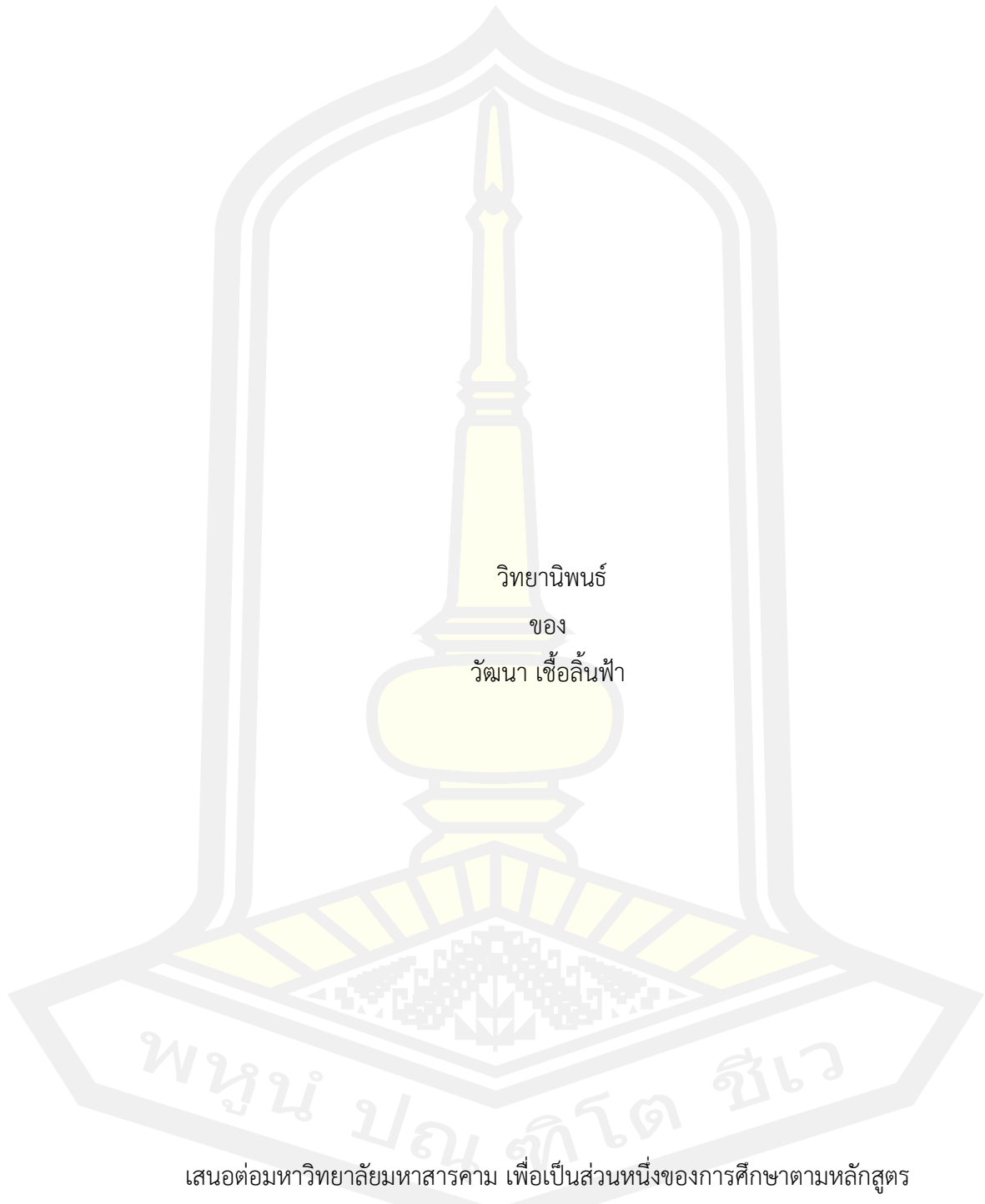
วิทยานิพนธ์
ของ
วัฒนา เชื้อลิ้นฟ้า

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ

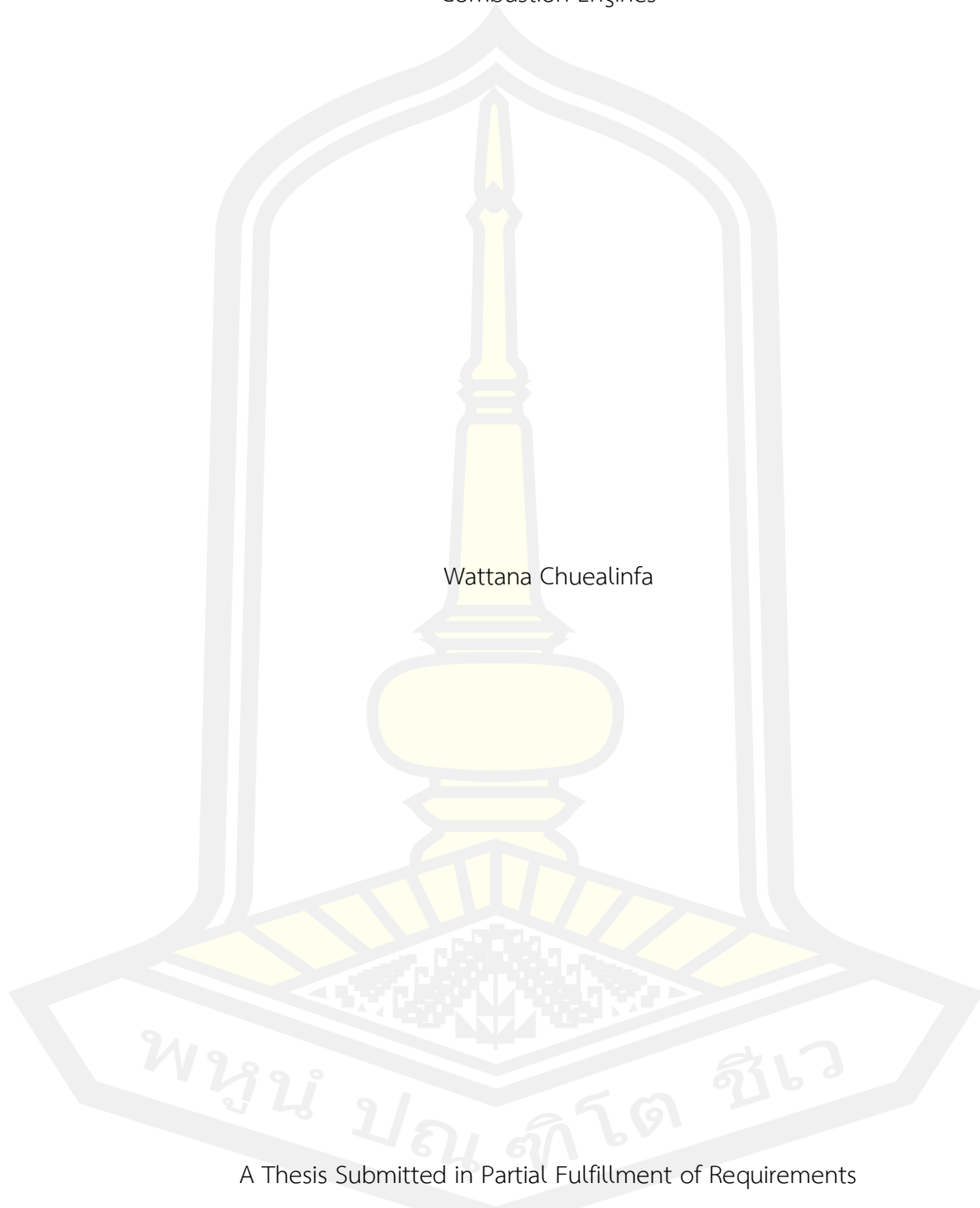


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Air Scrubber Device using Negative Electric Particles for Diesel
Combustion Engines



Wattana Chuealinfa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

November 2022

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายวัฒนา เชื้อลิ้นฟ้า แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

..... กรรมการ

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

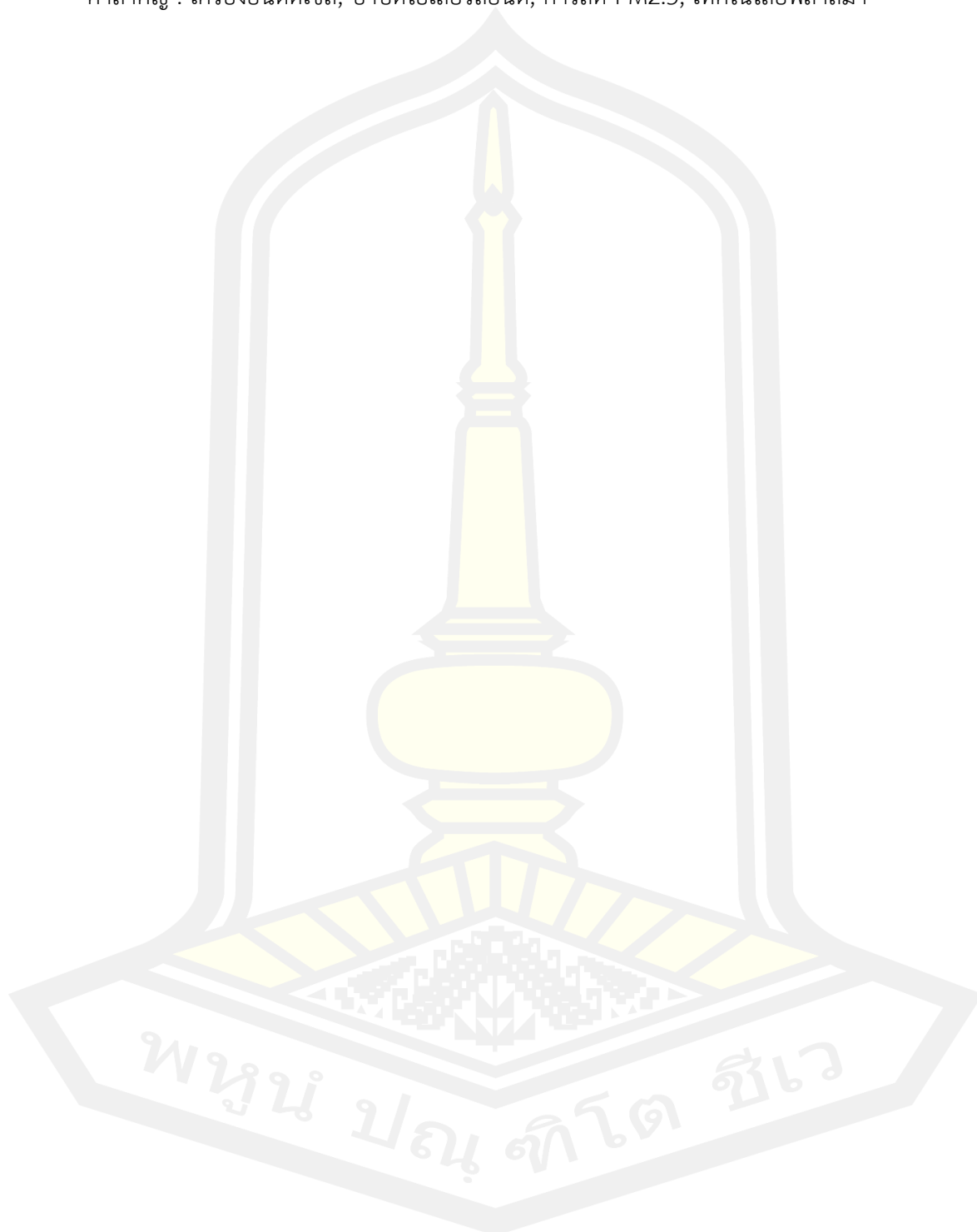
ชื่อเรื่อง	การพัฒนาอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ		
ผู้วิจัย	วัฒนา เชื้อลิ้นฟ้า		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

อนุภาค PM2.5 จากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต องค์กรด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมระดับโลกหลายองค์กรจึงได้มีการกำหนดมาตรการเพื่อช่วยลดการปล่อยอนุภาค PM2.5 สำหรับรถยนต์ดีเซลรุ่นใหม่ขึ้น เช่น มาตรฐาน Euro Emission Standards 5-6 ได้กำหนดให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ Diesel Particulate Filter (DPF) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อุปกรณ์ DPF เป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจเกิดการอุดตันและไม่สามารถกรองอนุภาค PM2.5 ได้ DPF จึงจำเป็นต้องมีระบบรีเจนเนอเรชันเพื่อสลายอนุภาค PM2.5 ให้เล็กลงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถทำได้ที่ความเร็วขับเคลื่อนต่ำหรืออาจต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนานในการสะสมความร้อนให้เพียงพอ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาด้วยการสร้างอนุภาคไอออนลบที่ระดับไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อช่วยลดปริมาณอนุภาค PM2.5 ซึ่งพบว่า ยังไม่มีการประยุกต์ใช้กับการลดปริมาณอนุภาค PM2.5 สำหรับไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลมาก่อน การศึกษาพบว่า ช่วงแรงดันไฟฟ้า 1-8 กิโลโวลต์ เป็นช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากเป็นช่วงที่สามารถสร้างอนุภาคไอออนลบได้ ในขณะที่ยังปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน ผลการทดลองพบว่า การใช้แรงดันไฟฟ้า 8 กิโลโวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สามารถลดปริมาณอนุภาค PM2.5 990 ไมโครกรัม ความหนาแน่น 7,927 ไมโครกรัมต่อตารางเมตร (ปริมาณเทียบเท่ากับใช้เชื้อเพลิง 0.10 ลิตร) สามารถลดปริมาณอนุภาค PM2.5 โดยใช้เวลาน้อยที่สุด โดยลดลงเหลือ 0 ไมโครกรัม ภายใน 9.00-10.00 นาที ในขณะที่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1-2 กิโลโวลต์ ใช้เวลา 169.00-171.00 นาที และ 114.00-117.00 นาที ตามลำดับ ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมสำหรับอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 30-50 องศาเซลเซียส ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 8 กิโลโวลต์ จะใช้ระยะเวลากำจัด PM2.5 8.00-9.00 นาที 7.00-8.00 นาที และ 7.00-8.00 นาที กล่าวคือ สมรรถนะการกำจัดอนุภาค PM2.5 เพิ่มขึ้น 11.11-12.50% 25.00-28.58% และ 25.00-28.58% ตามลำดับ

คำสำคัญ : เครื่องยนต์ดีเซล, บำบัดไอเสียรถยนต์, การลด PM2.5, เทคโนโลยีพลาสมา



TITLE	Development of Air Scrubber Device using Negative Electric Particles for Diesel Combustion Engines		
AUTHOR	Wattana Chuealinfa		
ADVISORS	Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

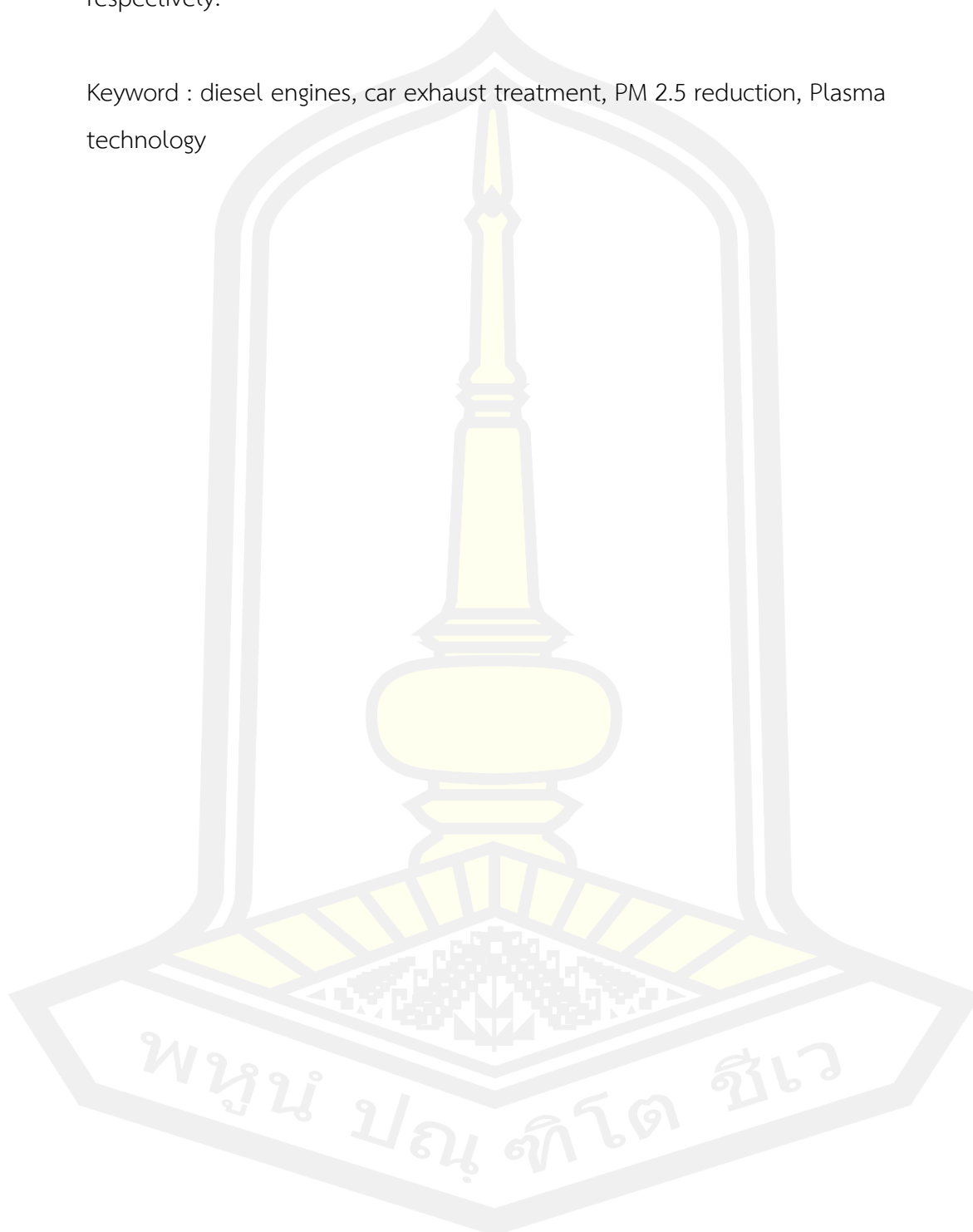
ABSTRACT

Particles PM 2.5 from diesel engines harm for humans and living things. Several world organizations for health and environment therefore launch policies in order to reduce PM2.5 emission for modern cars, such as the Euro Emission Standards 5-6 that strict on the installation of a Diesel Particulate Filter (DPF) for every car. However, using DPF for a long time would degrade capability of PM 2.5 mitigation and thus the regeneration system with temperature higher than 600 degrees Celsius has to be used, but could not be operated at low driving speed; otherwise, a longer driving time is required to achieve sufficient accumulated heat.

This research proposes the application of plasma technology with negative ion generation at high electric voltage level to mitigate PM 2.5 particles, which would never implement for the diesel engines before. The study found that the voltage range of 1-8 kV would be the most suitable range due to the ability of negative ion generation while retain safety for the user. The experimental test results showed that using 8 kV at the surrounding temperature of 25 degree Celsius could reduce particles PM 2.5 with 990 ug Density 7,927 ug/m³ (equivalent to 0.10 liter of the fuel) with the shortest time of 9.00-10.00 minute for 0 ug. In turn, using 1-2 kV spent time of 169.00 -171.00 and 114.00-117.00 minutes, respectively. In addition, researchers also conducted the tests for the case that the surroundings temperature was changed. It is found that when the temperature increased to 30-50 degree Celsius, the time to reduce PM 2.5 reduced to 8.00-9.00 minutes 7.00-8.00 minutes and 7.00-8.00 minutes; which was

11.11-12.50% 25.00-28.58% and 25.00-28.58% in PM 2.5 reduction capability, respectively.

Keyword : diesel engines, car exhaust treatment, PM 2.5 reduction, Plasma technology



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติเรก จันตะคุณ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.วรวัดน์ เสี่ยงมวิบูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เสริมผล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และที่สำคัญท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ์ โพธิ์ทอง ให้ความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งในการทำการวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งช่วยชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยรังสีอาทิพย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ สถานที่การศึกษา และอุปกรณ์ในการศึกษาทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ และที่ขาดมิได้ขอขอบพระคุณพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นครอบครัวให้กำลังใจในการศึกษาและสนับสนุนในทุกด้านด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยประจำคณะที่ชี้แนะแนวทางจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ได้

วัฒนา เชื้อลิ้นฟ้า

พหุบัณฑิต โศก ชีวะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ท
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	4
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	4
2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ.....	4
2.2 ผลกระทบของมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ.....	8
2.3 แนวทางในการป้องกันปัญหามลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กจากรถยนต์	10
2.4 แนวคิดการกำหนดกฎเกณฑ์มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในประเทศไทย	11
2.5 เทคนิคการควบคุมและปรับปรุงมลพิษจากเครื่องยนต์	12
2.6 ผลของสนามไฟฟ้าในการตกตะกอนของฝุ่นละออง	14
2.7 การสร้างไอออนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง	15

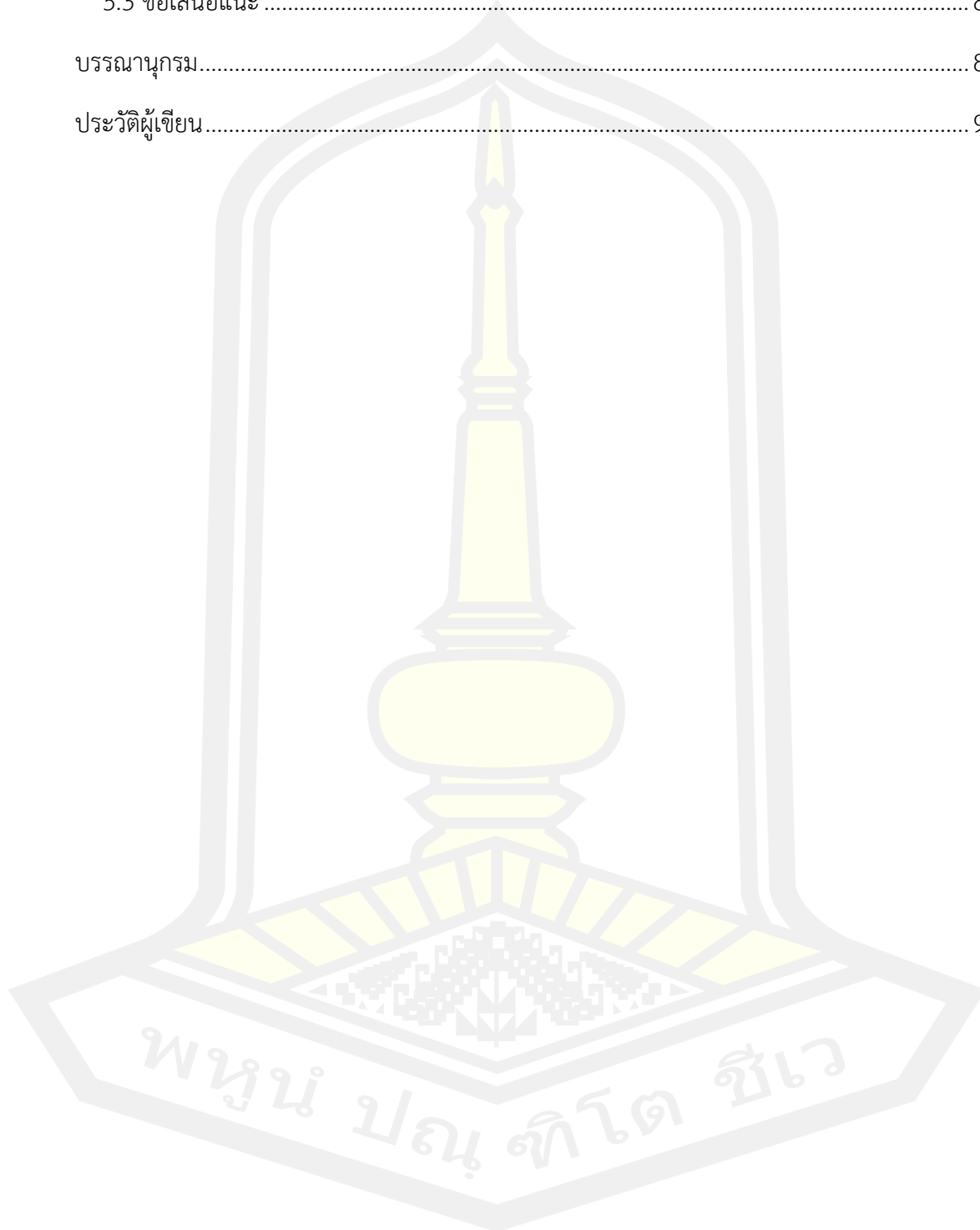
2.8 วงจรทวิแรงดัน.....	15
2.9 การเคลื่อนที่ของอนุภาค	17
2.10 แรงต้านทานของก๊าซต่ออนุภาค.....	18
2.11 ความแรงของสนามไฟฟ้า.....	19
2.12 การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต	19
2.13 ประสิทธิภาพการตกตะกอน	20
2.14 รูปแบบของขั้วไฟฟ้า	20
2.15 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้า (Electron Emission)	23
2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3	33
วิธีดำเนินงานวิจัย	33
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	33
3.2 การออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียต้นแบบ	33
3.3. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	35
3.4 ผลการทดลองอุปกรณ์ต้นแบบ	37
3.5 การเปรียบเทียบและสรุปผล	37
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	37
บทที่ 4	38
ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	38
4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดลองฝุ่นละออง PM2.5	38
4.2 ทดลองวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์บำบัดไอเสีย	39
4.3 ผลการทดลองการกำจัดฝุ่นละอองPM2.5 ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วงระดับแรงดัน 1-8 kV..	83
บทที่ 5	84
5.1 สรุปผล.....	84

5.2 อภิปรายผลการทดลอง 84

5.3 ข้อเสนอแนะ 84

บรรณานุกรม..... 86

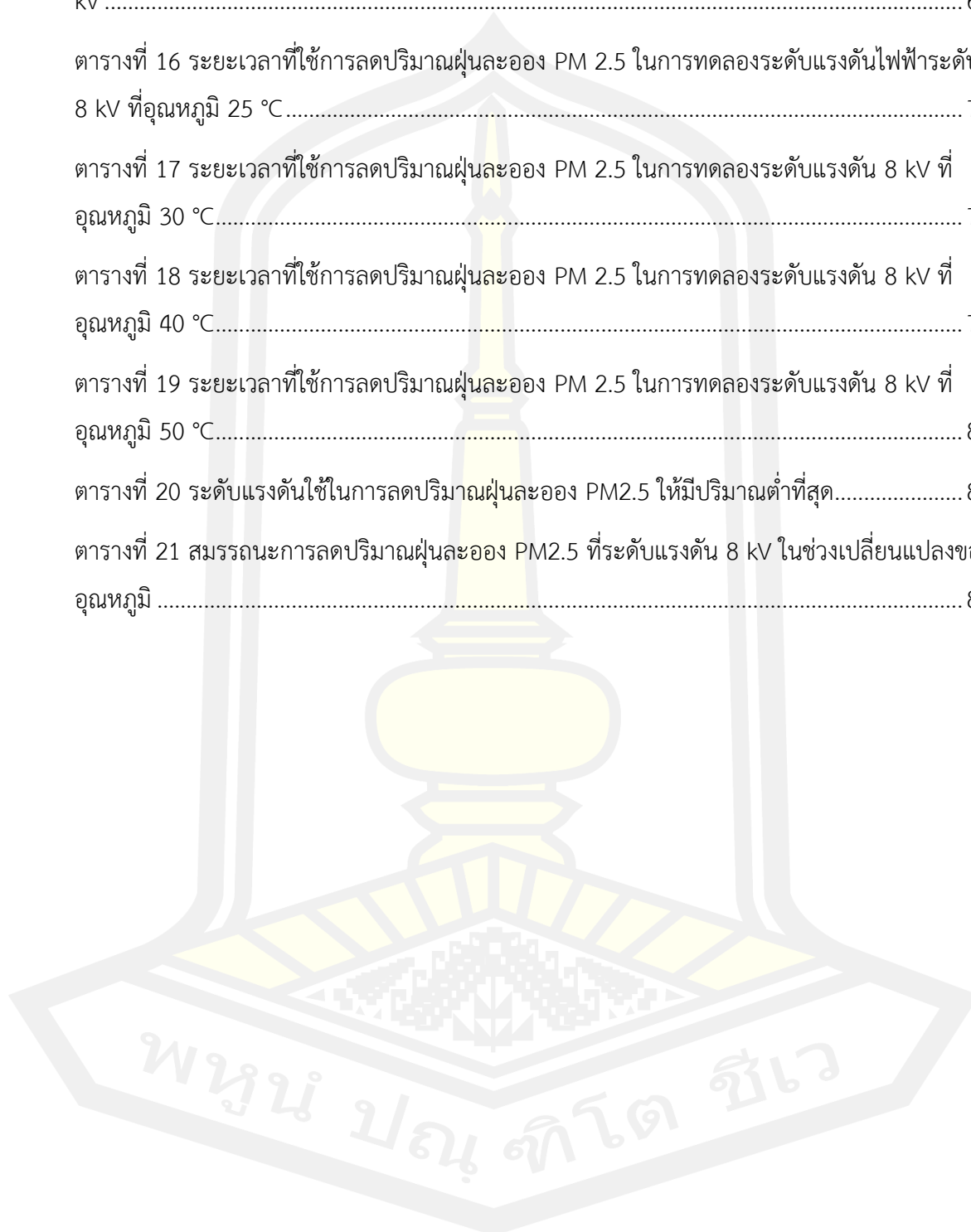
ประวัติผู้เขียน..... 96



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร	7
ตารางที่ 2 แหล่งที่มาที่ผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM10 และPM2.5	10
ตารางที่ 3 มาตรฐานเกณฑ์คุณภาพอากาศแนะนำโดยองค์การอนามัยโลก.....	12
ตารางที่ 4 รายละเอียดของรถยนต์ดีเซลที่ทดลองการปล่อย PM2.5 และความเข้มข้นของธาตุโลหะใน PM2.5 [79].....	31
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของการปล่อย PM2.5 ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (μg L/fuel). [75].....	31
ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของคาร์บอนใน PM2.5 ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [75]	31
ตารางที่ 7 ข้อมูลห้องทดลองในการเก็บฝุ่นละออง.....	34
ตารางที่ 8 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1 kV	42
ตารางที่ 9 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2 kV	46
ตารางที่ 10 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 3 kV	49
ตารางที่ 11 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 4 kV	53
ตารางที่ 12 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 5 kV	56
ตารางที่ 13 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6 kV	60
ตารางที่ 14 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 7 kV	63

ตารางที่ 15 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 8 kV	67
ตารางที่ 16 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	70
ตารางที่ 17 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C.....	74
ตารางที่ 18 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	78
ตารางที่ 19 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C.....	82
ตารางที่ 20 ระดับแรงดันที่ใช้ในการลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ให้มีปริมาณต่ำที่สุด.....	83
ตารางที่ 21 สมรรถนะการลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่ระดับแรงดัน 8 kV ในช่วงเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	83



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 การทำงานของระบบ Exhaust Gas Recirculation : EGR [52].....	13
ภาพประกอบที่ 2 วงจรทวิแรงดันสองเท่า [57].....	16
ภาพประกอบที่ 3 วงจรทวิแรงดันสามเท่า [57].....	16
ภาพประกอบที่ 4 แผนภาพบล็อก k เท่า [58].....	17
ภาพประกอบที่ 5 ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นระนาบ [66].....	21
ภาพประกอบที่ 6 ขั้วไฟฟ้าแบบช่องว่างทรงกลม [66].....	21
ภาพประกอบที่ 7 ตัวอย่าง Rod-Gap และ Needle-Gap [66]	22
ภาพประกอบที่ 8 ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกแกนร่วม [66].....	22
ภาพประกอบที่ 9 แรงดันเบรกดาวน์ของ Needle-Gap [66].....	23
ภาพประกอบที่ 10 หลักการทำงานเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ (a) การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (b) อิเล็กตรอนเกิดขึ้นอย่างทวีคูณ (d) การเคลื่อนที่ของอนุภาคไปเกาะติดที่ขั้วเก็บประจุ [68].....	25
ภาพประกอบที่ 11 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [68]	25
ภาพประกอบที่ 12 ไดอะแกรมและอุปกรณ์ทดลองประสิทธิภาพการตกตะกอน [69].....	26
ภาพประกอบที่ 13 ไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [70].....	27
ภาพประกอบที่ 14 ไดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [72].....	28
ภาพประกอบที่ 15 ไดอะแกรมชุดการทดลองในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [73]....	29
ภาพประกอบที่ 16 แผนผังระบบการทดลอง [75].....	31
ภาพประกอบที่ 17 ไดอะแกรมแสดงวงจรกระแสไฟฟ้า.....	33
ภาพประกอบที่ 18 ผลการจำลองทดลองวงจรทวิคูณแรงดัน โดยใช้โปรแกรม NI Multisim.....	34
ภาพประกอบที่ 19 มัลติมิเตอร์ [76]	35
ภาพประกอบที่ 20 HVP-40 โพรบดิจิตอลมัลติมิเตอร์แรงดันสูง [77].....	36

ภาพประกอบที่ 21 Air Beam วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ [78]	36
.....	
ภาพประกอบที่ 22 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดลองฝุ่นละออง PM2.5	38
ภาพประกอบที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 1	39
.....	
ภาพประกอบที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 2	40
.....	
ภาพประกอบที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 3	40
.....	
ภาพประกอบที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 4	41
.....	
ภาพประกอบที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 5	41
.....	
ภาพประกอบที่ 28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่น	
ละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5	42
.....	
ภาพประกอบที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 1	43
.....	
ภาพประกอบที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 2	43
.....	
ภาพประกอบที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 3	44
.....	
ภาพประกอบที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 4	44
.....	
ภาพประกอบที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5	
ครั้งที่ 5	45
.....	
ภาพประกอบที่ 34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่น	
ละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5	45

ภาพประกอบที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4.....	69
ภาพประกอบที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5.....	69
ภาพประกอบที่ 76 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25°C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5.....	70
ภาพประกอบที่ 77 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 30 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิดฮาโลเจน จำนวน 2 หลอด.....	71
ภาพประกอบที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1.....	71
ภาพประกอบที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2.....	72
ภาพประกอบที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3.....	72
ภาพประกอบที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4.....	73
ภาพประกอบที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5.....	73
ภาพประกอบที่ 83 กราฟเปรียบเทียบสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5	74
ภาพประกอบที่ 84 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 40 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิดฮาโลเจน จำนวน 4 หลอด.....	75
ภาพประกอบที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1.....	75
ภาพประกอบที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2.....	76

ภาพประกอบที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 3..... 76

ภาพประกอบที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 4..... 77

ภาพประกอบที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 5..... 77

ภาพประกอบที่ 90 กราฟเปรียบเทียบสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับ
 ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5 78

ภาพประกอบที่ 91 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 50 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิด
 ฮาโลเจน จำนวน 10 หลอด..... 79

ภาพประกอบที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 1..... 79

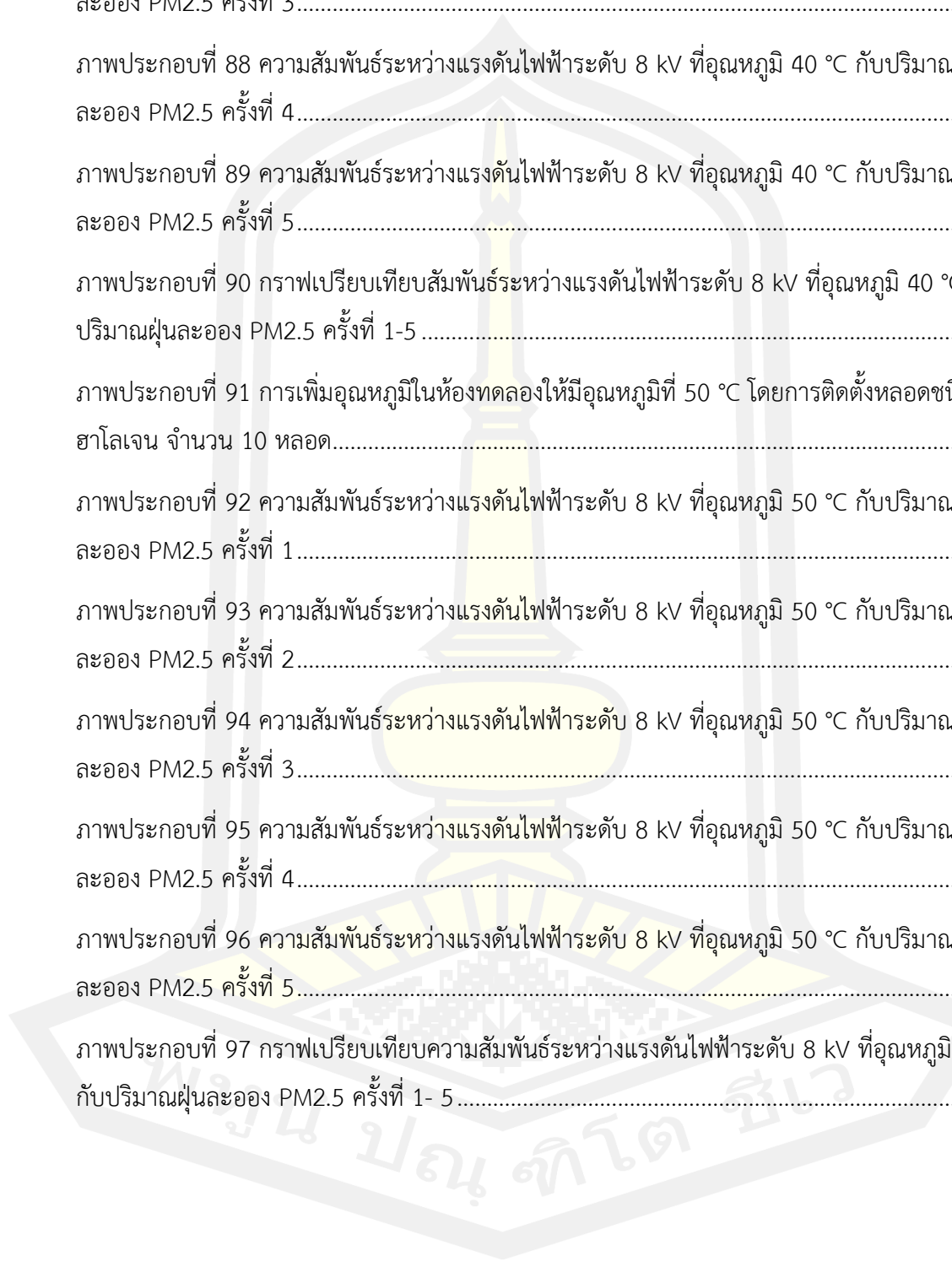
ภาพประกอบที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 2..... 80

ภาพประกอบที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 3..... 80

ภาพประกอบที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 4..... 81

ภาพประกอบที่ 96 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่น
 ละออง PM2.5 ครั้งที่ 5..... 81

ภาพประกอบที่ 97 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50°C
 กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5 82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ประเทศไทยมีรถยนต์ที่จดทะเบียน ณ วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2564 จำนวน 41,549,417 คัน โดยเป็นรถยนต์ตามกฎหมายว่ารถขนส่งทางบกจำนวน 1,324,507 คัน [1] รถยนต์ที่กล่าวมาข้างต้นต่างมีส่วนก่อมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศและก่อให้เกิดพลังงานได้ต้องมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ [2] การเผาไหม้เชื้อเพลิงในรถยนต์อาศัยปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ เชื้อเพลิง อากาศ และความชื้น [3] หากมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะก่อให้เกิดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งไม่ได้เป็นอันตรายต่อมนุษย์ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ทำให้เกิดก๊าซพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ [4] ปัญหาพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่ไม่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ทำให้เกิดการระเหยอากาศเสียจากระบบไอเสียของรถยนต์ซึ่งวิธีการระบายของเสียที่มีปริมาณของเสียมากที่สุดและองค์ประกอบที่ได้จากการเผาไหม้ประกอบไปด้วยเขม่าและฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน [5-6] เป็นอันตรายต่อสุขภาพ สามารถเข้าสู่ปอดซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคทางเดินหายใจ [7] และก๊าซไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ [8] มลพิษทางอากาศเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตจากโรคหัวใจและหลอดเลือดในปี 2558 ถึงการเสียชีวิตด้วยโรคหลอดเลือดสมอง 21% และการเสียชีวิตจากมะเร็งปอด 23% [9] นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อความผิดปกติของการพัฒนาการทางระบบประสาทในเด็ก [10] โรคเกี่ยวกับระบบประสาทผู้ใหญ่ [11] และเด็กที่อยู่ในครรภ์น้ำหนักต่ำกว่ามาตรฐาน [12]

ผลกระทบจากมลพิษทางอากาศจากรถยนต์ที่กล่าวมาข้างต้น [13] สามารถที่จะลดปริมาณก๊าซพิษลงได้ด้วยการควบคุมอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง ควบคุมกระบวนการเผาไหม้ และการกำจัดก๊าซพิษในก๊าซไอเสียโดยตรงให้ได้ผลดีเพื่อควบคุมปริมาณ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ในก๊าซไอเสีย [14] วิธีการทำความสะอาดก๊าซไอเสียหลังจากที่ก๊าซ ไอเสียออกจากเครื่องยนต์แล้วและก่อนที่จะปล่อยออกจากท่อไอเสียสู่บรรยากาศ [15] ใช้ระบบฉีดอากาศและระบบดูดอากาศ ระบบฉีดอากาศ ระบบนี้ใช้ป้อนอากาศซึ่งขับเคลื่อนด้วยสายพาน ป้อนจะทำหน้าที่ฉีดอากาศ เข้าไปในท่อร่วมไอเสีย เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้ ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เหลือค้างในก๊าซไอเสีย [16] ระบบดูดอากาศ เครื่องยนต์บางเครื่องที่มีอุปกรณ์กำจัดก๊าซพิษจะใช้ระบบดูดอากาศ ระบบจะป้อนอากาศเสริมเพื่อลดไฮโดรคาร์บอน และ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่รอบเดินเบาจะมีปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสีย

จำนวนน้อย ดังนั้นระบบดูดอากาศจึงป้อนอากาศเข้าสู่ท่อร่วมไอเสีย เพื่อให้มีออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนนอกไซด์ [17] ปัจจัยที่ทำให้ก๊าซพิษหลงเหลือจากการกำจัดก๊าซพิษออกจากเครื่องยนต์ ได้แก่ เครื่องยนต์สึกล่อนจะทำให้กำลังอัดต่ำ และเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์เนื่องจากปริมาณอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ไม่เพียงพอส่งผลให้ผนังกระบอกสูบเย็นเกินไปหรือการจุดระเบิดไม่ถูกจังหวะเพราะหัวเทียนไม่ดี ใส้กรองอากาศสกปรกเกิดการอุดตัน [18] ทำให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ระบบกำจัดก๊าซพิษของเครื่องยนต์ไม่เพียงพอต่อปริมาณก๊าซพิษที่ปล่อยออกมา [19-20]

ตัวกรองเขม่าไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซล Diesel Particulate Filter หรือ DPF เป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยดักเขม่าควันต่างๆ ที่หลงเหลือมาจากการเผาไหม้ในห้องจุดระเบิด โดยจะจับเอาไว้เฉพาะเขม่าขนาดเล็กมากๆ โดยตัวกรองแบบรังผึ้งที่ผลิตมาจาก Cordierite หรือ Silicon carbide หรือ Ceramics สะสมเอาไว้ในตัวของมัน จากนั้นระบบของสมองกลก็จะสั่งการให้กำจัดเขม่าด้วยการเผาไหม้ระดับ 600 °C ซึ่งความร้อนนี้ เป็นการดึงมาจากห้องจุดระเบิด แล้วส่งผ่านท่อไอเสียเพื่อผ่านตัวกรอง DPF อีกที ด้วยความร้อนระดับนี้ จะสามารถกำจัดเขม่าที่อยู่ในตัวกรองเขม่าไอเสียได้เกือบทั้งหมด กระบวนการเผาไหม้ นี้ ถูกเรียกกันว่า Regeneration ที่นี้ ปัญหาที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลประเภทนี้ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรถยนต์ประเภทอเนกประสงค์ หรือรถส่วนบุคคลดีเซล เป็นส่วนใหญ่(ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลในกระบะและ PPV นั้น จะยังเป็นเครื่องยนต์ระดับมาตรฐาน EURO 4 ซึ่งยังไม่มีกรอง DPF [21] โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ DPF เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรือ DPF ต้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

(1) การขับรถที่ความเร็วต่ำหรือระยะสั้นเป็นเวลานาน ทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถสร้างความร้อนสะสมได้ถึง 600 °C ส่งผลให้กระบวนการ Regeneration เผาไหม้เขม่าในอุปกรณ์ DPF ไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นแต่ไม่สมบูรณ์ วิธีแก้ไขคือ เมื่อมีไฟสัญญาณเตือนของ DPF ปรากฏขึ้นที่หน้าปัดรถ ก็ควรขับรถในความเร็วอย่างน้อย 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นเวลาประมาณ 20 นาที หรือกระทั่งไฟสัญญาณเตือน DPF ดับลง

(2) การเติมน้ำมันดีเซลคุณภาพต่ำ ไม่มีมาตรฐานที่ดีพอ อาจส่งผลให้มีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปอุดตัน เผาไหม้ไม่ได้ หรือเผาไหม้ไม่หมด การเลือกใช้ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงกำมะถันต่ำกว่า 10 ppm จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมหากต้องรักษาสภาพ DPF ให้ใช้งานได้ยาวนาน และลดมลภาวะทางอากาศได้ด้วย

(3) ใช้น้ำมันเครื่องที่ไม่เหมาะสมกับรถยนต์ที่ติดตั้งระบบDPF เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะกลายเป็นเขม่าที่มีอนุภาคใหญ่เกินไป ทำให้กระบวนการรีเจเนอเรชั่นนั้นเผาไหม้เขม่าในอุปกรณ์ DPF ไม่หมด

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้งาน DPF ยังคงมีข้อจำกัดการสลายขนาดอนุภาคให้เล็กลง ในงานวิจัยจึงได้มีการคิดค้นวิธีการกำจัดอนุภาค PM2.5 ด้วยการออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ โดยอาศัยหลักการทฤษฎีทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [22]-[23] ซึ่งการทำงานจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่งไปยังชุดกระจายอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าลบ เมื่อโมเลกุลของอากาศมากระทบชุดกระจายอิเล็กตรอนก็จะเกิดการแตกตัวของอากาศเกิดเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยวซึ่งเป็นประจุลบยังมีประสิทธิภาพในการเกาะติดฝุ่นละอองที่แขวนลอยในอากาศทำให้ฝุ่นละอองให้มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากขึ้นตกลงสู่พื้น [24]

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทดลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 1-8 kV ในการลดปริมาณอนุภาค PM2.5 ที่เหมาะสมสำหรับไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการลดปริมาณอนุภาค PM2.5 ด้วยวิธีการพลาสมาอนุภาคไฟฟ้าประจุลบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

1.2.3 ออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้ค่าเฉลี่ยของปริมาณอนุภาค PM2.5 ที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลจริงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมา ใช้ในการทดลอง

1.3.2 ใช้วงจรทวิคูณแรงดันในการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงสุด 8 กิโลโวลต์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการลดลงของอนุภาค PM2.5

1.4.2 ได้ผลการทดลองของอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ

1.4.3 ได้ทราบผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ปัจจุบันการใช้รถยนต์ในประเทศไทยแพร่หลายมากขึ้น จนถือได้ว่ารถยนต์เป็นพาหนะสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนไทยอย่างหนึ่งเนื่องจากรถยนต์มีความสะดวกในการเดินทางในระยะไกล และสามารถหลีกเลี่ยงมลพิษจากภายในรถได้เป็นอย่างดี จากข้อมูลสถิติ ณ วันที่ 31 มกราคม 2564 จำนวนรถยนต์มีจำนวน 41,549,417 คัน [1] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อมลพิษทางอากาศและก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

มลพิษทางอากาศ หมายถึง อากาศที่มีสิ่งปนเปื้อนในปริมาณมากเกินไปจนกระทั่งทำให้อากาศเสื่อมคุณภาพและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์และพืช ส่วนมวลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศมีทั้งรู้ของแข็ง ฝุ่นละออง ก๊าซ รวมทั้งกลิ่น เขม่า ควีน สารกัมมันตรังสี สารประกอบไฮโดรคาร์บอน โปรทตะกั่ว ออกไซด์ของไนโตรเจน และคาร์บอน [25] รวมไปถึงไอเสียรถยนต์ที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงก็มีสารเจือปนอยู่ในนั้น ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีส่วนในการสร้างมลพิษทางอากาศ และจำนวนรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของสารพิษในอากาศเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และฝุ่นละอองซึ่งเป็นสารที่อาจก่อมะเร็งโรคทางเดินหายใจหากได้รับสารนี้ในปริมาณมาก [26]-[27]

2.1 แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ

แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ หมายถึง ที่มาของมลพิษทางอากาศซึ่งนอกจากแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น พายุ ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินไหว และไฟไหม้ป่า ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดฝุ่นละอองจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ มลพิษทางอากาศส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชุมชนและเขตโรงงานอุตสาหกรรมโดยมีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ซึ่งจำแนกได้ดังนี้ แหล่งกำเนิดจากยานพาหนะที่ใช้ในการคมนาคม เกิดจากการระเหยของเชื้อเพลิงจากส่วนต่าง ๆ ของยานยนต์ จึงทำให้เกิดสารมลพิษต่าง ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ละอองตะกั่ว ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควีน เขม่า ฝุ่นละออง เป็นต้น แหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมมลพิษทางอากาศเกิดจากกระบวนการผลิต และการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ดีเซล ก๊าซธรรมชาติ และก๊าซ LPG ซึ่งเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพ [28]

2.1.1 แหล่งกำเนิดมลพิษจากรถยนต์

แหล่งกำเนิดมลพิษจากรถยนต์เมื่อพิจารณาการทำงาน of เครื่องยนต์และกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จะพบว่าแหล่งกำเนิดมลพิษจากรถยนต์มี 3 แหล่ง ได้แก่

(1) การระเหยของก๊าซจากส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ เช่น การระเหยของไฮโดรคาร์บอน จากถังน้ำมันและคาร์บูเรเตอร์ ซึ่งปริมาณจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบรรยากาศ จากสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนที่ระบายออกทั้งหมดจากรถยนต์ประมาณได้ว่าจะมีไฮโดรคาร์บอนที่ระบายออก 20% จากระบบนี้ ทั้งในเครื่องเบนซิน 2 และ 4 จังหวะ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลจะไม่มี การระเหยจากระบบนี้เนื่องจาก จุดเดือดของน้ำมันดีเซลสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ และองค์ประกอบเครื่องไม่มีคาร์บูเรเตอร์จึงไม่มีการระเหยออกของไฮโดรคาร์บอน [29]

(2) การระเหยของก๊าซจากเพลาค้อเหวี่ยง (Crankcase) ที่มีการอัดลูกสูบสำหรับเตรียมจุดระเบิด จะมีไอดีบางส่วนที่ผ่านลูกสูบออกมาอย่างอ่าวกับน้ำมันไอดีเหล่านี้ ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์เบนซิน 4 จังหวะโดยมีสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนที่ระบายออกมาด้วยวิธีนี้ประมาณ 25% ของไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยจากรถยนต์ แต่กรณีเครื่องยนต์ดีเซลมีการระเหยของไฮโดรคาร์บอนด้วยวิธีนี้ประมาณ 1% ของไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยจากรถยนต์ดีเซล [30]

(3) การระเหยอากาศเสียจากระบบไอเสียรถยนต์ สารมลพิษจากระบบนี้เป็นส่วนที่มีอันตรายและปริมาณมากที่สุด ซึ่งมาจากผลการสันดาปเชื้อเพลิงและสารอื่น ๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้และเผาไหม้แล้วบางส่วน ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่มาจากเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาไหม้ของไนโตรเจน กับอากาศที่อุณหภูมิสูง และสารตะกั่วที่ใช้เติมในน้ำมันเบนซิน และยังมีควันท้าอันเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล [31]

2.1.2 สารมลพิษจากรถยนต์

มลพิษสารต่าง ๆ ที่เกิดจากการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ของน้ำมันเบนซิน น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลในเครื่องยนต์จะปล่อยสารมลพิษ ไอควัน ก๊าซ ต่าง ๆ หลายชนิดออกมาจากท่อไอเสียชั้นบรรยากาศในอัตราสูงเป็นอันดับหนึ่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์ปล่อยอากาศสู่ชั้นบรรยากาศ เป็นอันดับหนึ่งและยังไม่มีกฎหมายควบคุมหรือแก้ปัญหาการใช้รถยนต์ควันท้าอันของรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินหลุดออกมาสู่ชั้นบรรยากาศ [32] ไอเสียก๊าซและเขม่าแยกออกมาได้ดังนี้

(1) คาร์บอนมอนนอกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจาก คาร์บอนมอนนอกไซด์ เปลี่ยนเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สมบูรณ์เนื่องจากอากาศในการเผาไหม้ไม่เพียงพอ ดังนั้นวิธีแก้ไขคือการเพิ่มอัตราส่วน A/F ให้มีปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นออกไซด์ของไนโตรเจน [33]

(2) ออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการสันดาปในเครื่องยนต์ ไนตริกออกไซด์จะมี Enthalpy สูงกว่าทั้ง N_2 และ O_2 ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิที่สูง และอีกปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดไนตริกออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนในขณะการสันดาป ซึ่งเครื่องยนต์เบนซินจะพบอัตราการเกิด ไนตริกออกไซด์มีปริมาณต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากอุณหภูมิในการสันดาปต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล [34]

(3) ไฮโดรคาร์บอนที่ระบายออกมาจากไอเสียรถยนต์มีสาเหตุ 3 ประการ ได้แก่ สาเหตุจากบริเวณผนังลูกของเสื่อสูบที่ถูกหล่อเย็นมีอุณหภูมิต่ำจนกระทั่งไม่เกิดกานสันดาป ทำให้มีไฮโดรคาร์บอนออกมา สาเหตุต่อมา บริเวณลูกสูบล้ออัตรารส่วน A/F น้อยเกินไปทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สาเหตุสุดท้าย อัตราส่วน A/F สูงเกินไปทำให้สูญเสียความร้อนเนื่องจากอากาศที่เกินทำให้การสันดาปไม่เกิดขึ้น [35]

(4) ควันดำจากไอเสียสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ หยดของเหลว (Liquid Particulate) ซึ่งเป็นควันสีขาวจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มสตาร์ทเครื่อง ประกอบไปด้วย ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลว น้ำมันหล่อลื่น และบางส่วนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด ซึ่งควันเหล่านี้จะหมดไปเมื่อเครื่องยนต์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ควันดำ (Black Smoke) เป็นการรวมตัวของคาร์บอนและส่วนหนึ่งของไฮโดรคาร์บอนซึ่งถูกเผาไหม้บางส่วน ซึ่งสาเหตุของการเกิดควันดำ คือ น้ำมันที่ถูกฉีดเป็นละอองเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง หากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการคายไฮโดรเจนไปเป็นคาร์บอนอิสระและรวมตัวกันเป็นสีดำ ส่วนควันดำของรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลก่อนมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศซึ่งมาจากท่อไอเสียและเขม่า แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน [36]

(5) มลพิษที่ออกมาเป็นเขม่า มีดังนี้ ผงคาร์บอน สารประกอบของตะกั่ว สารจำพวก ฟีนอลส์ น้ำมันรถยนต์สารอินทรีย์จำพวกไนโตรเจน ยางเหนียว ซึ่งประกอบไปด้วยโพลีซาย คลิโกลโรเมติก ไฮโดรคาร์บอน ยางเหนียวเหล่านี้ ประกอบไปด้วย เบนโซลีน ไพเรนซ์เบนโซลีน แอนทราโซน บิมโซทีทราเพน ไดเบนไพริน [37]

(6) สารตะกั่วที่ถูกเติมลงไปเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ และสารตะกั่วที่ระบายออกมาทางไอเสียมีปริมาณ 70% ของทั้งหมดและ 50% ของปริมาณที่ปล่อยออกมาจะตกลงสู่พื้นทันที ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นละอองจะลอยอยู่ในอากาศ หากสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์จะก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งจะมีอาการมีนเมา โลหิตเป็นพิษ กระดูกผุ เยื่อหุ้มสมองอักเสบ และหากมีการสะสมเป็นปริมาณมากอาจทำให้เสียชีวิตได้ [38]

2.1.3 แหล่งที่มาของมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็ก

แหล่งที่มาของมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กมี 4 แหล่งดังนี้

(1) การก่อสร้างอาคาร ได้แก่ การก่อสร้างอาคารทั้งหมดซึ่งรวมถึงการก่อสร้างตัวอาคาร กอองวัสดุ การเปิดหน้าดิน การผสมวัสดุ เช่น การผสมคอนกรีต การเผาขยะและแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ที่เกิดเนื่องจากการก่อสร้าง ดัดแปลง ซ่อมแซม รื้อถอนอาคารทุกประเภท การขนส่งวัสดุออกนอกบริเวณก่อสร้าง การฟุ้งกระจายของกองวัสดุที่กองอยู่ในบริเวณทำการก่อสร้าง งานก่อสร้างถนนและบริเวณทำการก่อสร้างเนื่องจากเครื่องจักรกำลังทำงาน

(2) จากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงสีข้าว โรงงานผลิตคอนกรีต โรงงานผสมหินคลุก โกดังเก็บปูนซีเมนต์ เป็นต้น [39]

(3) จากระบบขนส่งมวลชนที่มีอยู่ในปัจจุบัน เป็นทั้งสาเหตุที่ทำให้เกิดฝุ่นและตัวทำให้ฝุ่นฟุ้งกระจายไปในจุดที่อยู่ห่างไกลออกไป เพราะลักษณะการขนส่งมวลชนเป็นไปในรูปแบบการเคลื่อนที่ผ่านอากาศทำให้อากาศปั่นป่วนจึงทำให้เกิดฝุ่นละอองได้ เพื่อให้เข้าใจและสามารถจินตนาการถึงขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจึงได้มีการเปรียบเทียบ ซึ่งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 [40]-[41]

(4) ฝุ่นของควันธูปจะทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) เมื่อทุกสูดดมเข้าไป ควันจะลงสู่ระบบทางเดินหายใจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาสุขภาพในอนาคตได้ ประกอบกับในธูปพบสารก่อมะเร็งมากถึง 3 ชนิด ได้แก่ เบนซิน บิวทาไดอีน และเบนโซเอไพรีน ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ผู้ได้รับสัมผัสเป็นเวลานานจึงเสี่ยงต่อการเกิดโรคร้าย โดยเฉพาะโรคมะเร็งปอดได้ต่อไป

การจุดธูปจะทำให้เกิดควันและมลพิษในอากาศ ซึ่งสารที่อยู่ในควันธูปนั้นเป็นพิษต่อสารพันธุกรรมและสามารถนำไปสู่การเกิดมะเร็งในมนุษย์ เช่นเดียวกับที่พบในพวกควันท่อไอเสียรถยนต์ ควันบุหรี่ หรือควันจากกิจกรรมในอาคาร เช่น การใช้เชื้อเพลิงจุดอาหาร ยากันยุง

สำหรับสถานที่เสี่ยงได้รับควันธูปจำนวนมาก เช่น วัด การศึกษาวิจัยพบว่าคนทำงานในวัดมีสารก่อมะเร็งในเลือดสูงกว่าทั่วไป 4 เท่า แต่ไม่ใช่ทุกสถานที่ ๆ จุดธูปเป็นประจำ จะเกิดผลลัพธ์ดังกล่าว ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ การระบายอากาศ ล้วนส่งผลกระทบต่อการรับสัมผัสเพิ่มสูงขึ้น [42]

ตารางที่ 1 ขนาดทั่วไปของอนุภาคมวลสาร

สาร	ขนาดใหญ่ที่สุด(ug)	ขนาดเล็กที่สุด (ug)
1. ละอองน้ำ	500	40
2. ผงถ่านหิน	250	25
3. ฝุ่นโรงถลุงเหล็ก	200	1
4. ผงซีเมนต์	150	10
5. ซีเมนต์	110	3
6. เกสรดอกไม้	60	20
7. หมอก	40	1.5
8. สปอร์ต้นไม้	30	10
9. แบคทีเรีย	15	1
10. สีฟัน	4	0.1

11. คิวโนบูทรี	1	0.01
12. คิวโนน้ำมัน	1	0.03
13. คิวโนซิงค์ออกไซด์	0.3	0.01
14. คิวโนถ่านหิน	0.2	0.01
15. ไวรัส	0.05	0.003

2.2 ผลกระทบของมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ

ฝุ่นละอองเป็นอนุภาคมวลสารที่มีความหลากหลายทางกายภาพและองค์ประกอบต่างมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ฝุ่นละอองที่อยู่ในชั้นบรรยากาศรอบตัวเรามีขนาดตั้งแต่ 0.002 ไมครอน ไปจนถึง 500 ไมครอน ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศนานเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก นอกจากนี้มีความเร็วในการก่ตัวต่ำ แล้วแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น หากมีแรงกระทบจากภายนอกเข้ามามีส่วนร่วมแรงอากาศจากภายนอกก็มีส่วนในการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งลอยอยู่บนอากาศ เช่น การไหลเวียนของอากาศ กระแสลม โดยเฉพาะ ขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมครอน อาจลอยอยู่ในอากาศได้นานและเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กในชั้นบรรยากาศ ในการรวมตัวปฏิกิริยาทางฟิสิกส์หรือทางเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีแสง เช่น คิวโน เขม่า หรือเกิดจากคิวโนดำจากท่อไอเสียรถยนต์ จากการจราจร จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจากห้องเครื่องยนต์คิวโนดำและคิวโนขาว คืออนุภาคของถ่านหรือคาร์บอนเป็นผงที่เหลือจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นส่วนใหญ่ เป็นผลก่อสารมะเร็งในปอด คิวโนขาวเกิดจากการ ที่เครื่องยนต์ไม่ได้รับการบำรุงอย่างดี โดยเฉพาะรถยนต์เก่าที่มีอายุการใช้งานนานกว่า 15 ปี ตามพระราชบัญญัติการรถยนต์ พ. ศ. 2522 มิได้กำหนดการใช้งานจริงเรื่องอายุของเครื่องยนต์ [43]

จากผลการศึกษาทั่วโลกพบว่า หากฝุ่นละอองขนาดเล็กสูงกว่าค่ามาตรฐาน จะส่งผลกระทบต่อการเสียชีวิตด้วย มีผลต่อระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น 7% –20% การป่วยด้วยโรคระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น 5.5% การเสียชีวิตด้วยโรคระบบ หัวใจและหลอดเลือดเพิ่มขึ้น 2% – 5% การป่วยด้วยโรคระบบหัวใจและหลอดเลือดเพิ่มขึ้น 5.3% ผู้สูงอายุป่วย ด้วยระบบทางเดินหายใจเพิ่ม 17% ผู้สูงอายุป่วยด้วยโรคระบบหัวใจและหลอดเลือดเพิ่ม 7.6% และยังทำให้สุขภาพปอดในเด็กแยลง [44] นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยในประเทศต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ สนับสนุนว่า PM10 มีผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น

(1) ผลกระทบของ PM10 ต่ออุบัติการณ์ของกล้ามเนื้อหัวใจเสียชีวิต ในการทบทวนวรรณกรรมเชิงระบบของ Bhaskaran et al. พบ 3 ใน 5 การศึกษาที่ทบทวนแสดงให้เห็นว่า พบว่าทุก ๆ 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของ PM10 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราเสียชีวิตทุกสาเหตุ อัตรา

เสียชีวิตด้วยโรคระบบหัวใจและระบบทางเดินหายใจ และอัตราการเสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งปอดเพิ่มขึ้นเป็น 4% 6% และ 8% ตามลำดับ [45]

(2) การศึกษาของ Schwartz และ Morris (1995) ซึ่งใช้วิธีการศึกษาแบบอนุกรมเวลาเชิงนิเวศ (Ecologic time-series design) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง PM10 กับการรับเข้ารักษาในโรงพยาบาลด้วย โรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดในประชากรที่มีอายุมากกว่า 65 ปีในเมือง Detroit โดยใช้เวลาการศึกษา 4 ปี พบมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ [46]

(3) การศึกษาของ Ostroetal. ที่ติดตามเด็กแอฟริกันและอเมริกัน อายุ 7–12 ปี จำนวน 87 คน ที่ยืนยัน ว่าเป็นโรคหอบหืดมาแล้วไม่น้อยกว่า 6 สัปดาห์แต่อยู่ตลอดการศึกษาเพียง 83 คน ส่วนใหญ่อาศัยอยู่ใจกลางเมือง Los Angeles และก่อนมาทางใต้การวิเคราะห์ใช้รายงานรายวันของอาการระบบทางเดินหายใจได้แก่ ไอ หายใจขัด และหายใจมีเสียงหวีดเป็นตัวแปรตาม ผลการศึกษาพบว่า PM10 ที่ได้จาก 3 เมือง Los Angeles มีค่าเฉลี่ย $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงจากมลพิษทางอากาศ กรณีฝุ่นละอองขนาดเล็ก 7 (ช่วง 19 ถึง $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$) จากการวิเคราะห์ด้วย General logistic regression with generalized estimating equation (GEE) พบว่า การหายใจขัดมีความสัมพันธ์กับระดับ PM10 และโอโซนอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถ ประมาณได้ว่า ทุก ๆ $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ของ PM10 ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อาการหายใจขัดเพิ่มขึ้น 9% สำหรับอาการอื่น ๆ ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ

(4) การศึกษาของ Peters และคณะ ที่ติดตามเด็กหอบหืด อายุ 6–14 ปีจำนวน 89 คน ในเมืองโซโคลอฟ สาธารณรัฐเซค โดยกลุ่มตัวอย่างมีการบันทึกค่า Peak flow ทุกวันเป็นเวลา 7 เดือน ในระหว่างฤดูหนาว ปีค.ศ. 1991–1992 ร่วมกับการวัดคุณภาพอากาศ ได้แก่ PM10, SO_2 , TSP, และอนุภาคที่มีความเป็นกรดสูง พบว่า ค่าเฉลี่ยของ PM10 คือ $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สูงสุด $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ผลการวิเคราะห์โดยสถิติ Linear regression สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถภาพปอด และ Logistic regression พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างระดับอนุภาค ฝุ่นกับสมรรถภาพปอดหรืออาการทางระบบทางเดินหายใจ [47]

แหล่งที่มาของอนุภาคฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพซึ่งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2 [48]

ตารางที่ 2 แหล่งที่มาของมลพิษในพื้นที่ แหล่งที่มาของมลพิษในพื้นที่

แหล่งที่มาของมลพิษในพื้นที่ยี่	สารมลพิษที่เกิดขึ้น	ผลกระทบต่อสุขภาพ
<ul style="list-style-type: none"> - การฟุ้งของฝุ่นดินบนถนน - การเผาไหม้ของถ่านหิน น้ำมัน เศษไม้ - กระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง - กิจกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ - การระเหยของแก๊สบางชนิด - ฝุ่นที่เกิดการบรรทุกขนส่งหิน - การก่อสร้างและรื้อถอน - เขม่าควันจากการเผาไหม้ขยะ - ควันจากการสูบบุหรี่ - ควันจากการประกอบอาหาร - ควันจากยานพาหนะ 	<ul style="list-style-type: none"> - PM10 - PM2.5 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ปอดและระบบทางเดินหายใจ การขาดเจ็บหรืออักเสบ ไวต่อการติดเชื้อ ระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น และทำให้ อากาศหอบหืดมากขึ้น 2. ระบบอื่นเนื่องจากการขาดเจ็บของปอด และระบบทางเดินหายใจ หัวใจ ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการหายใจเนื่องจากสมรรถภาพการแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลง เพิ่มความเสี่ยงต่ออาการหัวใจวาย และมีผลต่อปริมาณเซลล์ในโลหิต

2.3 แนวทางในการป้องกันปัญหามลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กจากรถยนต์

ผู้เชี่ยวชาญด้านมลพิษทางอากาศสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย (Thailand Environment Institute, TEI) กล่าวว่า ในช่วงปัญหา PM 2.5 ในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑลมีความเข้มข้นเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของฝุ่นละอองขนาดเล็กอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยคือ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ หากไม่มีมาตรการที่จะลดการระบายฝุ่นละอองขนาดเล็กในช่วงวิกฤตที่เป็นรูปธรรมคือ บังคับใช้กฎหมายในการควบคุมปัญหาการใช้รถยนต์ดีเซลโดยเฉพาะรถยนต์บรรทุกดีเซลขนาดใหญ่และรถยนต์โดยสารดีเซลขนาดใหญ่ มาตรการและแนวทางคิดในการแก้ไขควรแบ่งเป็น 2 มาตรการในระยะยาว ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันให้มีสารกำมะถันไม่เกิน 10 ppm การบังคับใช้มาตรฐานการระบายมลพิษสำหรับรถใหม่ระดับมาตรฐาน Euro 5 Euro 6 การปรับเปลี่ยนรถบรรทุกดีเซลขนาดใหญ่ทั้ง 6 ล้อ 10 ล้อ และรถโดยสารดีเซลขนาดใหญ่ทั้งรถยนต์โดยสารประจำทางและไม่ประจำทาง รถทัวร์ นักท่องเที่ยว และรถส่งรับส่งพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงรถยนต์ส่วนบุคคลให้เป็นตามพระราชบัญญัติการค้าน้ำมัน พ.ศ. 2543 กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำไปใช้กับเครื่องยนต์ที่มีความสำคัญเพราะจะเป็นผลต่ออากาศเสียที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องยนต์โดยนำแนวเปรียบเทียบกับต่างประเทศกำหนดใช้เพื่อลดปัญหามลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ เช่น รถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง รถไฟฟ้า ขั้วเคลื่อนมอเตอร์และมาตรฐาน Euro 5 ที่มีอุปกรณ์กรองฝุ่นและอุปกรณ์กำจัดก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน เหล่านี้ช่วยลดปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ

หรือการบังคับใช้รถยนต์ที่มีอายุเกินกว่า 15 ปีที่มีการใช้งานจริงโดยมีมาตรการในการเก็บภาษีมูลค่า การปล่อยมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้น [49]

2.4 แนวคิดการกำหนดกฎเกณฑ์มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในประเทศไทย

(1) ระดับที่ปริมาณมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ มีค่าเกิน $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ให้ส่วนราชการ ทุกหน่วยงานต้องดำเนินการตามภารกิจอำนาจหน้าที่และกฎหมายที่มีอยู่ให้ครบถ้วน ตามสภาวการณ์ ปกติ

(2) ปริมาณมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศมีค่าเกิน $51-75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ให้ทุกส่วนราชการ ดำเนินการเพิ่มเติมและยกระดับมาตรการต่าง ๆ ให้เข้มงวดขึ้นในระดับนี้มีอำนาจจัดการผู้ว่าราชการ กรุงเทพฯและผู้ว่าราชการจังหวัดที่ประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศเป็นผู้บังคับบัญชาการ เหตุการณ์ในพื้นที่ที่รับผิดชอบสำหรับราชการอื่น ๆ เป็นหน่วยสนับสนุนในการปฏิบัติการ

(3) ปริมาณมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศค่า $76-100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ให้เป็นอำนาจหน้าที่ ของผู้ว่าราชการจังหวัดและผู้ว่ากรุงเทพฯที่ประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศในการใช้ กฎหมายที่มีอยู่ เช่น พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 และพระราชบัญญัติ ป้องกันภัยและ บรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ พ.ศ. 2550 เป็นต้น

(4) ปริมาณมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ แนวทาปฏิบัติกำหนดให้มีการ ประชุมคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเป็นการเร่งด่วน และพิจารณา กลั่นกรองแนวทางแก้ไข ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศโดยต้องเรียนนายกรัฐมนตรีเป็นการเร่งด่วน เพื่อพิจารณาสั่งการ ที่เป็นแนวทาง หรือมาตรการลดมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ [50]

การจัดทำเกณฑ์แนะนำคุณภาพอากาศขององค์การอนามัยโลก (WHO Air Quality Guideline) ในปีพ.ศ. 2548 เป็นแนวทางให้ข้อมูลเชิงประจักษ์ทางวิทยาศาสตร์ล่าสุด โดยกำหนด เป้าหมายคุณภาพอากาศที่จะช่วยปกป้องผู้คนส่วนใหญ่จากผลกระทบต่อสุขภาพจากมลพิษทาง อากาศ ด้วยเกณฑ์แนะนำระดับมลพิษทางอากาศไว้ดังแสดงในตารางที่ 3 [51]

พหุ มลพิษทางอากาศ

ตารางที่ 3 มาตรฐานเกณฑ์คุณภาพอากาศแนะนำโดยองค์การอนามัยโลก

มลพิษทางอากาศ	ค่าเกณฑ์แนะนำโดยองค์การอนามัยโลก ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน(PM _{2.5})	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยรายปี 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 24 ชั่วโมง
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM ₁₀)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยรายปี 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 24 ชั่วโมง
ก๊าซโอโซน (O ₃)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 8 ชั่วโมง
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์(NO ₂)	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยรายปี 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO ₂)	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 24 ชั่วโมง 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยใน 10 นาที

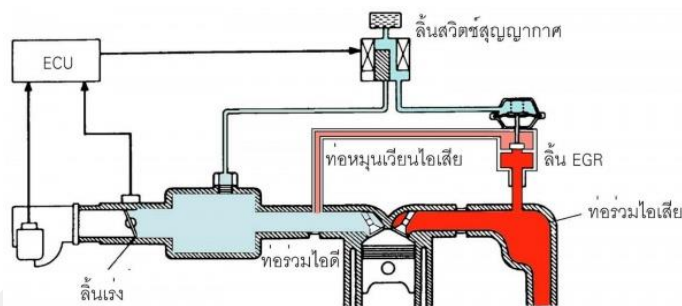
2.5 เทคนิคการควบคุมและปรับปรุงมลพิษจากเครื่องยนต์

มลพิษจากเครื่องยนต์เป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษในอากาศในลำดับต้น การปรับปรุงมลพิษมลพิษจากเครื่องยนต์จึงถือเป็นความสำคัญเป็นอันดับแรก ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้เกิดมลพิษจากเครื่องยนต์ให้น้อยที่สุด ซึ่งวิธีการแก้ไขและปรับปรุงมลพิษจากเครื่องยนต์มีดังนี้

(1) อุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบประเหย มลพิษจะระเหยออกจากถังน้ำมัน และที่คาร์บูเรเตอร์ จึงได้มีการต่อท่อดักเก็บไอน้ำมันที่ระเหยออกจากทั้งสองแห่ง แล้วกำหนดให้ผ่านชุดดักไอน้ำมันที่ประกอบไปด้วย สาร Charcoal Canister เมื่อไอน้ำมันไหลผ่านจะมีการดัก ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ไว้ และเมื่อเวลาสตาร์ทเครื่องยนต์ อากาศจะเข้าไปในเครื่องยนต์จะทำการดูด ก๊าซไฮโดรคาร์บอน กลับเข้าไปเครื่องยนต์ใหม่

(2) อุปกรณ์ในระบบกันอ่าง เดิมการระเหยออกจากกันอ่างจะต่อท่อทิ้ง ปัจจุบันได้ดักเก็บไอน้ำมันเหล่านั้นผ่านเข้าระบบไอดีแล้วส่งต่อไปยังห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ในขั้นตอนต่อไป การออกแบบในลักษณะจะมีวาล์วดัก Backfire เพื่อไม่ให้เกิดการระเบิดของกันอ่าง

(3) อุปกรณ์ในระบบไอเสีย ปกติที่มีการใช้กันทั่วไป คือ EGR วาล์ว ให้ไอเสียผ่านเข้าในท่อไอดี แล้วรวมกับไอดีมาเข้าเผาไหม้ต่อไป หรือใช้วิธีการพ่นอากาศเข้าท่อไอเสีย ซึ่งจะเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซออกซิเจน จะทำปฏิกิริยากับ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน และ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้ลดมลพิษลง หรือทำการติด Catalytic Converters ซึ่งจะเปลี่ยน ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และ ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ให้กลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ยังมีปัญหาคือ ซัลเฟอร์ ในน้ำมันที่ผ่านออกมาทำให้ Catalytic Converters ผุกร่อน [52]



ภาพประกอบที่ 1 การทำงานของระบบ Exhaust Gas Recirculation : EGR [52]

(4) ปรับปรุงระบบเผาไหม้ มลพิษ 60% ที่ออกจากไอเสียเครื่องยนต์ และไอเสียนี้จะมีมลพิษมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเผาไหม้ในกระบอกสูบ หากสามารถปรับปรุงให้เกิดกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้จะทำให้ไม่มีมลพิษเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ แต่การเผาไหม้ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สัมพันธ์กันหลายปัจจัย ซึ่งไม่อาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการปรับปรุงได้ในบางส่วน คือ

1. ปรับปรุงระบบคาร์บูเรเตอร์ให้มีส่วนผสมบางลง ทำให้ลด คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนได้แต่กลับทำให้ ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น
2. เพิ่มอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนลดลง แต่กลับส่งผลออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น
3. ออกแบบระบบกรองอากาศใหม่ ให้ดูดอากาศได้สะดวกขึ้น ส่งผลให้ส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
4. ลดอัตรากำลังอัดของเครื่องลง เพื่อใช้น้ำมัน Octane ต่ำที่ไม่มีสารตะกั่ว และลดอุณหภูมิในกระบอกสูบทำให้ ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณลดลง
5. ปรับปรุงระบบ Vacuum Advance ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยเฉพาะช่วงของ โหลดน้อยและไม่มีโหลดเพราะเครื่องยนต์จะมีอุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณ ออกไซด์ของไนโตรเจนมีปริมาณสูงขึ้น [53]

(5) Diesel Particulate Filter (DPF) อุปกรณ์กรองเขม่าเครื่องยนต์ดีเซลคืออุปกรณ์ที่ใช้กรองไอเสียจากท่อไอเสียรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลโดยเฉพาะ โดยสามารถลดเขม่าและฝุ่นขนาดเล็กจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์นี้จะถูกติดตั้งไว้กับรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซล ที่ผ่านมาตรฐาน EURO 5 ขึ้นไป กลไกการทำงานของ DPF ภายในอุปกรณ์จะมีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายรังผึ้ง เมื่อมีไอเสียจากการเผาไหม้ในห้องจุดระเบิดไหลผ่านเข้ามา ผงเขม่าและเขม่าที่มีลักษณะเป็นเมือกเหนียวจะถูกอุปกรณ์ DPF นี้ดักจับไว้ ส่งผ่านไปเพียงแค่อากาศบริสุทธิ์ ความร้อน

และเขม่าควันเพียงเล็กน้อยที่หลุดลอดออกไปได้ เมื่อดักผงเขม่าเอาไว้มากเข้าก็ย่อมต้องอุดตันใน อนาคต ถึงตอนนี้ระบบทำความสะอาดตัวเองอัตโนมัติ หรือ รีเจนเนอเรชั่น (Regeneration) ก็ จะทำงานขึ้น โดยมีเซนเซอร์ที่อยู่บริเวณขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ DPF เป็นตัวเก็บข้อมูลเพื่อสั่งการ เมื่อเซนเซอร์ขาออกตรวจพบว่า แรงดันในท่อนั้นน้อยกว่าแรงดันขาเข้าในระดับหนึ่ง แสดงว่าอุปกรณ์ กรองเขม่าเครื่องยนต์ดีเซลใกล้ตันแล้ว ระบบก็จะส่งสัญญาณออกไปเพื่อทำการเปิดกระบวนการรีเจ เนอเรชั่นขึ้นมาทันที โดยพ่นน้ำมันไปพร้อมกับไอเสียให้เข้าไปสะสมในตัว DPF หลังจากนั้นก็จะมีการ เผาไหม้ก่อให้เกิดความร้อนมากมายภายในตัว DPF จนกระทั่งมีอุณหภูมิสะสมสูงขึ้นถึงระดับ 600 °C ด้วยอุณหภูมิที่มากขนาดนี้จึงเผาเขม่าแห้ง เขม่าเหนียวที่ติดอยู่ในอุปกรณ์ DPF ให้สลายหายไปจน หมด แต่ระบบรีเจนเนอเรชั่นก็มีเงื่อนไขในการใช้งานอยู่เหมือนกัน คือโดยปกติแล้ว DPF จะตัน หลังจากการใช้งานในระดับ 10 ปีขึ้นไป ซึ่งหากใช้งานไม่ตรงกับเงื่อนไข ไม่ดูแลรักษาอย่างถูกต้อง ระบบรีเจนเนอเรชั่นก็จะทำงานไม่สมบูรณ์ ทำให้มีน้ำมันดีเซลคงค้างอยู่ในอุปกรณ์ DPF ส่งผลให้ น้ำมันเครื่องล้นและเสื่อมคุณภาพเร็วกว่าปกติ หรือการเผาไหม้ทำลายเขม่าที่ติดอยู่ในตัวอุปกรณ์ DPF ไม่หมดได้ และอาจก่อให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมา เช่น ไม่สามารถออกตัวได้ เครื่องสะดุด หรือ เทอร์โบอาจเสียหาย [54]

2.6 ผลของสนามไฟฟ้าในการตกตะกอนของฝุ่นละออง

สนามไฟฟ้า (Electric Field) มีบทบาทสำคัญในการตกตะกอนสนามไฟฟ้ามีผลทั้งต่อการใส่ ประจุให้กับฝุ่นละอองและต่อแรงที่กระทำต่อฝุ่นละอองที่ได้รับประจุแล้วในแง่ทฤษฎีผลคูณระหว่าง ความแรงของสนามไฟฟ้าในย่านที่เกิดการใส่ประจุของสนามไฟฟ้าใกล้ขั้วเก็บจะเป็นตัวกำหนด คุณภาพในการเก็บฝุ่นละอองแต่ละขนาดสนามไฟฟ้าในเครื่องตกตะกอนเกิดจากการป้อนไฟฟ้า แรงดันสูง ให้กับคู่ของขั้วไฟฟ้าและจากผลกระทำโดยประจุในอากาศ (Space Charge Effect) ของ ไอออนและฝุ่นละอองติดประจุที่อยู่ในย่านระหว่างคู่ไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ในรูปทรง (Geometry) ของ ระบบเท่านั้นใน กรณีของระบบขั้วแบบเส้นลวดและผนังทรงกระบอกที่มีแนวแกนกลางร่วมกัน ความ แรงของ สนามไฟฟ้าที่รัศมีใด ๆ E_r สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) ดังแสดงต่อไปนี้

$$E_r = \frac{V}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.1)$$

- ในกรณีนี้
- E_r คือ สนามไฟฟ้าในแนวรัศมี (V/m)
 - r คือ รัศมีของเส้นลวดโคโรนา (m)
 - r_1 คือ ขนาดรัศมีของทรงกระบอกด้านใน (m)
 - r_2 คือ ขนาดรัศมีทรงกระบอกด้านนอก (m)

V คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านในและด้านนอก (V)

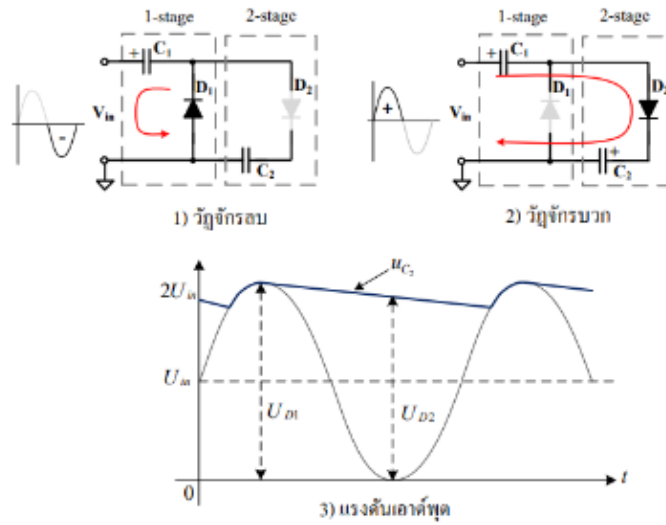
เมื่อใส่แรงดันไฟฟ้าเกินกว่าขีดเริ่มของโคโรนา (Corona Threshold) สนามไฟฟ้าจะถูกแปรเปลี่ยนโดยไอออนที่เกิดในย่านระหว่างขั้วไฟฟ้าเนื่องจากความว่องไว (Mobility) ของไอออนมีน้อยกว่าของอิเล็กตรอนมากกว่า ดังนั้น ไอออนที่เกือบไม่เคลื่อนที่นี้จะเป็เหมือนประจุในอากาศ (Space Charge) [55]

2.7 การสร้างไอออนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง

ในการสร้างไอออนด้วยแรงดันสูงสามารถสร้างได้โดยสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูง สนามไฟฟ้าความเข้มสูงนี้จะทำให้เกิดไอออนกระจายออกไปในอากาศและไอออนนั้นก็ต้องสร้างให้เป็นประจุไอออนลบด้วยซึ่งสามารถสร้างได้จากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงให้แก่ชุดอิเล็กโตรดชุดอิเล็กโตรดจะปล่อยลบ จะมีการแตกกระจายออกจากปลายอิเล็กโตรดในแบบของสเปรย์ไอออน จึงทำให้เกิดฟุ้งกระจายออกไปในทุกทิศทางหลังจากนั้นในช่วงการเดินทางของประจุ ไอออนลบในระยะทางที่สั้นมาก ๆ ก็จะมีการปะทะกันระหว่างไอออนกับโมเลกุลของอากาศจนกลาย มาเป็นไอออนโดยจะกลายมาอยู่ในรูปไอโซน ซึ่งไอโซนนี้ก็คือออกซิเจนที่มีอะตอม 3 อะตอมหน้าที่อีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ไอออนลบก็คืออิเล็กตรอนที่ถูกขับออกไปไม่ได้มีแต่ไอออนในอากาศเท่านั้นแต่ในทำนองเดียวกันก็จะมีผลต่ออนุภาคประจุไฟฟ้าของฝุ่นละอองด้วยเมื่อประจุ ไฟฟ้าลบเข้าทำปฏิกิริยากับฝุ่นละอองที่เป็นประจุบวก ดังนั้นอนุภาคของประจุก็จะเกิด การสะสมอยู่บนไอออนในบริเวณใกล้เคียงอย่างฉับพลันและนี่ก็คือวิธีการขับไล่ฝุ่นละอองในอากาศ ใหม้มีน้ำหมักและตกสู่เบื้องล่างอย่างรวดเร็วซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก็มีการประยุกต์ไปใช้งานในการเคลื่อนย้ายหรือจัดเขมาออกจากกลุ่มควันพิษต่าง ๆ ด้วย [56]

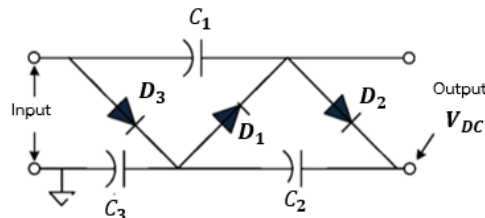
2.8 วงจรทวีแรงดัน

วงจรทวีแรงดัน (Voltage multiplier circuit) แสดงการใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุในการสร้างวงจรทวีแรงดันไฟสลับ ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟตรงที่มีค่าทวีจำนวนจากค่าแรงดันสูงสุด ของแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุต ดังภาพประกอบที่ 2



ภาพประกอบที่ 2 วงจรทวีแรงดันสองเท่า [57]

ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตราขยายให้เพิ่มสูงขึ้น จะทำการเพิ่มจำนวนของไดโอด และตัวเก็บประจุก็สามารถทำให้เพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นได้ไปเรื่อย ๆ โดยลักษณะของวงจรประกอบด้วยวงจรแคลมป์ C_1 และ D_1 ที่มีค่าเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟสลับสูงสุดเท่ากับค่าแรงดันจากยอดถึงยอดของสัญญาณอินพุต และวงจรตรวจับค่าแรงดันยอด C_2 และ D_3 ที่จะให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟตรงที่มีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุด ของแรงดันอินพุตที่ D_2 ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบที่ 3 วงจรทวีแรงดันสามเท่า [57]

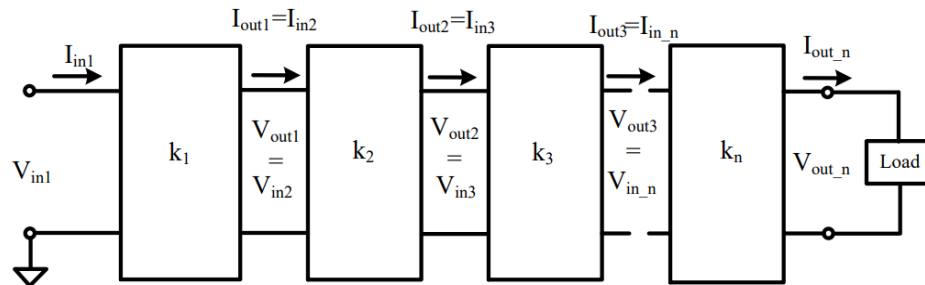
ภาพประกอบที่ 3 แรงดันตกคร่อมไดโอดแต่ละตัว

$$U_{D1} = U_{D2} = U_{D3} = U_{in} \tag{2.2}$$

ดังนั้นจะได้แรงดันตกคร่อมเอาต์พุต

$$U_{output} = 3U_{in} \tag{2.3}$$

การสร้างแรงดันได้ประมาณ 3 เท่าของค่ายอดแรงดันจ่ายออกจากตัวเหนี่ยวนำคูณด้วยจำนวนชั้น ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตราขยายให้เพิ่มสูงขึ้น จะทำการเพิ่มจำนวนของไดโอด และตัวเก็บประจุก็สามารถทำให้เพิ่มอัตราขยายให้สูงขึ้นได้ไปเรื่อย ๆ ดังภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 แผนภาพบล็อก k เท่า [58]

จากภาพประกอบที่ 4 แสดงแผนภาพบล็อก k เท่า ซึ่งพิจารณาภายใต้เงื่อนไขขอดมคติ เมื่อไม่คิดความต้านทานแฝงตัวเก็บประจุ และกำหนดค่าความถี่การทำงานเพียงพอต่อการประจุได้เต็ม และคายออกในแต่ละครึ่งวัฏจักรของคาบเวลา และขนาดเวลาเพียงพอที่จะจำกัดปรากฏการณ์ของแรงดันคงค้าง (Threshold voltage) ของไดโอด และทรานซิสเตอร์ ดังนั้นการหาค่าแรงดันเอาต์พุต [57]

$$V_{out} = kV_{in} \quad (2.4)$$

2.9 การเคลื่อนที่ของอนุภาค

การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะต้องพิจารณาแรงทั้งหมดที่กระทำบนอนุภาคดังนี้ แรงคูลอมบ์หรือแรงทางไฟฟ้า และแรงต้าน

แรงคูลอมบ์ เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้น (E) อนุภาคที่มีประจุจะได้รับแรงทางคูลอมบ์ (F_e) ที่กระทำต่ออนุภาคซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$F_e = n(t)eE \quad (2.5)$$

โดยที่ $n(t)$ คือจำนวนประจุบนอนุภาค e คือประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19}) และ E คือความแรงของสนามไฟฟ้า (V/m)

แรงต้าน เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพันธ์กับก๊าซ ที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ อนุภาคแขวนลอยจะอยู่ภายใต้แรงต้านเชิงอากาศพลศาสตร์ (F_d) แรงต้านนี้หาได้จากกฎของ Stoke's law ดังนี้

$$F_d = 3 \frac{22}{7} u_e d_p \quad (2.6)$$

โดยที่ u คือความหนืดของก๊าซ ($N \cdot s/m^3$) และ d คือขนาดของอนุภาค (m) [58]

2.10 แรงต้านทานของก๊าซต่ออนุภาค

แรงต้านทานของก๊าซจะกระทำต่ออนุภาคอย่างไม่ต่อเนื่อง และอนุภาคจะลื่นไถล (slip) ที่พื้นผิว ระหว่างโมเลกุลของก๊าซ ได้แก่ความเร็วของของไหลที่ล้อมรอบพื้นผิวอนุภาคจะไม่เป็นศูนย์) เพื่อทำการนับรวมสำหรับค่าลื่นไถลของพื้นผิวนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้ตัวชดเชยกับสมการของ สโตกส์ เพื่ออธิบายความเร็วของอนุภาคที่ตกเร็วขึ้น ตัวชดเชยนี้เรียกว่า ตัวชดเชยของคันทิงแฮม (Cunningham slip correction factor) แรงต้านสำหรับการไหลแบบลื่นไถลสามารถคำนวณได้จาก

$$F_d = \frac{3\pi\mu_e d_p}{C_c} \quad (2.7)$$

โดยที่ (C_c) คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม (-) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$C_c = 1 + \frac{2.25\lambda}{d_p} ; \text{ for } d_p > 0.1 \text{ micron} \quad (2.8)$$

ในที่นี้ λ คือระยะทางอิสระเฉลี่ยของโมเลกุล (0.06 micron)

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's law of motion) ของอนุภาคจะได้ สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอนุภาคคือ

$$F_e + F_d = ma \quad (2.9)$$

$$m \frac{du_e}{dt} = n_p e E - 3\pi\mu_e d_p$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (ถ้าสุด) จะได้ความเร็วในการเคลื่อนย้ายของอนุภาค (electrical drift velocity of particles) ดังนี้

$$u_e = \frac{n(t)eEC_c}{3\pi\mu_e d_p} \quad (2.10)$$

โดยที่ $n(t)$ คือจำนวนประจุบนอนุภาค E คือความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (V/m) และ (C_c) คือตัวชดเชยของคันทิงแฮม [59]

2.11 ความแรงของสนามไฟฟ้า

ความแรงสนามไฟฟ้า (E) สามารถคำนวณได้จาก

$$E = \frac{V_w}{s} \quad (2.11)$$

โดย E คือความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (V/m) และ V_w คือแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ (V) และ s คือระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับแผ่นเรียบ (m) [60]

2.12 การอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศจะถูกอัดประจุ (Particle charging) ด้วยสัมผัสและการเกาะติดของไอออนที่ถูกสร้างขึ้น โดยปรากฏการณ์โคโรนาดีสชาร์จที่อิเล็กโทรด ไอออนจะถูก เคลื่อนย้ายโดยสนามไฟฟ้าและหรือการแพร่เชิงความร้อน (Thermal diffusion) ในการศึกษาจำนวนของประจุที่อยู่บน อนุภาคจะได้มาจากการอัดประจุแบบสนาม (Field charging) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางมากกว่า 0.1 ไมโครเมตร โดยการประมาณค่า จำนวนประจุอนุภาคนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.12 [61-62]

$$n_p = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{E d_p^2}{4K_e e} \right) \left(\frac{\pi K_e e Z_i N_i t}{1 + \pi K_e e Z_i N_i t} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อค่าคงที่ ของการเป็นฉนวนของอนุภาค (Dielectric constant of particle) E คือสนามไฟฟ้า K_e คือค่าคงที่ จากสมการของคูลอมป์ (มีค่าเท่ากับ $9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2$) d_p คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค e คือค่าประจุของ อิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ $1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$) N_i คือค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออน (Ion number concentration) และ t คือ เวลาในการอัดประจุ (Charging time) สำหรับเครื่องตกตะกอน เชิงไฟฟ้าสถิต ค่าความเข้มข้นจำนวนของไอออนกับเวลาในการอัดประจุหาได้จาก [63]

$$N_i t = \frac{I_c d}{Z_i e v_0 V_h} \quad (2.13)$$

การอัดประจุแบบแพร่กระจายการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคแบบแพร่กระจาย สำหรับกรณีที่ไม่ มีสนามไฟฟ้าใด ๆ ปรากฏ อนุภาคจะถูกอัดประจุแบบแพร่กระจายด้วยการ เคลื่อนที่ไร้ทิศทางบราวเนียน (Brownian random motion) ของไอออนไปยังอนุภาค ค่าจำนวนประจุเฉลี่ย n_d ของการอัดประจุไฟฟ้าแบบ แพร่กระจายในช่วงเวลา t และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค d_p สามารถหา จาก สมการดังต่อไปนี้ [64]

$$n_d = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln\left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i^2 N_i t}{2kT}\right) \quad (2.14)$$

เมื่อ \bar{c}_i คือ ความเร็วเชิงความร้อนเฉลี่ยของไอออน (ion mean thermal speed)

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann's constant มีค่า 1.380658×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิทำงานของ ระบบ

e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (มีค่า 1.6×10^{-19} C)

N_i คือ ความเข้มข้นของไอออน

t คือ เวลาที่ใช้ใน การอัดประจุ

และ K_E คือ

$$K_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (2.15)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศหรืออากาศว่าง (1.5×10^{-10})

2.13 ประสิทธิภาพการตกตะกอน

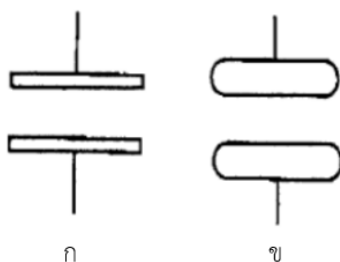
ประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมทั้งหมด (Overall collection efficiency) ของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นบางที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 10 kV สามารถหาค่าได้จากมวลของอนุภาคที่แผ่นกรองทดลองซึ่งวัดน้ำหนักได้ทางขาเข้าและทางขาออก ทั้งก่อนผ่านและหลังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถคำนวณดังสมการนี้ [65]

$$n_{\text{overall}} = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100\% \quad (2.16)$$

เมื่อ C_{inlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางเข้า และ C_{outlet} คือ ความเข้มข้นมวลของอนุภาคที่ทางออกของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวด-แผ่นเพลตขนาน

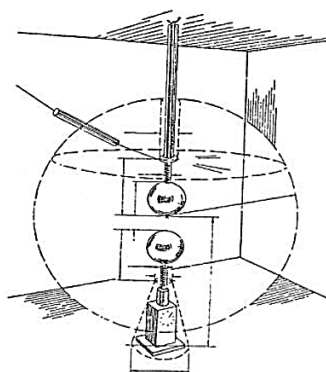
2.14 รูปแบบของขั้วไฟฟ้า

(1) ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นระนาบ ตามภาพประกอบที่ 5(ก) บริเวณตรงกลางของขั้วไฟฟ้าจะเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอแต่ที่ขอบ ของขั้วไฟฟ้าจะมีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าอยู่สูง ดังนั้นเมื่อมีแรงดันกระทำต่อขั้วไฟฟ้าจะเกิดโคโรนาขึ้นที่ขอบของขั้วไฟฟ้าจะเกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างขอบของขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่ถ้าให้ขอบของ ขั้วไฟฟ้ามีลักษณะโค้งดังภาพประกอบที่ 5(ข) การสปาร์คจะเกิดในบริเวณตรงกลางของขั้วไฟฟ้า [66]



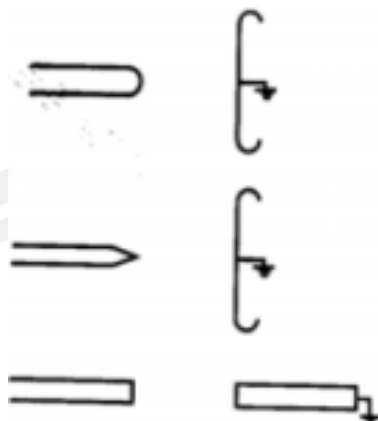
ภาพประกอบที่ 5 ขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นระนาบ [66]

(2) ขั้วไฟฟ้าแบบช่องว่างทรงกลม (Sphere Gap) ภาพประกอบที่ 6 เป็นรูปขั้วไฟฟ้าแบบช่องว่างทรงกลมสนามไฟฟ้าไม่เป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เหมือนแบบแรกแต่ถ้าช่องว่าง (d) มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลม (ϕ) สนามไฟฟ้าตรงใจกลางของช่องว่าง (Gap) จะไม่แตกต่างไปจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากนักจึง นิยมใช้กันมากในการวัดแรงดันทางไฟฟ้าแรงสูง [66]



ภาพประกอบที่ 6 ขั้วไฟฟ้าแบบช่องว่างทรงกลม [66]

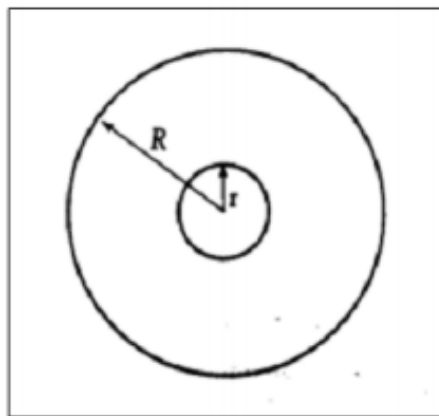
(3) ขั้วไฟฟ้ารูปร่างกลมและรูปเข็ม มีรูปแบบต่าง ๆ กันตามภาพประกอบที่ 7 ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอเมื่อให้แรงดันกระทำต่อขั้วไฟฟ้าจะเกิดโคโรนาที่มีลักษณะต่าง ๆ ขึ้นแรงดันเริ่มต้นที่ทำให้เกิดโคโรนาขึ้นนี้เราเรียกว่า Corona Inception Voltage หลังจากเกิดโคโรนาแล้วถ้าเราเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นอีกจะเกิดการเบรกดาวนในที่สุด [66]



ภาพประกอบที่ 7 ตัวอย่าง Rod-Gap และ Needle-Gap [66]

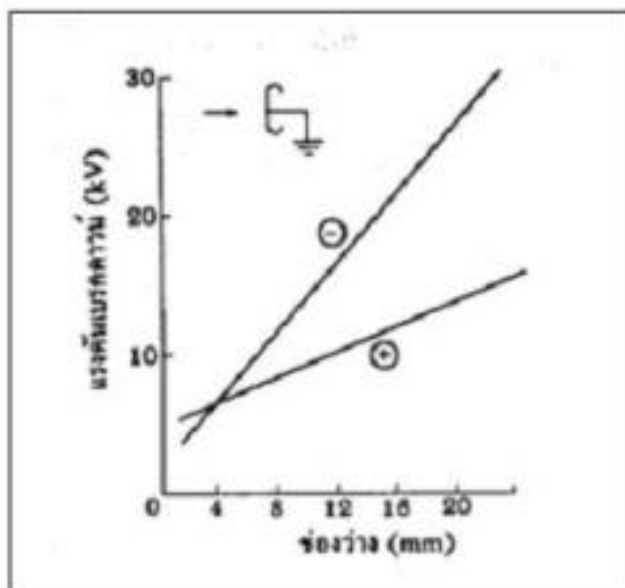
(4) ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกแกนร่วม

ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้สามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าได้ง่ายใช้กันมากในการค้นคว้าหาปรากฏการณ์โคโรนาและใช้ในการทำสายไฟฟ้าเคเบิลหรือบัสบาร์ที่ใช้ก๊าซ SF เป็นฉนวนขั้วไฟฟ้าด้านในรัศมี r และขั้วไฟฟ้าด้านนอกรัศมี R ตามภาพประกอบที่ 8 [66]



ภาพประกอบที่ 8 ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกแกนร่วม [66]

ในกรณีของกระแสสลับนั้นแรงดันที่กระทำต่อขั้วไฟฟ้าจะเป็นแรงดันบวกและลบสลับกันไป ทุกครั้งวัฏจักรส่วนใหญ่การเบรกดาวนจะเกิดขึ้นในครึ่งบวกซึ่งมีค่าแรงดันเบรกดาวนต่ำกว่าครึ่ง ดังภาพประกอบที่ 9 สามารถอธิบายได้ว่าเป็นเพราะโคโรนาบวกสามารถเกิดได้ง่ายกว่าโคโรนาลบแต่ในบริเวณที่ G_{ab} มีระยะห่างน้อยกว่า 4 mm โคโรนาบวกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางหุ้ม ดังแสดงในภาพที่ 9 [66]



ภาพประกอบที่ 9 แรงดันเบรกดาวน์ของ Needle-Gap [66]

2.15 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้า (Electron Emission)

ในการเกิดดิสชาร์จในก๊าซนอกจากอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลในก๊าซด้วยกระบวนการต่าง ๆ อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าก็มีส่วนสำคัญในการเกิดดิสชาร์จในก๊าซเช่นกันซึ่งกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ โลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะมีอะตอมอยู่ใกล้กันมากจนกระทั่งวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมหนึ่งอาจจะถือเป็นอิเล็กตรอนของอีกอะตอมหนึ่งได้ถ้าอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งมีพลังงานสูงพอก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระภายในโลหะเราเรียกอิเล็กตรอนเหล่านี้ว่า อิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ตามที่ผิวของโลหะจะมีกำแพงพลังงานศักย์ (Potential Energy Barrier) กั้นอยู่อิเล็กตรอนจะไม่สามารถหลุดออกมานอกผิวของโลหะได้จนกว่าจะได้รับพลังงานเพิ่มเติมจากภายนอกเราอาจแบ่งประเภทของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าตามแหล่งพลังงานที่เพิ่มเติมเข้ามาจากภายนอกดังนี้

(1) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความร้อน (Thermion Emission) คือการที่ อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะโดยได้รับพลังงานเพิ่มเติมในรูปของพลังงานความร้อน ตัวอย่างเช่นการเผาขั้วบวกในหลอดสุญญากาศโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านถ้าอุณหภูมิสูงพอจะทำให้ อิเล็กตรอนบางตัวมีพลังงานสูงอยู่แล้วมีพลังงานมากขึ้นจนหลุดออกจากผิวโลหะได้

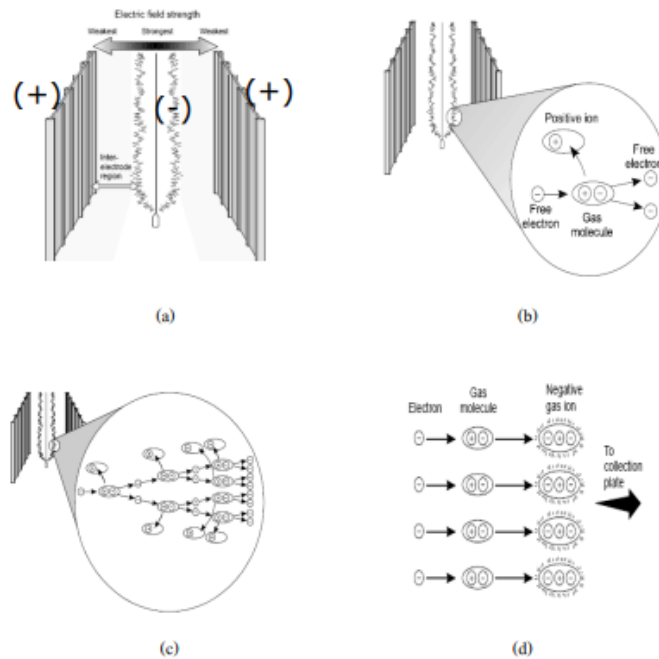
(2) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยใช้พลังแสง (Photo Emission) คือการที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะโดยพลังงานที่ได้รับเพิ่มเติมเป็นพลังงานโฟตอนจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น กรณียิงแสงเหนือม่วงตกกระทบขั้วบวกของหลอดดิสชาร์จ เป็นต้น [68]

(3) การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้าโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission) คือการที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะได้โดยรับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอกผิวโลหะเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องกับกำแพงพลังงานศักย์จะลดลงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนได้ง่ายขึ้นแม้แต่อุณหภูมิห้องก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้และในสนามไฟฟ้าสูงมาก ๆ ความหนาของกำแพงพลังงานศักย์ จะแคบเข้าทำให้อิเล็กตรอนบางตัวซึ่งถึงแม้ว่าจะมีพลังงานไม่สูงพอก็อาจจะทะลุผ่านกำแพงออกมาได้ และการที่อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะได้ด้วย วิธีการเช่นนี้เรียกว่าฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission) [67]

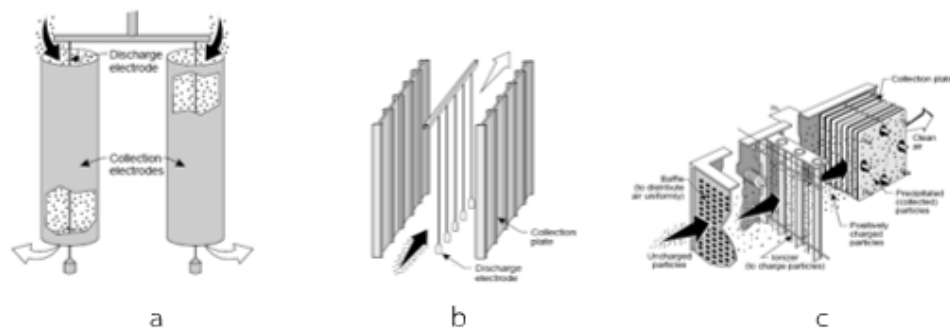
2.16 ประเภทและโครงสร้างของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต

เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรมมีอยู่หลายรูปแบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยจะสามารถแบ่งตามรูปแบบของขั้วการตกตะกอนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบทรงกระบอก ดังภาพประกอบ 10(a) และแบบเส้นลวด-แผ่นเรียบ ดังแสดงใน ภาพประกอบที่ 10(b) แบ่งตามทิศทางการไหลของก๊าซได้ 2 แบบ คือ แบบการไหลของก๊าซในแนวนอน และการไหลของก๊าซในแนวตั้ง และแบ่งตามการใช้น้ำได้ 2 แบบ คือ แบบแห้งและแบบเปียก นอกจากนี้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ยังสามารถแบ่งตามรูปแบบของการใส่ประจุให้อนุภาคฝุ่นได้เป็น 2 แบบ คือ แบบขั้วเดี่ยว ดังแสดงในภาพประกอบ 11(b) และแบบสองชั้น ดังแสดงในภาพประกอบ 11(c) โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้ [68]





ภาพประกอบที่ 10 หลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด – แผ่นเรียบ (a) การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (b) อิเล็กตรอนเกิดขึ้นอย่างทวีคูณ (c) การเคลื่อนที่ของอนุภาคไปเกาะติดที่ขั้วเก็บประจุ [68]

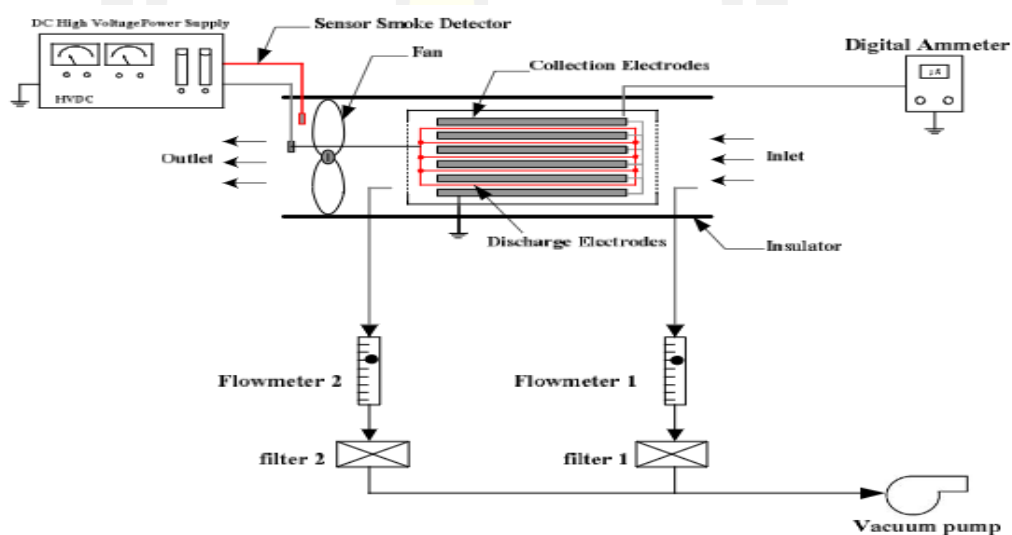


ภาพประกอบที่ 11 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [68]

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎีหลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ใช้วิเคราะห์การกำจัดฝุ่นละอองด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งอธิบาย หลักการทำงานได้ดังนี้ งานวิจัยของ วิสูตร อาสนวิจิตรและ กรพจน์มะโนใจ วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (2017) ได้การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับแบบวงปิดสำหรับเตาเผาขยะไร้ควัน สำนักงานโดยใช้หลักการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาด

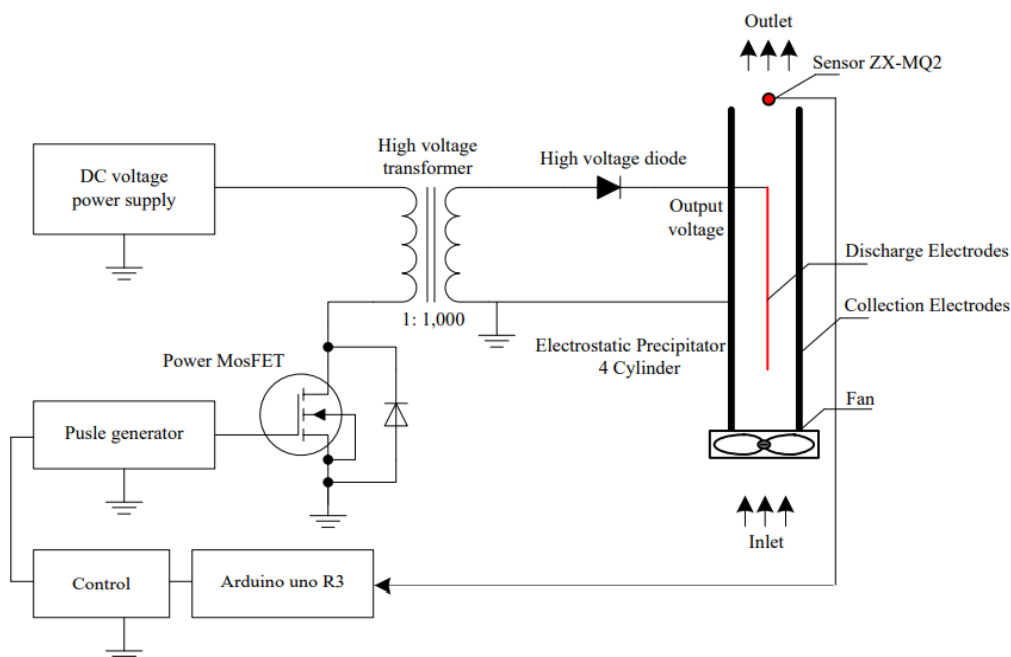
10kV โดยเลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับควันรุ่น ZX-MQ2 ทำหน้าที่วัดปริมาณควันที่ขาออกของตัวตักตะกอนและส่งค่าปริมาณควันที่วัดได้ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ArduinoR3 ประมวลผลเพื่อไปสั่งปรับสวิตช์ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้เหมาะสมกับปริมาณของควันขาออก ซึ่งทำการทดลองกับตัวตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นเพลตขนานจำนวน 6 คู่ ที่มีขนาดมิติ (กว้าง×ยาว×สูง) $19 \times 20 \times 32$ เซนติเมตร และมีลวดเป็นขั้วอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.38 มิลลิเมตร ผลการทดลองวัดค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับแผ่นตักตะกอนขนาด 2.0 เซนติเมตร กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 -24 กิโลโวลต์ พบว่า ค่ากระแสโคโรนาดีสชาร์จที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.026 -0.332 มิลลิแอมป์ และได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการตักตะกอนอนุภาคควันจากรูปเบื้องต้นพบว่าเครื่องต้นแบบตรวจจับควันแบบวงปิดทำงานสัมพันธ์กันแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ดี ซึ่งให้ผลเฉลี่ยของอนุภาคควันลดลงได้ร้อยละ 82.2 [69]



ภาพประกอบที่ 12 ไดอะแกรมและอุปกรณ์ทดลองประสิทธิภาพการตักตะกอน [69]

งานวิจัยของ วิสูตร อาสนวิจิตร และพานิช อินต๊ะ (2019) เป็นการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารในครัวเรือน ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยตัวตักตะกอนแบบหลายท่อและแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงขนาด 25 กิโลโวลต์ และระบบควบคุมแบบวงปิดการศึกษานี้ได้ประเมินและเปรียบเทียบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันและประสิทธิภาพการตักตะกอนทั้งการคำนวณและการทดลองตัวตักตะกอน 2 แบบ คือท่อทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมแบบลวดเส้นตรงและแบบลวดตาข่าย จากผลทดลองคุณลักษณะของกระแสและแรงดันพบว่าสำหรับประสิทธิภาพของการตักตะกอนพบว่าแบบเส้นลวดตรงและแบบลวดตาข่ายเท่ากับ 92.7% และ 67.8% ตามลำดับ และผลทดลองหา

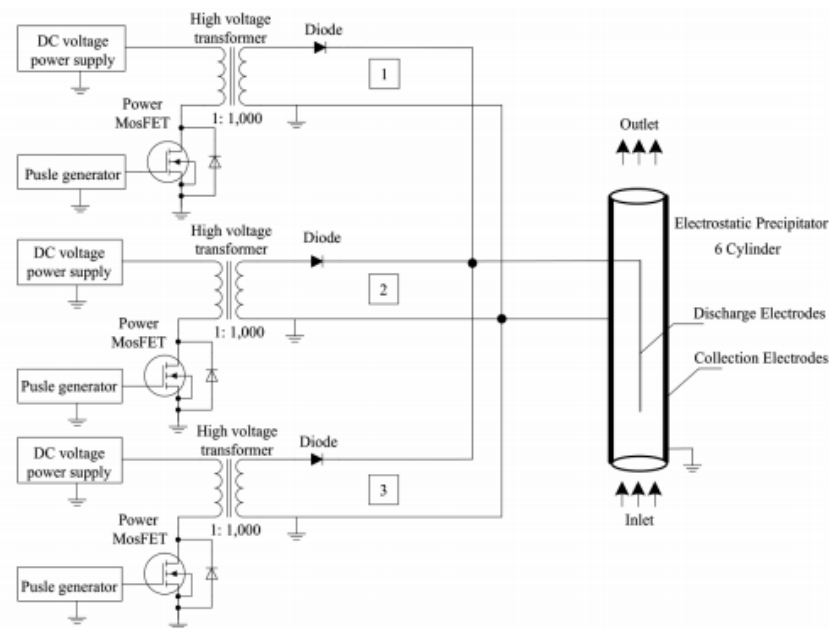
ค่าประสิทธิภาพด้วยการสู่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันพบว่า ตัวตกตะกอนแบบลวดเส้นตรงมีประสิทธิภาพ 84.3% และแบบลวดตาข่าย 53.0% สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 2.5 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิควัน 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และความเร็วของควัน 10 ลิตรต่อนาที มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 13 [70]



ภาพประกอบที่ 13 ไดอะแกรมแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [70]

วิจัยของพานิช อินต๊ะและณัฐภูมิ ดุษฎี (2019) การวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ และอุณหภูมิ ต่อการอัดประจุไฟฟ้าของอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม (ESP) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้า ค่าเฉลี่ยจำนวนอัดประจุของอนุภาค และประสิทธิภาพการตกตะกอน โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเพื่อทำนายผลของค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 46.9 อุณหภูมิในการทำงานระหว่าง 250 ถึง 750 องศาเซลเซียส อนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร แรงดันโคโรนา 20 กิโลโวลต์ ความเร็วของแก๊ส 3.4 เมตรต่อวินาที และความชื้นในการทดลอง 10% จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนของอนุภาคโดยรวม 95% ซึ่งผลที่ได้สามารถนำมาใช้สำหรับการออกแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการลดอนุภาคภายในแก๊สจากระบบการเผาไหม้ชีวมวลขนาดเล็กต่อไปได้ [71]

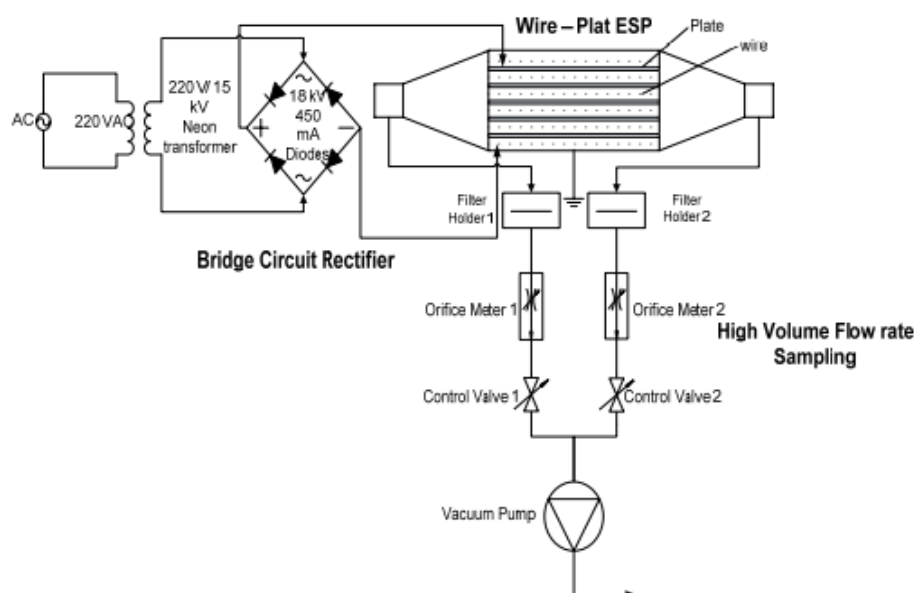
งานวิจัยของ วิสูตร อาสนวิจิต ฐิติวัฒน์ ปันผาง และพานิช อินต๊ะ (2018) ได้นำเสนอการออกแบบและประเมินทดลองตัวตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อสำหรับดักฝุ่นละอองขนาดเล็กจากโรงบ่มใบยาสูบ ตัวตกตะกอนที่ออกแบบประกอบด้วยอาเรย์อย่างง่ายของท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วมกับอิเล็กโทรด ดิสชาร์จจำนวน 6 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 613.6 มิลลิเมตร และใช้เส้นลวดกลมเป็นอิเล็กโทรดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มิลลิเมตร มีลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นฉนวนกั้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร สูง 88.9 มิลลิเมตร ในการศึกษานี้ได้ทดลองกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 30 กิโลโวลต์ จ่ายไฟฟ้า ให้กับขั้วอิเล็กโทรดขนาด 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ ขณะที่ท่อทรงกระบอกเป็นกราวด์ ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแสและแรงดัน ไฟฟ้าร่วมกับตัวเก็บรวบรวมอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต พบว่าค่ากระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 26 ถึง 332 ไมโครแอมป์ ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบที่มีจลศาสตร์เท่ากัน ที่ อัตราการไหลของควัน 10 ลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ สุ่มเก็บตัวอย่างอนุภาคควันที่เวลา 15 นาทีต่อตัวอย่าง พบว่าได้ค่า ประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยรวมเฉลี่ย 75% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวตกตะกอนที่ได้ออกแบบนี้มีแนวโน้มที่ดีสำหรับการ กำจัดฝุ่นควันจากโรงบ่มใบยาสูบ ภาพประกอบที่ 15 [72]



ภาพประกอบที่ 14 ไดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง [72]

งานวิจัยของ ชญาศักดิ์ รัตนโชติ วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ทำการพัฒนาต้นแบบเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตชนิดเส้นลวด-แผ่นเรียบที่เหมาะสมในการดักดเมฆควัน

จากการเผาไหม้พื้น ขนาดของเครื่องได้มีการออกแบบมีขนาด $0.767 \times 1.3 \times 0.645$ เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดขนาด 1.0 มิลลิเมตร ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบและเส้นลวด 4 เงื่อนไขการทดลองโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ จากวงจรเรียงกระแสชนิดบริดจ์ ผลจากการทดลองปรากฏว่า ทุกเงื่อนไขการทดลองประสิทธิภาพการเกาะติดมากที่สุดในช่วงเวลาเริ่มต้นและประสิทธิภาพการเกาะติดลดลงตามปริมาณอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมากขึ้น และพบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบมีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับมาก ในขณะที่ระยะระหว่างแผ่นเรียบและระยะระหว่างเส้นลวดมีค่าต่ำที่สุด 5.0 เซนติเมตร และ 6.4 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพเริ่มต้นสูงสุดเท่ากับ 83% โดยน้ำหนัก แต่จะลดลงตามปริมาณอนุภาคที่เกาะติดบนแผ่นเรียบมากขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ภาพประกอบที่ 16 [73]

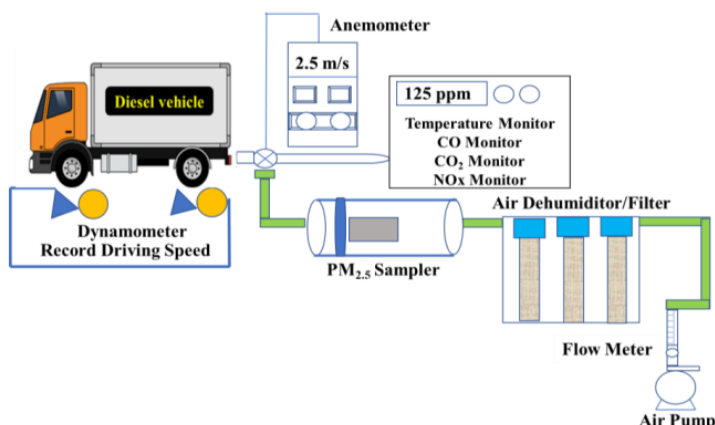


ภาพประกอบที่ 15 ไดอะแกรมชุดการทดลองในการทดลองเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต [73]

งานวิจัยของ สหสิววรรษ ภูจิระ ฉัตรชัย เบญจปิยะพร กฤษฎาภักดิ์ เสนาวงษ์ โชคชัย ชูยอ้อย และสมพร เกษแก้ว การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ใช้น้ำมันยางนาเป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล งานวิจัยนี้ศึกษาไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลทางการเกษตร ที่ใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันยางนา B40 เป็นเชื้อเพลิงการทดลองทำการเปรียบเทียบและประเมินก๊าซไอเสียโดยการเดินเครื่องยนต์ 2 เครื่องที่ใส่ภาระคงที่เท่ากันในสถานที่จริง ต่อเนื่อง 300 ชั่วโมง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,400 รอบต่อนาที พบว่า อุณหภูมิแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน B40 โดยเฉลี่ยสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล 8.3 องศาเซลเซียส การปล่อย ก๊าซ CO CO₂ และ O₂ ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันยางนา B40 มีค่าใกล้เคียงเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ 69 ปล่อยก๊าซ NO และ NO_x ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน

B40 มีค่าเฉลี่ย 189.87 ppm ซึ่งสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล 48.13 ppm (ไม่สูงกว่าค่ามาตรฐาน) เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันยางนาล้อยควันค่าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 2% จากผลการทดลองทั้งหมดบ่งชี้ว่าน้ำมัน B40 สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ ปริมาณก๊าซ O₂ ในกระบวนการเผาไหม้นั้นมี หน้าที่เผาไหม้คาร์บอนในเชื้อเพลิงให้กลายเป็น CO₂ จากผลการทดลอง ปริมาณก๊าซ O₂ จากไอเสีย เครื่องยนต์ B40 มีปริมาณก๊าซ O₂ เฉลี่ยร้อยละ 15.33ใกล้เคียงกับ ปริมาณ O₂ ของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งมีปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 15.39 โดยปริมาตร แสดงว่า เครื่องยนต์ใช้ O₂ ในการสันดาปเท่ากัน แต่จะเกิดการ เผาไหม้น้ำมัน B40 ได้ดีหรือสมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโมเลกุลน้ำมันของ B40 ที่มีความเหมาะสมในการเผาไหม้ได้ดีกว่า [74]

งานวิจัยของ Yuan-Chung Lin¹, Ya-Ching Li, Kassian T.T. Amesho, Feng-Chih Chou, Pei-Cheng Cheng (2019) PM2.5 ที่กรองได้ องค์ประกอบที่เป็นโลหะ และการปล่อยคาร์บอนอินทรีย์จากท่อไอเสียของรถยนต์ดีเซล มลพิษทางอากาศในเมืองในรูปแบบของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ก่อให้เกิดภัยคุกคามต่อสุขภาพอย่างมากต่อมนุษย์ผ่านการสูดดม เพื่อประเมินความเสี่ยงจากมลพิษนี้ เราได้ระบุและวัดปริมาณ PM2.5 ที่ระบายออกโดยรถยนต์ดีเซล 15 คัน ตั้งแต่ จาก 28,306 ถึง 883,374 กม. (เฉลี่ย 525,854 กม.) ในระยะทางรวมและแตกต่างกันไปตามผู้ผลิตและรุ่นปี (1988 – 2005) โดย inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) วิเคราะห์องค์ประกอบโลหะซึ่ง Ca ประกอบด้วยเศษส่วนที่ใหญ่ที่สุด ตามด้วย Zn, Al, K, Fe, Mg และ Cr การวัดค่าปริมาณคาร์บอนเราพบว่าคาร์บอนทั้งหมด (TC) คาร์บอนอินทรีย์ (OC) และ คาร์บอนองค์ประกอบ (EC) คิดเป็น 3461 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, 1410 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร และ 2051 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของความเข้มข้น PM2.5 ตามลำดับ ของธาตุโลหะนั้น Ca แสดงปัจจัยการปล่อยสูงสุด (Emission factor) ระหว่าง 45.3 ถึง 259 µg L/fuel (ด้วยค่าเฉลี่ย 132 µg L/fuel) ในขณะที่ Zn และ Cr แสดงค่าต่ำสุดโดยเฉลี่ย 13.1 µg L/fuel และ 1.91 µg L/fuel ตามลำดับ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและ EF ของธาตุโลหะในไอเสียและ สภาพแวดล้อม องค์ประกอบ PM2.5 ผลลัพธ์เหล่านี้ช่วยแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ PM2.5 ที่ปล่อยออกมาจากรถยนต์ดีเซลสู่อองค์ประกอบที่เป็นโลหะ ความเข้มข้นในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติและความเสี่ยงที่ตามมา [75]



ภาพประกอบที่ 16 แผนผังระบบการทดลอง [75]

ตารางที่ 4 รายละเอียดของรถยนต์ดีเซลที่ทดลองการปล่อย PM_{2.5} และความเข้มข้นของธาตุโลหะใน PM_{2.5} [79]

Number	Manufacturer Brand	Model Year	Items		
			Emission Standard Classification	Displacement (L)	Cumulative Mileage (km)
M1	Hino	1999	Euro 2	12.9	828,440
M2	Hino	1999	Euro 2	6.5	425,117
M3	Hino	2000	Euro 3	7.7	325,357
M4	Fuso	1994	Euro 1	11.1	651,818
M5	CMC Motor	2005	Euro 4	7.5	419,002
M6	CMC Motor	1988	Pre-Euro	3.3	432,211
M7	CMC Motor	2005	Euro 4	2.8	541,318
M8	Isuzu	1988	Pre-Euro	6.5	639,426
M9	Hino	1993	Euro 1	6.5	761,672
M10	Mitsubishi	1992	Pre-Euro	16.0	28,306
M11	Nissan	1994	Euro 1	18.0	492,874
M12	CMC Motor	1996	Euro 2	7.5	883,374
M13	Mitsubishi	1997	Euro 2	12.0	466,443
M14	Isuzu	2000	Euro 3	7.8	711,332
M15	Mitsubishi	1997	Euro 2	12.0	643,118

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของการปล่อย PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($\mu\text{g}/\text{fuel}$). [75]

Parameter	Diesel engine (n = 15)			
	Range	Mean	SD	RSD (%)
Concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)	3875–16,458	7927	3563	44.9
Emission factor ($\mu\text{g L-fuel}^{-1}$)	1169–3881	2006	650	32.4
Fuel consumption (L min^{-1})	0.5–1.3	0.804	0.269	33.5

*SD = standard deviation; RSD = relative standard deviation.

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของคาร์บอนใน PM_{2.5} ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [75]

Component	Diesel engine (n = 15)			
	Range	Mean	SD	RSD (%)
EC	824–5570	2051	1340	65.3
OC	426–2870	1410	885	62.8
TC	1250–8390	3461	2010	58.1

*SD = standard deviation; RSD = relative standard deviation.

บทสรุป

บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงในการดักจับฝุ่นละออง โดยกล่าวถึงแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ ผลกระทบของมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ แนวทางในการป้องกันปัญหามลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กจากรถยนต์ แนวคิดการกำหนดกฎเกณฑ์มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในประเทศไทย เทคนิคการควบคุมและปรับปรุงมลพิษจากเครื่องยนต์ ผลของสนามไฟฟ้าในการตกตะกอนของฝุ่นละออง การสร้างไอออนด้วยแรงดันไฟฟ้าสูง สนามไฟฟ้าและการไหลของกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพการตกตะกอน รูปแบบของขั้วไฟฟ้า การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วไฟฟ้า คุณสมบัติไอออนลบ วงจรทวีคูณแรงดันไฟฟ้า และปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล สามารถนำอุปกรณ์บำบัดควันพิษโดยใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงมาประยุกต์ใช้กับไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลได้เพื่อลดปริมาณ ฝุ่นละออง PM2.5 ซึ่งเป็นเงื่อนไขการทดลองและศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 1-8 kV และทำการวัดค่าฝุ่นละออง PM2.5 ด้วยเครื่องมือวัดฝุ่นละออง AirBeam2 โดยใช้ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่ 990 μg ในการทดลองเพื่อทำข้อสรุปประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นละออง PM2.5 อุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

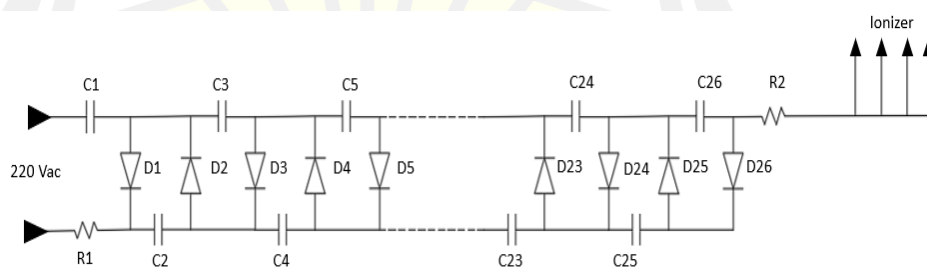
3.1 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เริ่มศึกษาหลักการและทฤษฎีของอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล และวัสดุจะนำมาสร้าง หลังจากนั้นออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล และทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ก่อนที่จะนำไปติดตั้งจริง

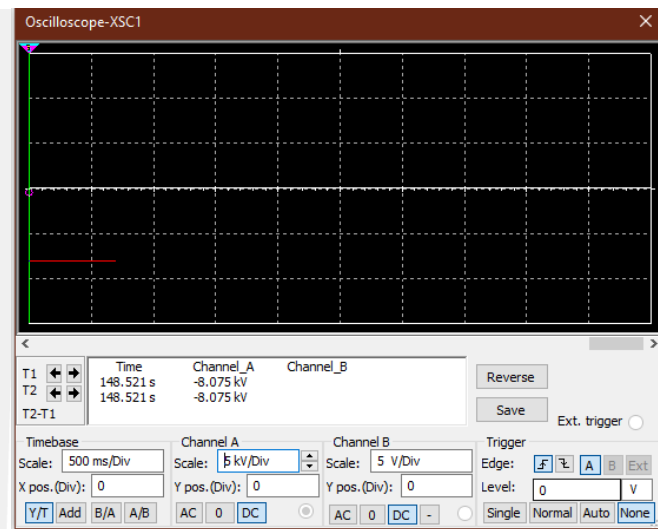
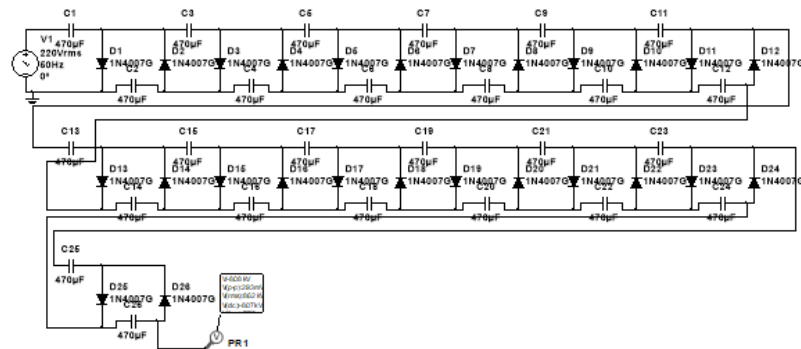
3.2 การออกแบบอุปกรณ์บำบัดไอเสียต้นแบบ

3.2.1 การทำงานของวงจรทวีคูณแรงดัน

สำหรับวงจรไฟฟ้าที่ให้สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดประจุไฟฟ้าลบ ใช้ วงจรทวีคูณแรงดันไฟฟ้า (Voltage multiplier) ในออกแบบวงจรใช้ตัวเก็บประจุและซิลิกอนไดโอดอย่างละ 26 ตัว เรียงขนานกัน โดยใช้แรงดันขาเข้า 220 V มีแรงดันไฟฟ้าออกสูงถึง 8 kV พอดี จากนั้นแรงดันไฟสูงที่ได้จะถูกจำกัดกระแสออกไปที่เข็มโลหะปลายแหลม ดังภาพประกอบที่ 18



ภาพประกอบที่ 17 ไดอะแกรมแสดงวงจรกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบที่ 18 ผลการจำลองทดลองวงจรทวิคูณแรงดัน โดยใช้โปรแกรม NI Multisim

3.3.2 การออกแบบห้องทดลองในการเก็บฝุ่นละออง

การออกแบบจะออกแบบแบบห้องทดลองในการเก็บฝุ่นละอองมีรูปทรงลูกบาศก์เพื่อง่ายต่อการคำนวณขนาดของฝุ่นละออง PM2.5 ซึ่งความมืดซิดและโปร่งใสเพื่อให้สังเกตการทำงานของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ข้อมูลห้องทดลองในการเก็บฝุ่นละออง

ขนาดของห้องทดลอง	กว้าง	0.5 เมตร
	ยาว	0.5 เมตร
	สูง	0.5 เมตร
ชนิดผนังห้องทดลอง	ด้านหน้า	แผ่นอะคริลิก
	ด้านหลัง	แผ่นอะคริลิก
	ด้านข้าง	แผ่นอะคริลิก
	ด้านล่าง	แผ่นอะคริลิก

3.3. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า

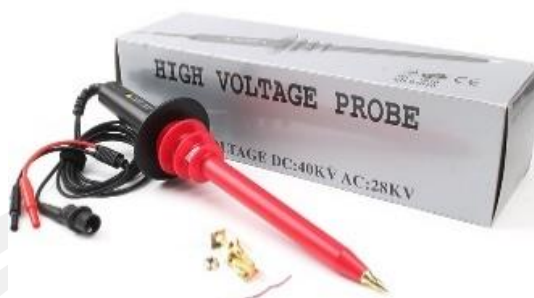
มัลติมิเตอร์ (Multimeter) เกิดจากคำ 2 คำผสมกัน นั่นคือ Multi ซึ่งแปลว่า หลากหลาย, มากมาย และ Meter หมายถึง เครื่องวัด เมื่อนำทั้งสองคำมารวมกันจึงหมายถึง เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดได้หลายค่า เช่น แรงดัน (Voltage) กระแส (Current) ความต้านทาน (Resistance)



ภาพประกอบที่ 19 มัลติมิเตอร์ [76]

3.2.2 โพรบวัดแรงดันไฟฟ้า

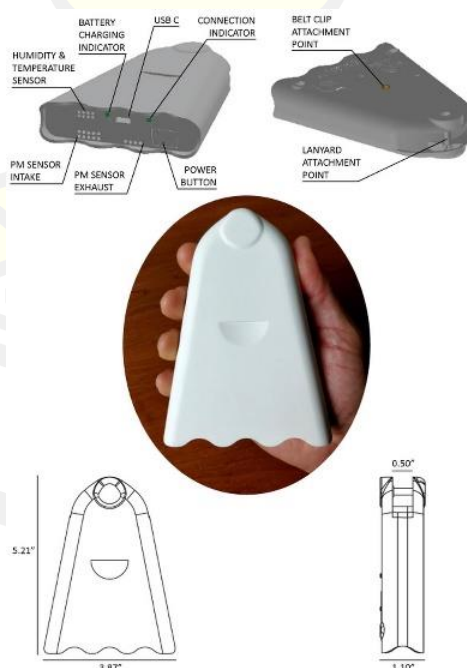
โพรบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจวัดสัญญาณ ถือว่าเป็นอุปกรณ์ส่วนหน้าในการวัดสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ โดยไม่ให้เกิดการรบกวนของสัญญาณขณะใช้งาน แล้วส่งผ่านสัญญาณให้อินพุตทางแนวตั้ง ส่วนประกอบของโพรบมี 2 อย่างคือ สายนำสัญญาณและกราวนด์ ทั้ง 2 อย่างนี้ประกบกันโดยมีการแบ่งเป็นชั้นๆ กราวนด์จะถูกถักเป็นเปียพันรอบสายสัญญาณที่มีฉนวนหุ้มทั้งหมดอีกครั้ง สัญญาณจะผ่านตัวนำที่อยู่ตรงกลางและกราวนด์ที่อยู่รอบนอกจะเป็นตัวป้องกันสัญญาณที่ไม่ต้องการผ่านเข้าไปได้ โพรบมีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน



ภาพประกอบที่ 20 HVP-40 โพรบดิจิตอลมัลติมิเตอร์แรงดันสูง [77]

3.3.3 Air Beam วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

AirBeam2 เครื่องมือวัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM1, PM2.5 & PM10) อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ AirBeam2 ใช้วิธีการกระจายแสงเพื่อวัดอนุภาค อากาศถูกดึงผ่านห้องตรวจจับซึ่งแสงจากเลเซอร์กระจายอนุภาคในกระแสลม การกระจายแสงนี้ได้รับการลงทะเบียนโดยเครื่องตรวจจับและแปลงเป็นการวัดที่ประเมินจำนวนอนุภาคในอากาศ เมื่อบันทึกเซสชันอุปกรณ์เคลื่อนที่การวัดเหล่านี้จะได้รับการสื่อสารทุกๆ วินาทีไปยังแอป Air Casting Android ผ่านบลูทูธ เมื่อบันทึกคงที่ การวัดเหล่านี้จะได้รับการสื่อสารที่ละครั้ง ผ่าน WiFi หรือเซลลูลาร์ ในตอนท้ายของแต่ละเซสชัน Air Casting มือถือ ข้อมูลที่รวบรวมจะถูกส่งไปยังเว็บไซต์ Air Casting ซึ่งข้อมูลจะถูกรวบรวมด้วยข้อมูลจาก Air Casters อื่น ๆ เพื่อสร้างแผนที่ความร้อนที่ระบุว่าความเข้มข้นของ PM สูงที่สุดและต่ำที่สุด ซึ่งลักษณะของ AirBeam2 แสดงดังภาพประกอบที่ 22



ภาพประกอบที่ 21 Air Beam วัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ [78]

3.4 ผลการทดลองอุปกรณ์ต้นแบบ

โดยในการทดลองอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบนั้น จะ นำอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบเข้าไปไว้ในห้องทดลอง ทำการเพิ่มปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ให้มีฝุ่นละออง PM2.5 มีค่าประมาณ 990 μg ภายในห้องทดลองขนาด 0.125 m^3 ทำการปรับเปลี่ยนแรงดันระหว่าง 1–8 kV เพื่อทำการทดลอง ประสิทธิภาพการลดประมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ที่แขวนลอยในอากาศภายในห้องทดลอง โดยแต่ละช่วงแรงดัน 1 - 8 kV ทำการเก็บผลทดลอง ระยะเวลาในแต่ละช่วงแรงดันเป็นเวลา 3 ชั่วโมงทุกช่วงแรงดันและทำการบันทึกผลที่ทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่น PM2.5

3.5 การเปรียบเทียบและสรุปผล

เปรียบเทียบในการดำเนินการทดลองอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ โดยจะนำปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในปริมาณ 990 μg มาทำการทดลองในระหว่างแรงดันไฟฟ้า 1–8 kV และนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีสมรรถนะในการลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 มาเป็นตัวแปรในการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มาเปรียบเทียบในแต่ละการทดลอง

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

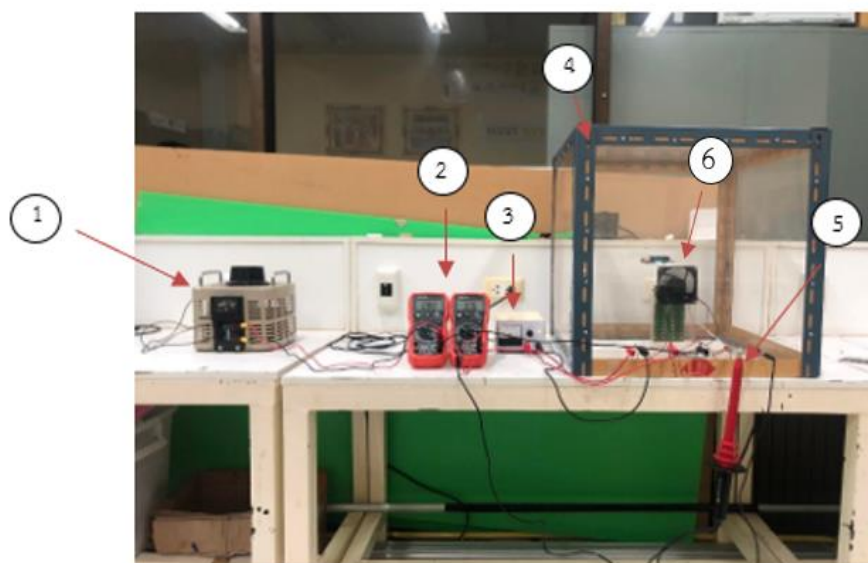
เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 1–8 kV อุณหภูมิ จึงทำการเปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลการทดลองจากนั้นสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในการวิเคราะห์ผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประเมินการค่าการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากใช้วงจรทวิคูณแรงดันร่วมด้วย ตามหลักทฤษฎี รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบสร้างแรงดันสูงผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของระบบการทำงานของวงจรทวิคูณแรงดันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่ได้กำหนดไว้ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ดังนั้นแล้ว สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงผลการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการออกแบบแล้วนั้น เพื่อให้ได้งานออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดลองฝุ่นละออง PM2.5



ภาพประกอบที่ 22 โครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดลองฝุ่นละออง PM2.5

จากภาพประกอบที่ 23 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ประกอบด้วย

1. หม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้า VARIAC 1 เฟส ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าได้อย่างราบรื่น จากค่าศูนย์ ไปจนถึงค่าสูงสุด ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันคงที่ หรือใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ และนิยมใช้ในห้องทดลองทางไฟฟ้า

2. มัลติมิเตอร์ เพื่อใช้แรงดันไฟฟ้า เครื่องที่ 1 จะตั้งย่านแรงดันขาเข้า 700 Vac เครื่องที่ 2 จะตั้งย่านแรงดันขาเข้า 20 Vdc

3. สวิตซ์ พาวเวอร์ซัพพลาย เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายไฟให้กับพัดลมที่ใช้สำหรับช่วยกระจายประจุไฟฟ้าในห้องทดลอง ขนาด 12 โวลต์

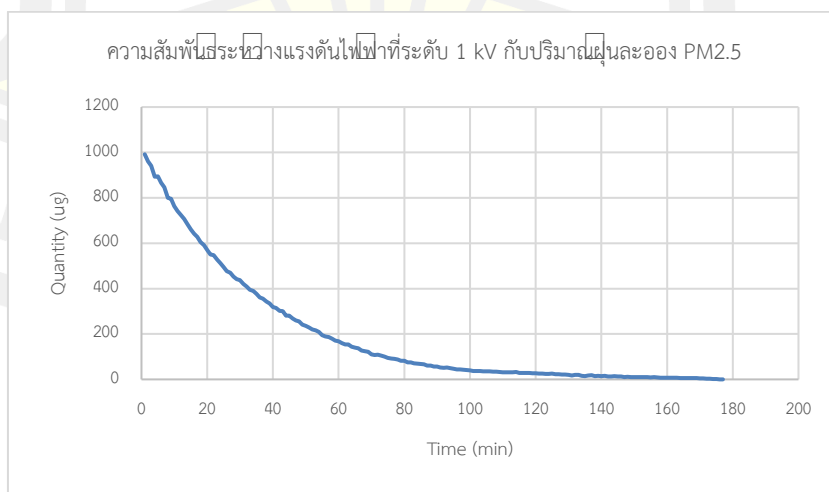
4. ห้องทดลองระบบ ซึ่งห้องทดลองมีขนาด กว้าง 0.5 เมตร ยาว 0.5 เมตร สูง 0.5 เมตร จะใช้ผนังทั้งหมดเป็นแผ่นอะคริลิคความหนา 5 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กฉากเป็นโครงสร้าง

5. โพรบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงสุดได้ 40000 Vp อัตราส่วนการลดทอน 1000:1

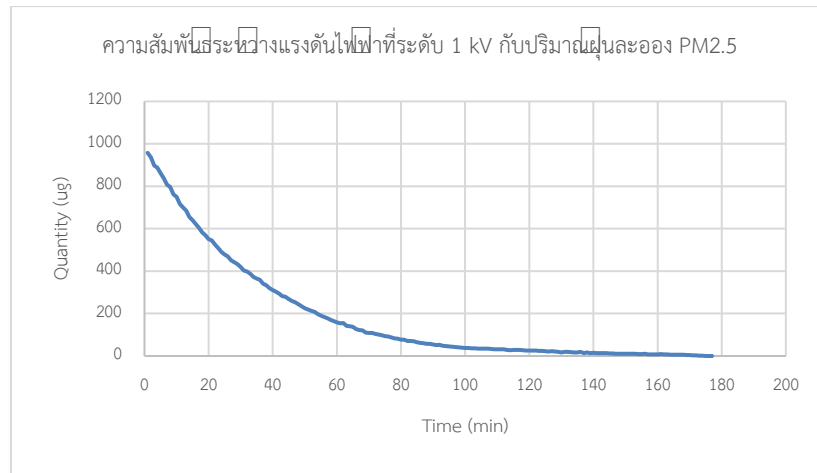
6. วงจรทริคูลนแรงดัน แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ 220 Vac จะผ่าน ตัวต้านทานไปยังตัวเก็บประจุและไดโอดอย่างละ 26 ตัว โดยตัวเก็บประจุและไดโอดจะต่อเป็นวงจรทริคูลนแรงดัน 26 เท่า

4.2 ทดลองวัดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์บำบัดไอเสีย

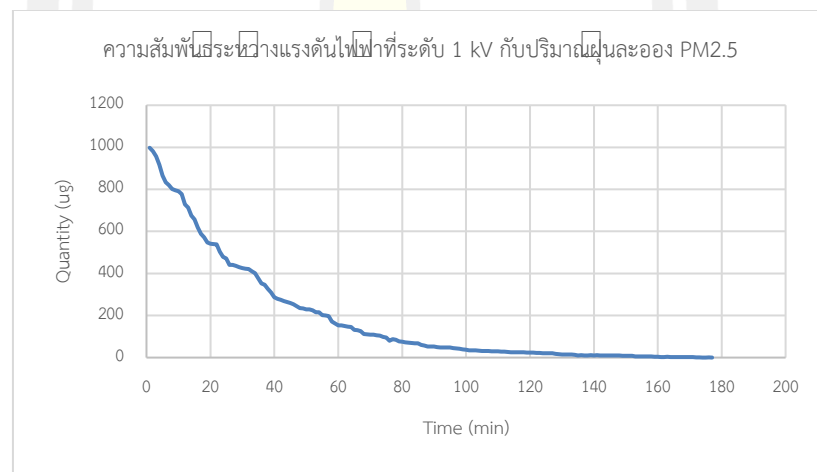
ในการทดลองการบำบัดไอเสียด้วยประจุลบเพื่อให้มีค่าฝุ่นละอองที่ใช้ในการทดลองใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซลมาตรฐาน Euro 1-4 จากการทดลองของ Lin, Y. C. (2020) และคณะ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $7927 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งห้องทดลองที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 0.125 m^3 ดังนั้นปริมาณฝุ่น PM2.5 ที่ใช้ในการทดลองมีค่าประมาณ $990 \mu\text{g}$ ความหนาแน่น $7927 \mu\text{g}/\text{m}^3$ การจำลองฝุ่นละออง PM2.5 คือ คำนวณเนื่องจาก คำนวณทอไอเสียรถยนต์มีสารพิษด้วยเหมือนกัน [42] และนำเครื่องมือวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM2.5 ตรวจวัดในห้องทดลอง ทำการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันไฟฟ้า 1-8 kV และเพิ่มอุณหภูมิในการทดลอง ทำการบันทึกผลที่ทำการตรวจวัดได้ ทดลองปรับเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 1-8 kV ให้กับชุดอุปกรณ์บำบัดไอเสียเป็นลำดับเพื่อทำการเก็บค่าของปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 24-91



ภาพประกอบที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5

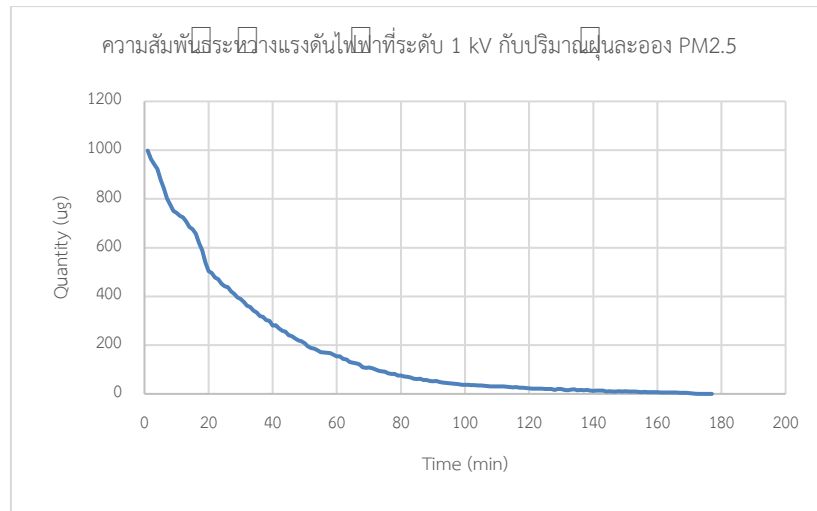


ภาพประกอบที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

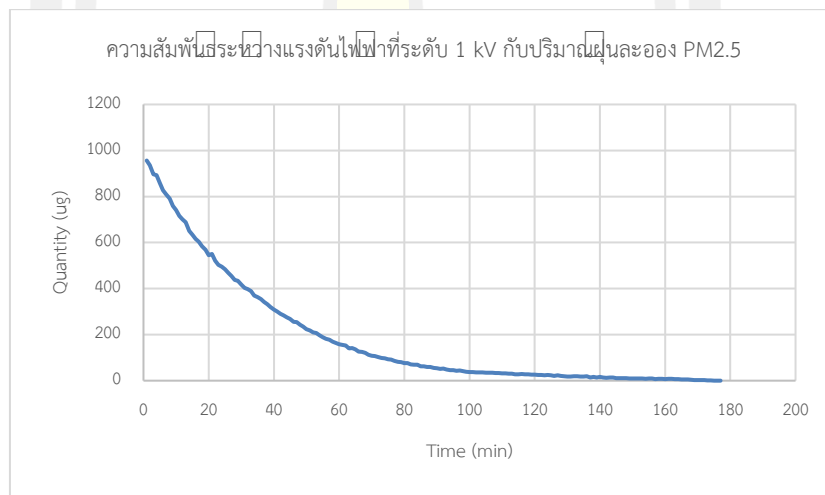


ภาพประกอบที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

พหุบัณฑิต ชีวะ

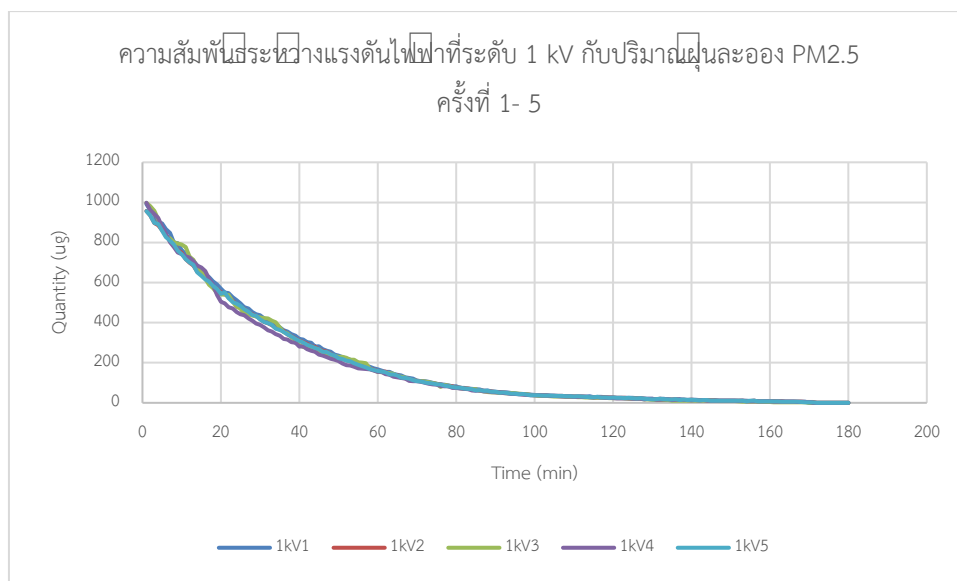


ภาพประกอบที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5

พหุบัณฑิต ชีวะ



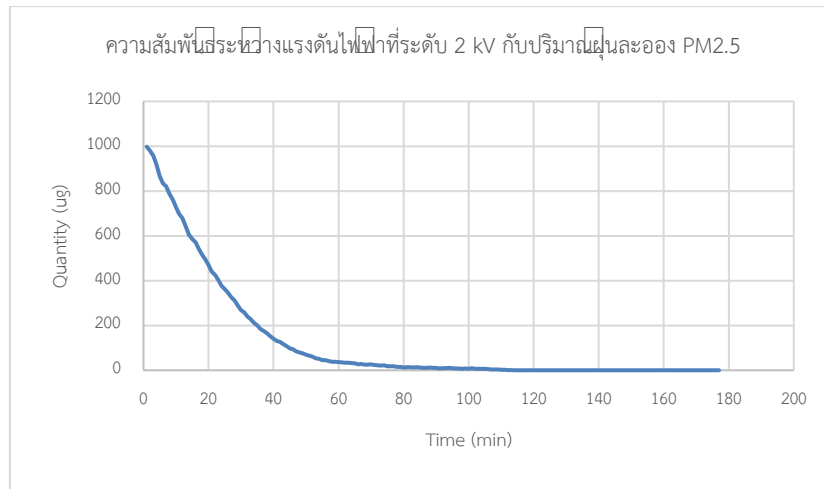
ภาพประกอบที่ 28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 1 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5

จากภาพประกอบที่ 24-29 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 8

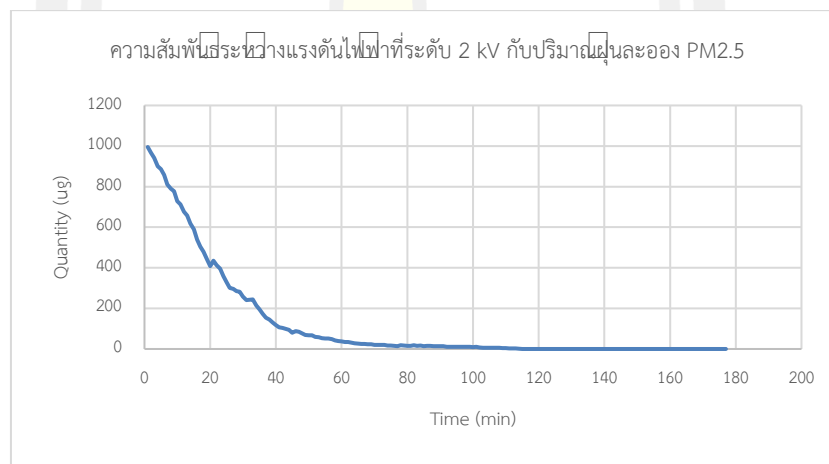
ตารางที่ 8 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1 kV

ครั้งที่	เวลา (min)
1	169
2	171
3	169
4	170
5	171

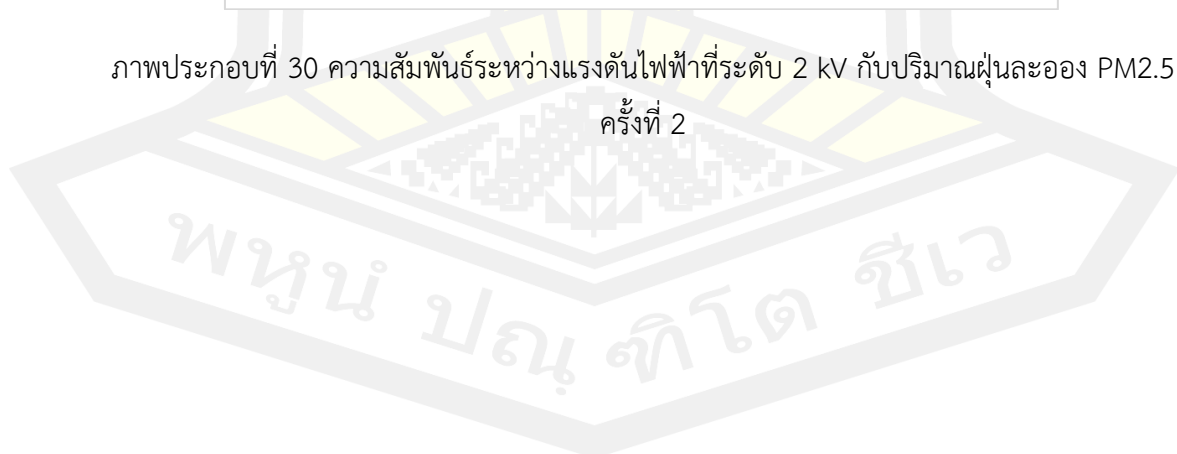
พหุ ประถมศึกษา

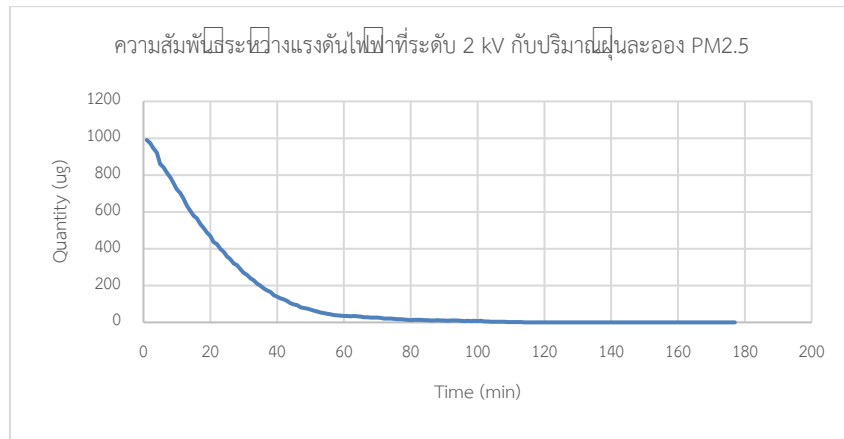


ภาพประกอบที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 1

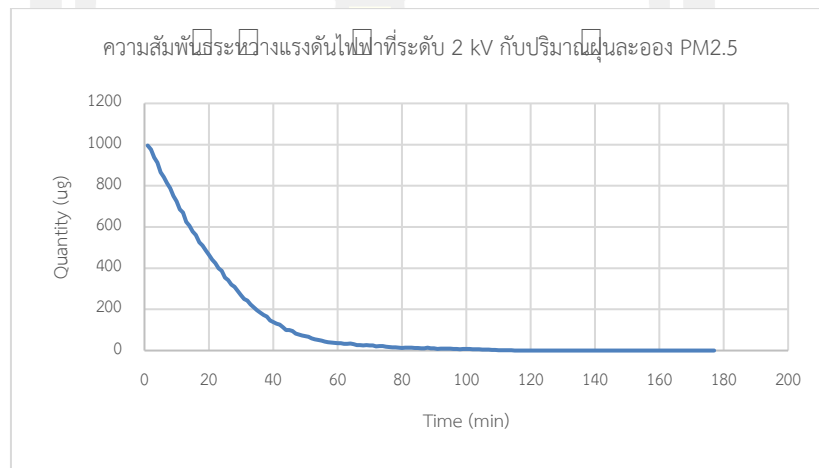


ภาพประกอบที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 2

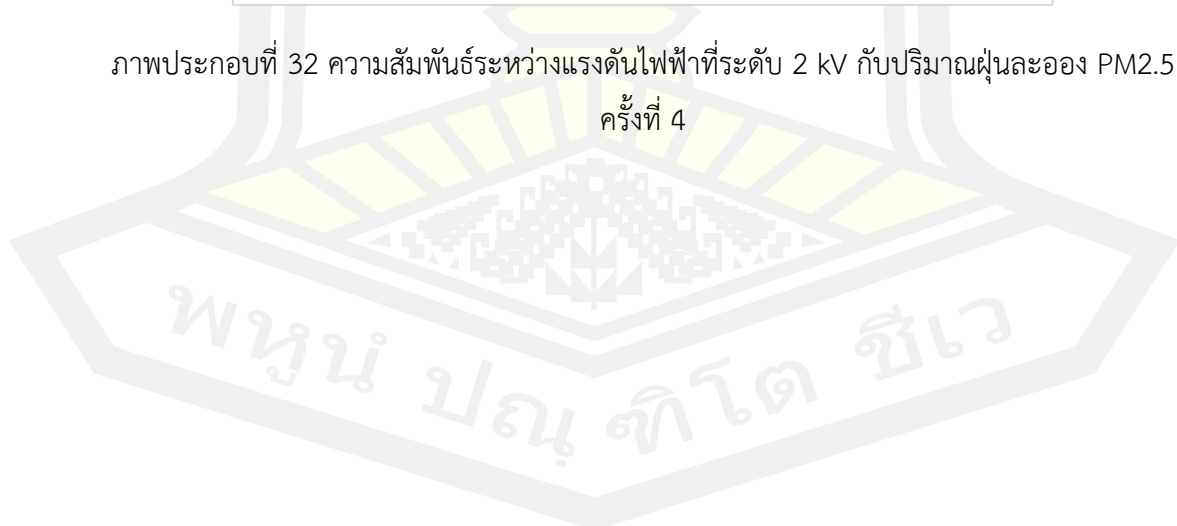


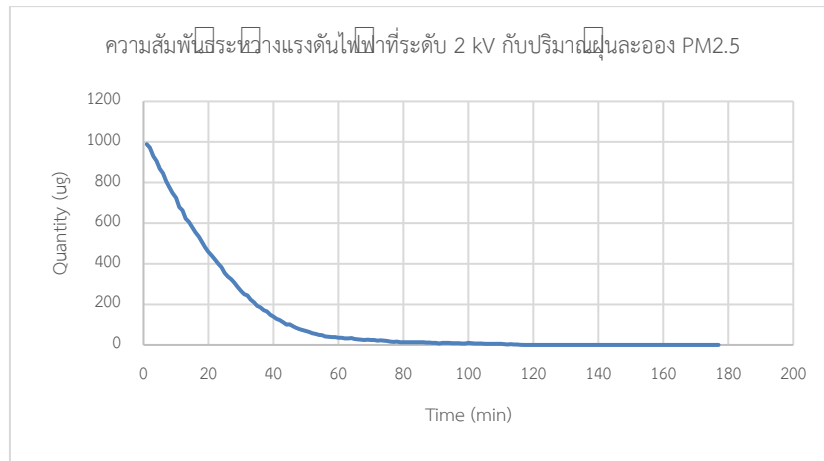


ภาพประกอบที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

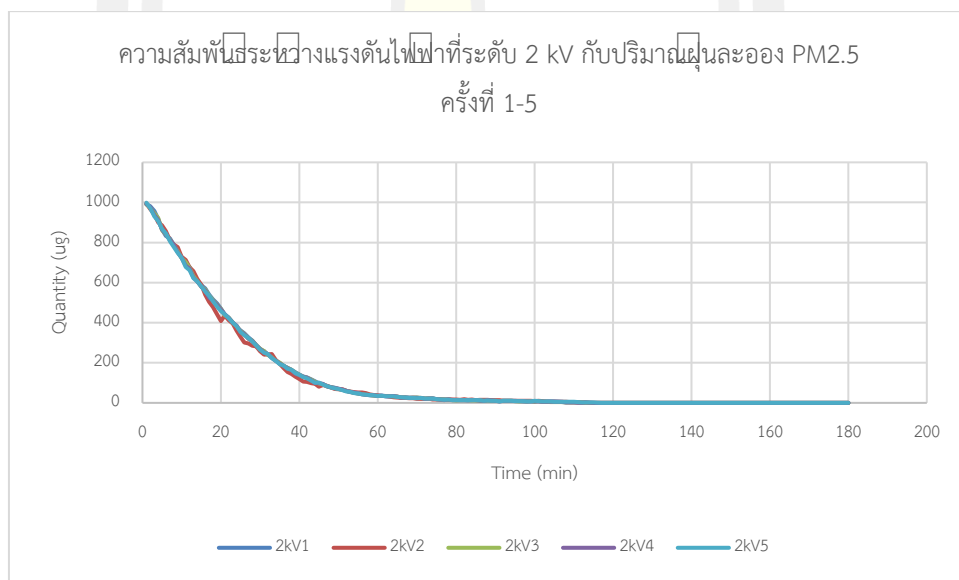


ภาพประกอบที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4





ภาพประกอบที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5



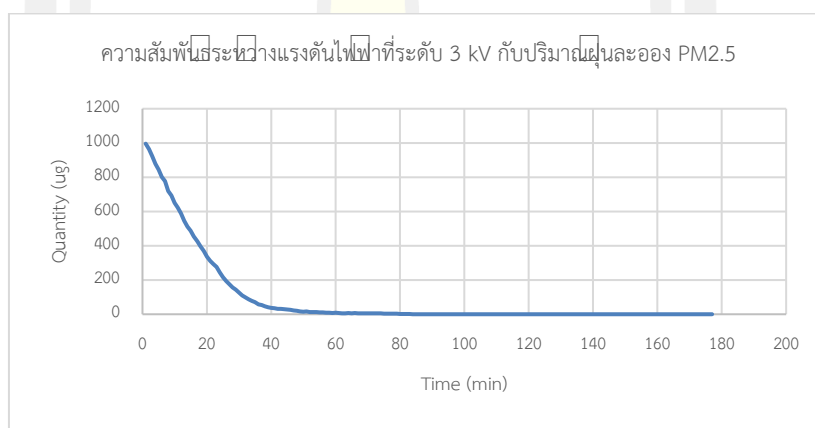
ภาพประกอบที่ 34 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 2 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5

พหุบัณฑิต ชีวะ

จากภาพประกอบที่ 30-35 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที
แสดงในตารางที่ 9

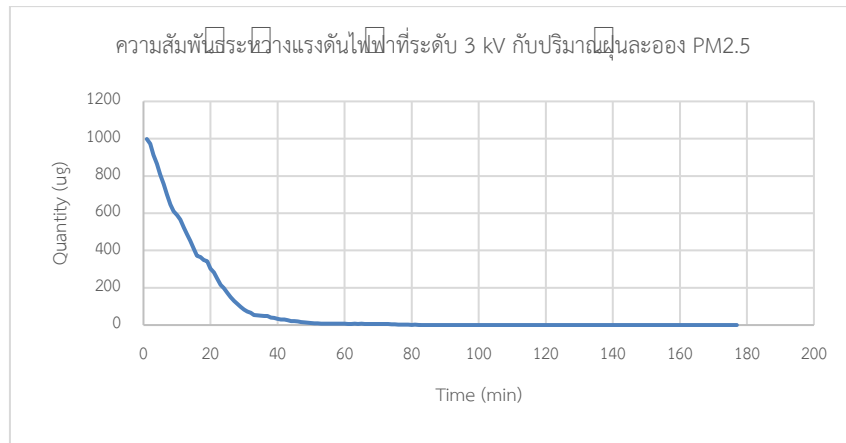
ตารางที่ 9 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 2 kV

ครั้งที่	เวลา (min)
1	114
2	115
3	114
4	115
5	117

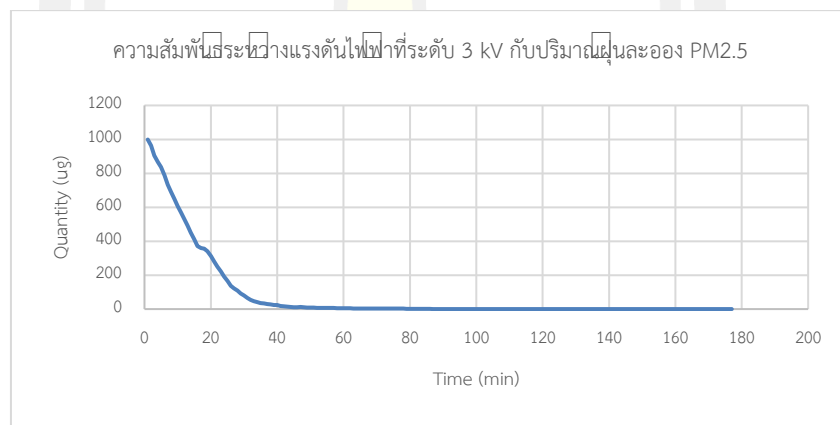


ภาพประกอบที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 1

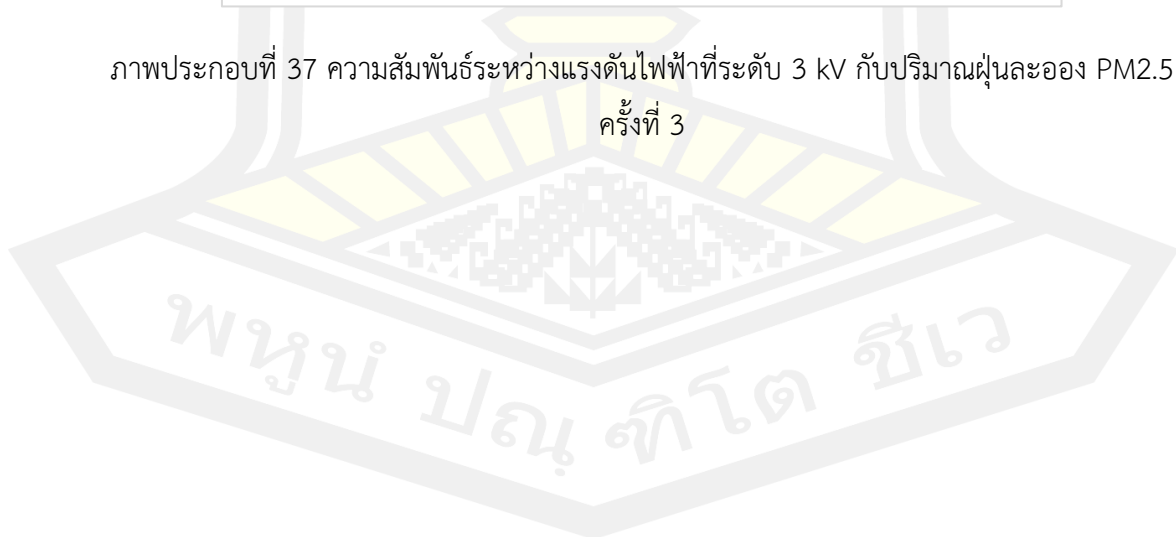
พหุบัณฑิต ชีวะ

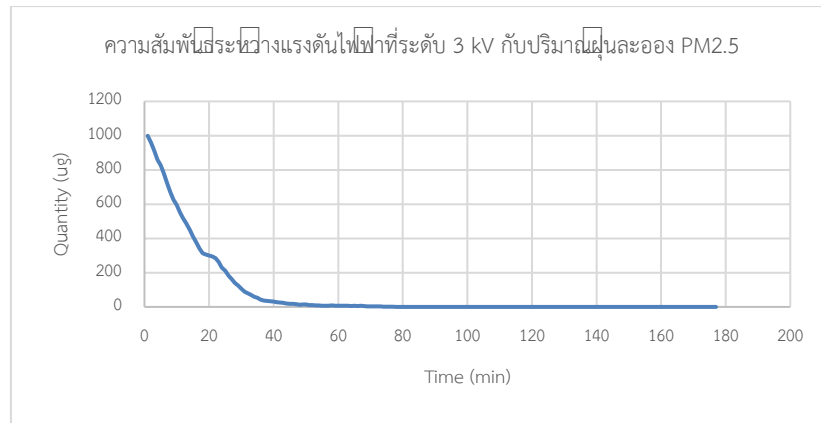


ภาพประกอบที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 2

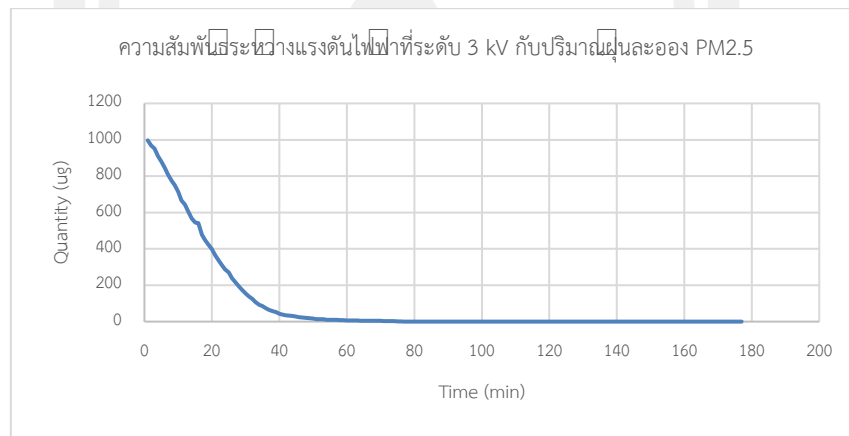


ภาพประกอบที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

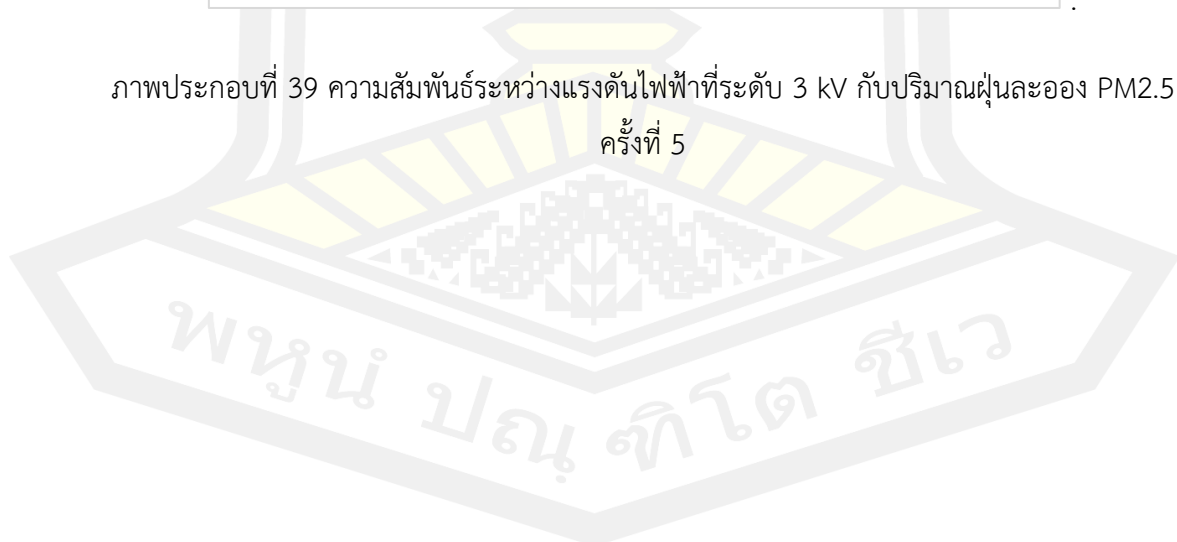


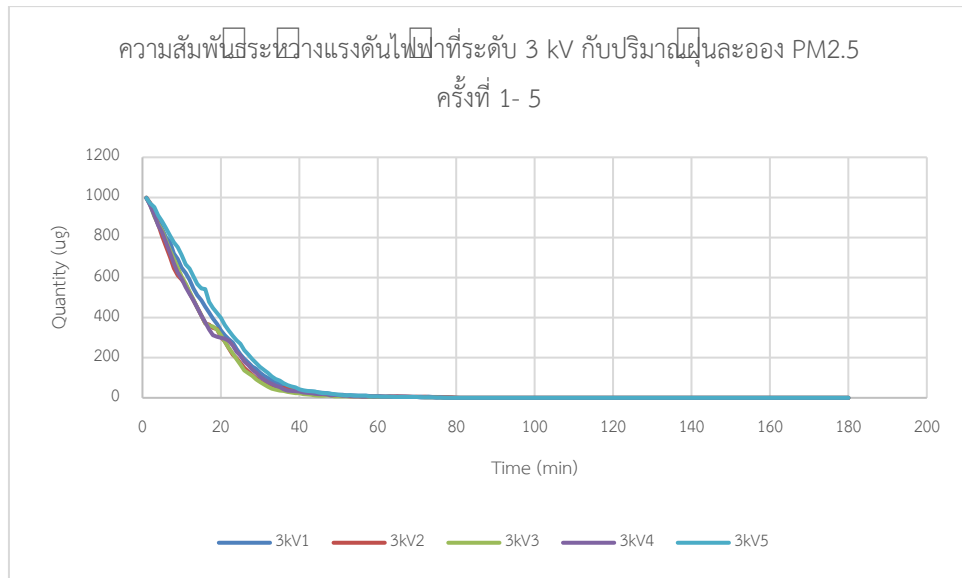


ภาพประกอบที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 5



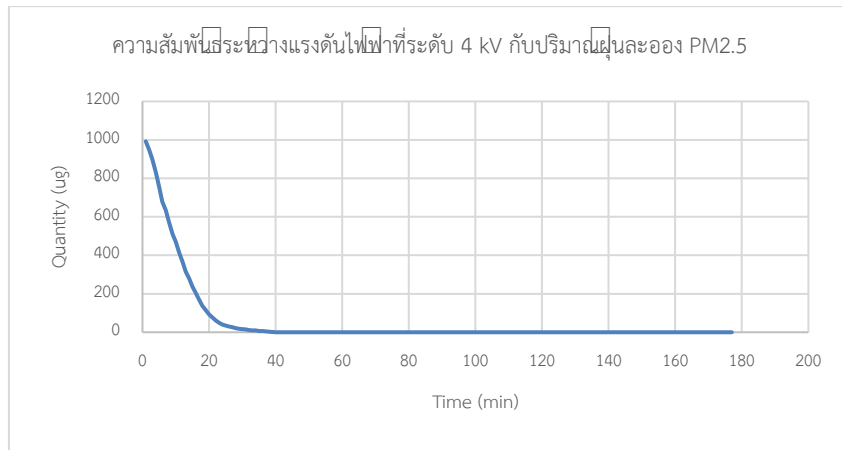


ภาพประกอบที่ 40 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 3 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5

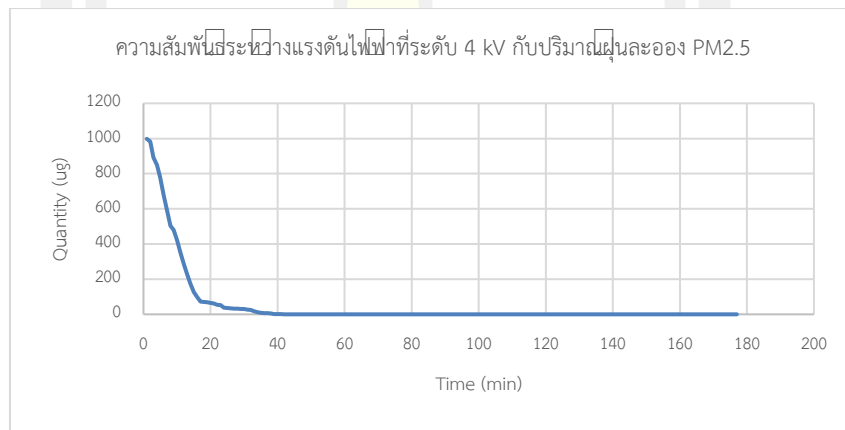
จากภาพประกอบที่ 36-41 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 3 kV

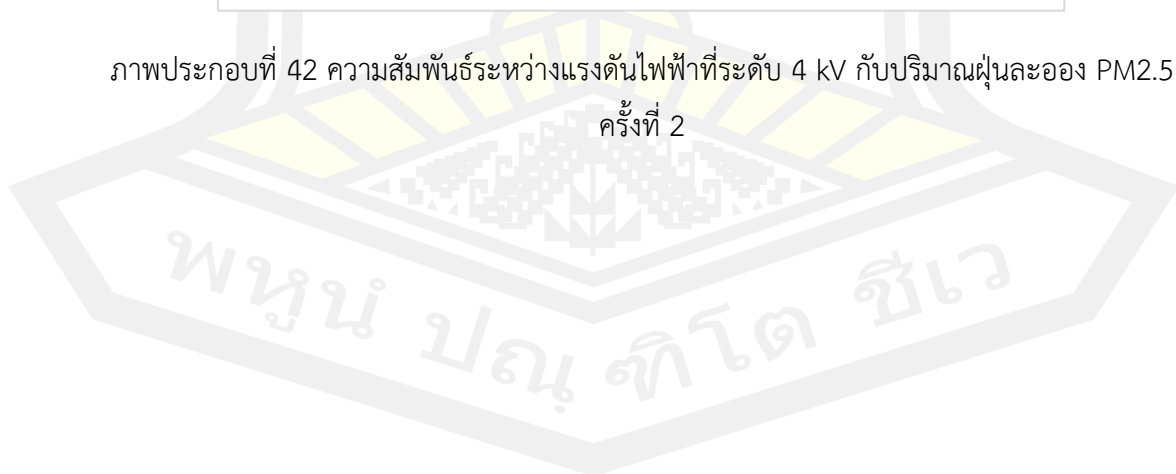
ครั้งที่	เวลา (min)
1	80
2	81
3	78
4	78
5	77

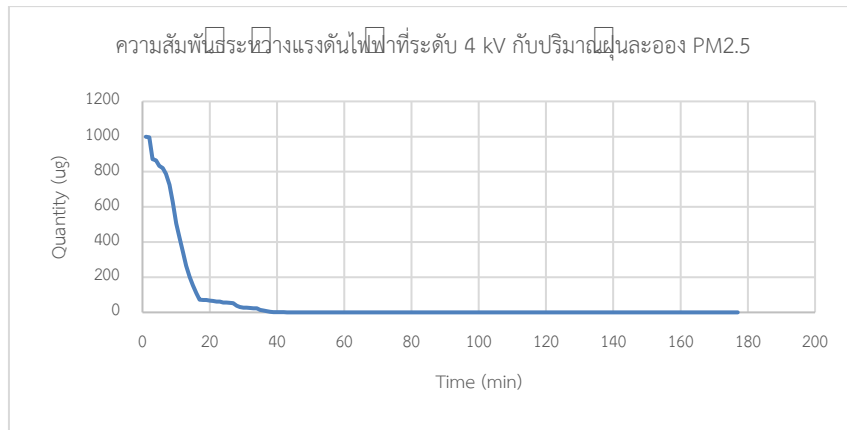


ภาพประกอบที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

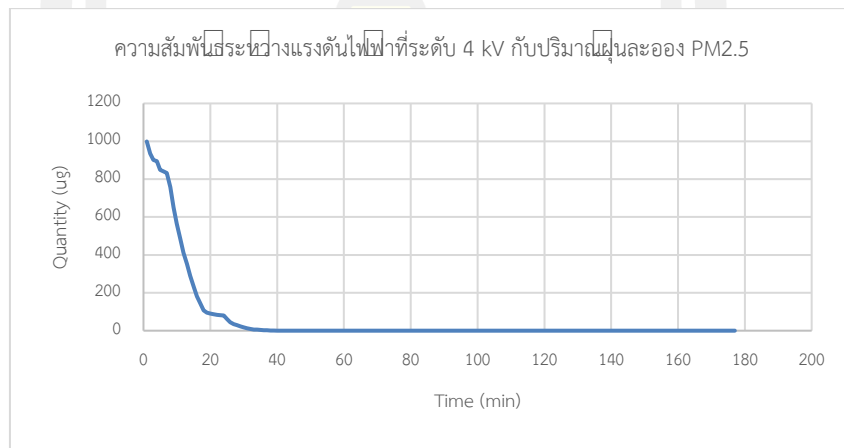


ภาพประกอบที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

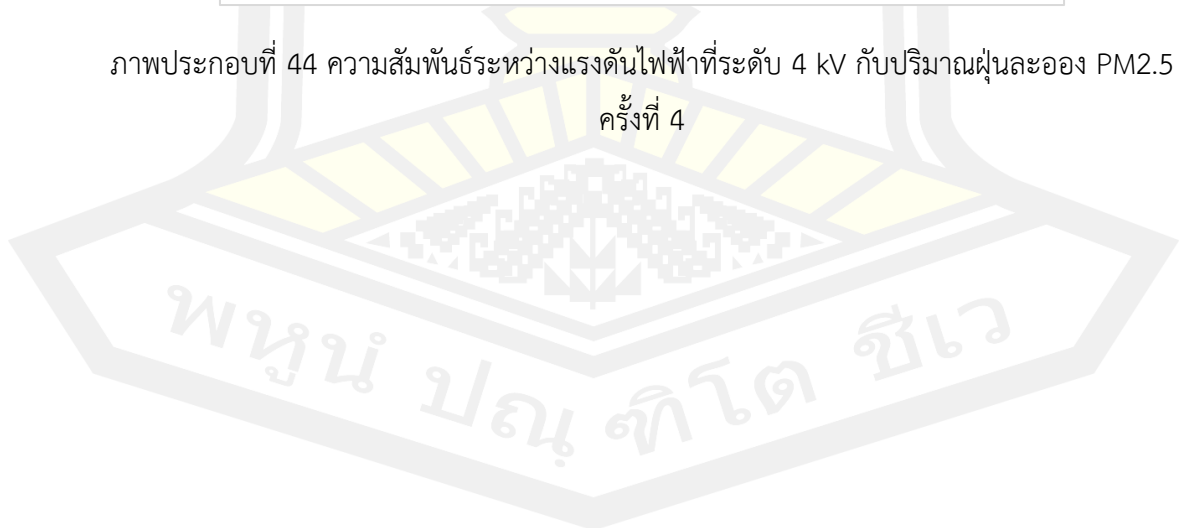


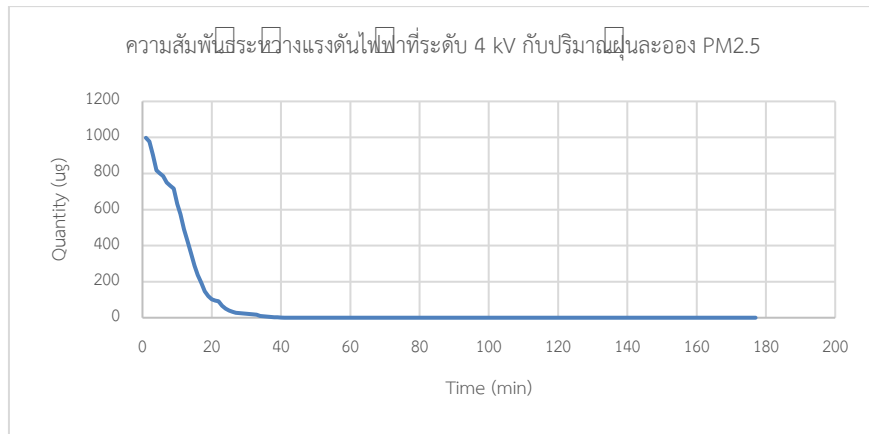


ภาพประกอบที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

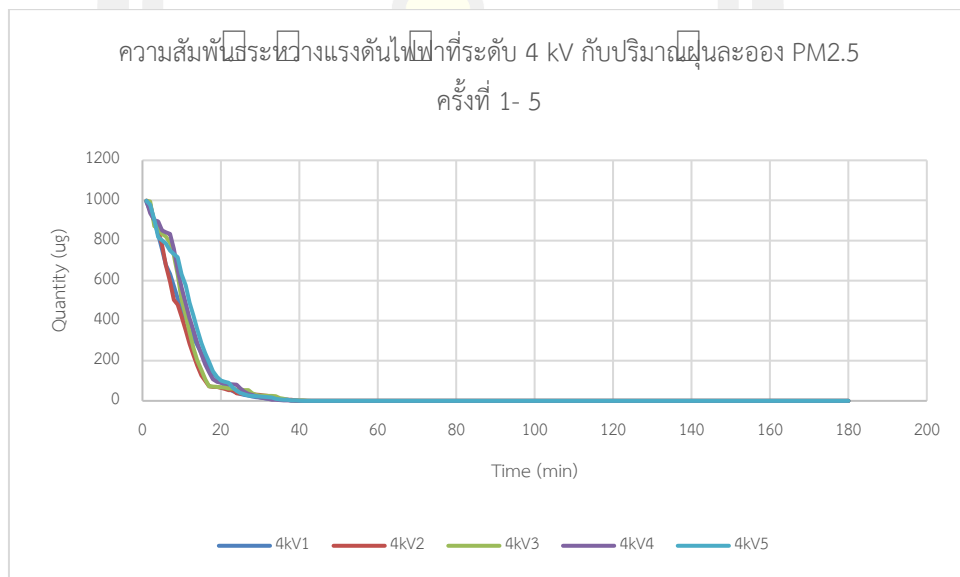


ภาพประกอบที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4





ภาพประกอบที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5



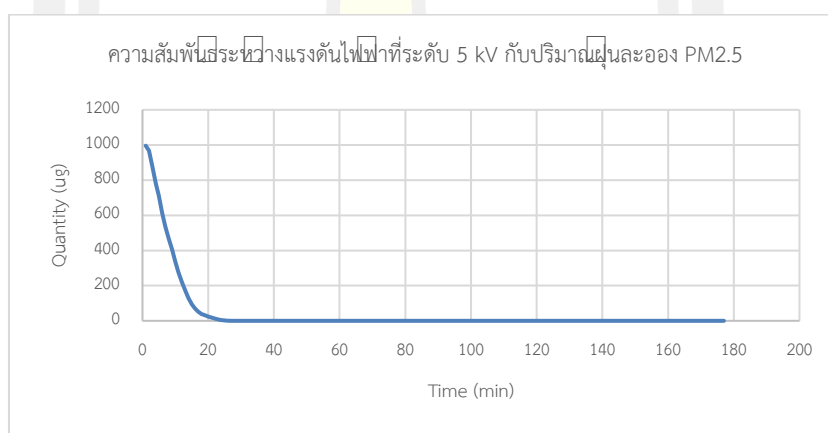
ภาพประกอบที่ 46 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 4 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

พหุบัณฑิต ชีวะ

จากภาพประกอบที่ 42-47 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที แสดงในตารางที่ 11

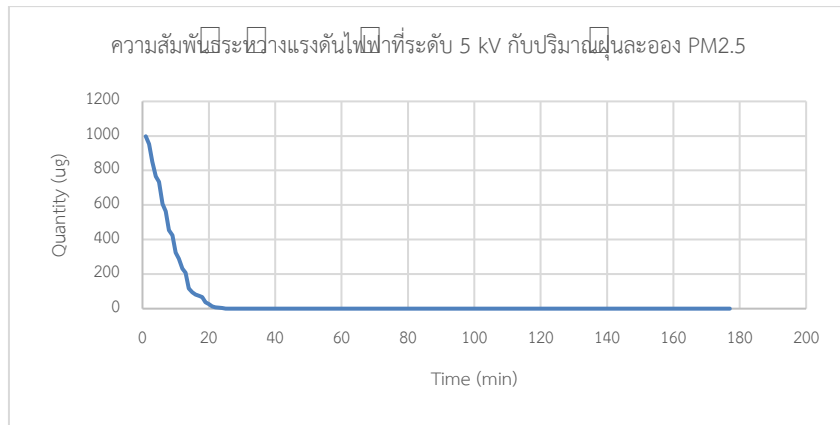
ตารางที่ 11 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 4 kV

ครั้งที่	เวลา (min)
1	40
2	42
3	43
4	40
5	41

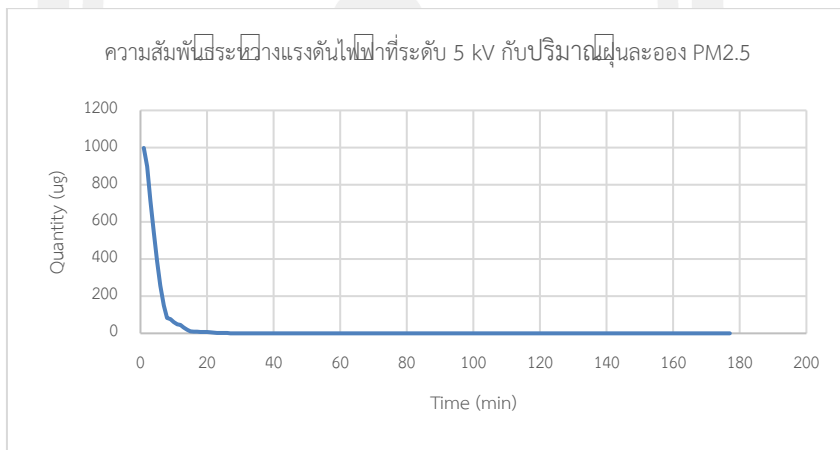


ภาพประกอบที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

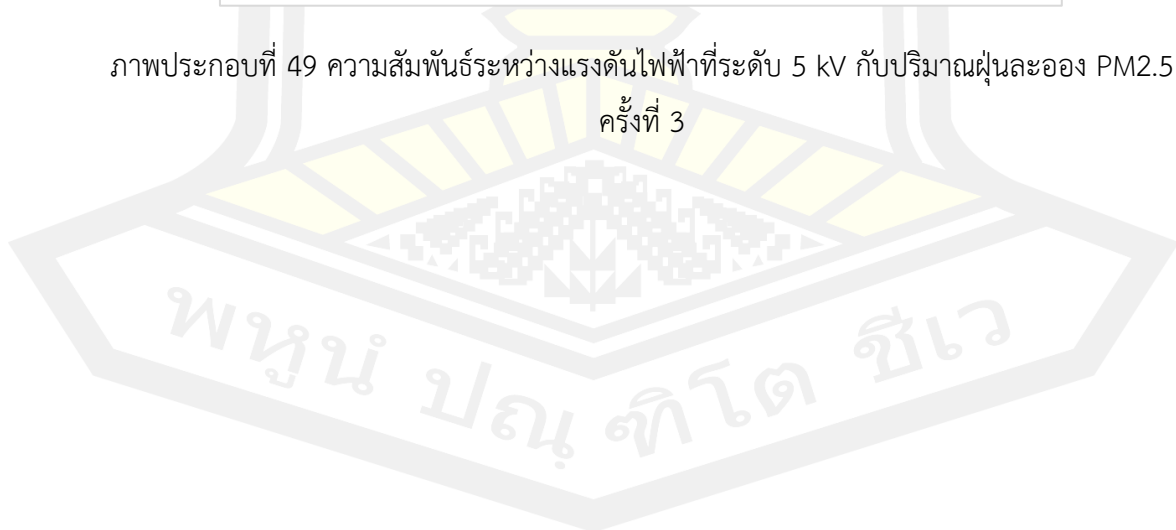
พหุบัณฑิต ชีวะ

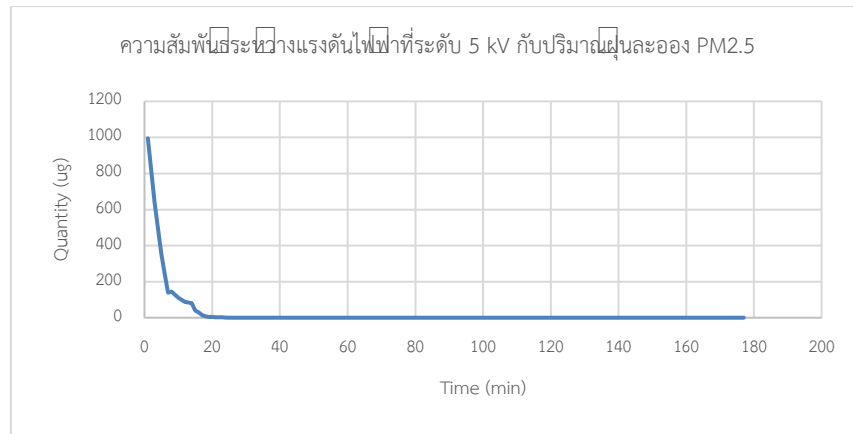


ภาพประกอบที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 2

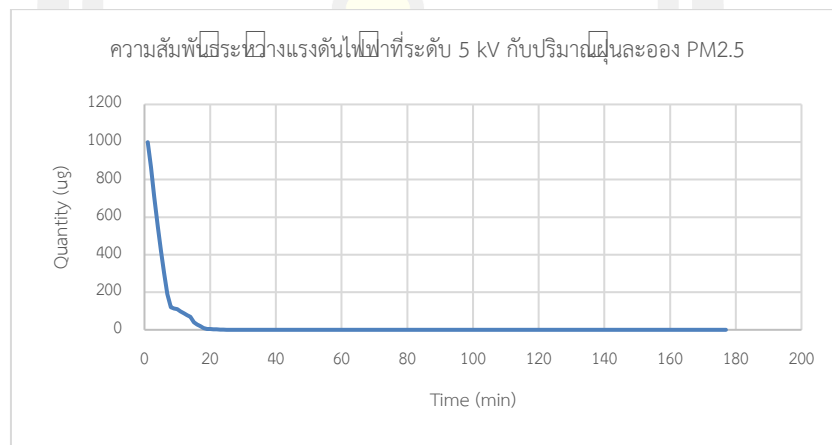


ภาพประกอบที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

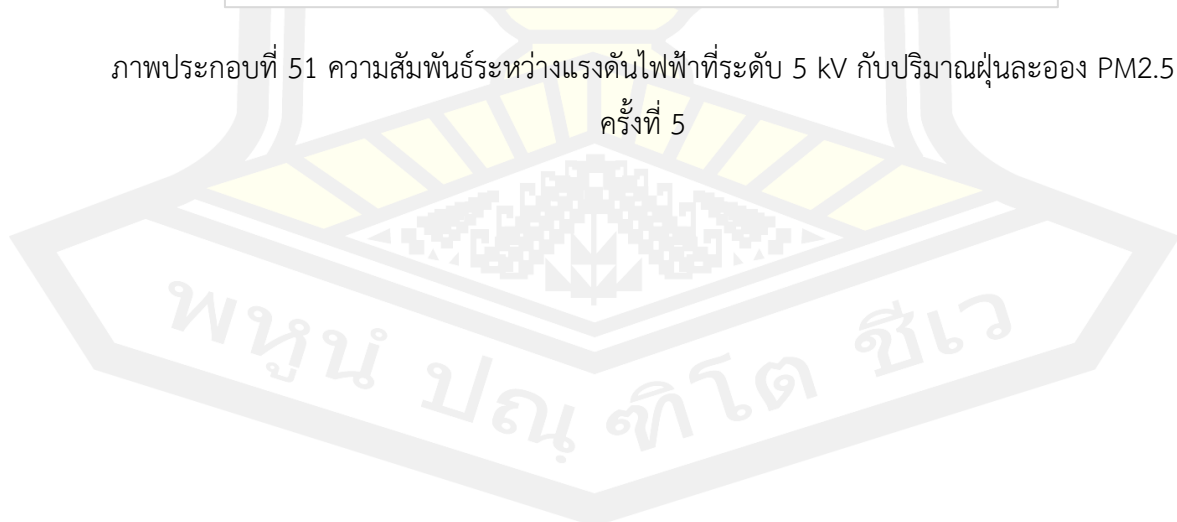


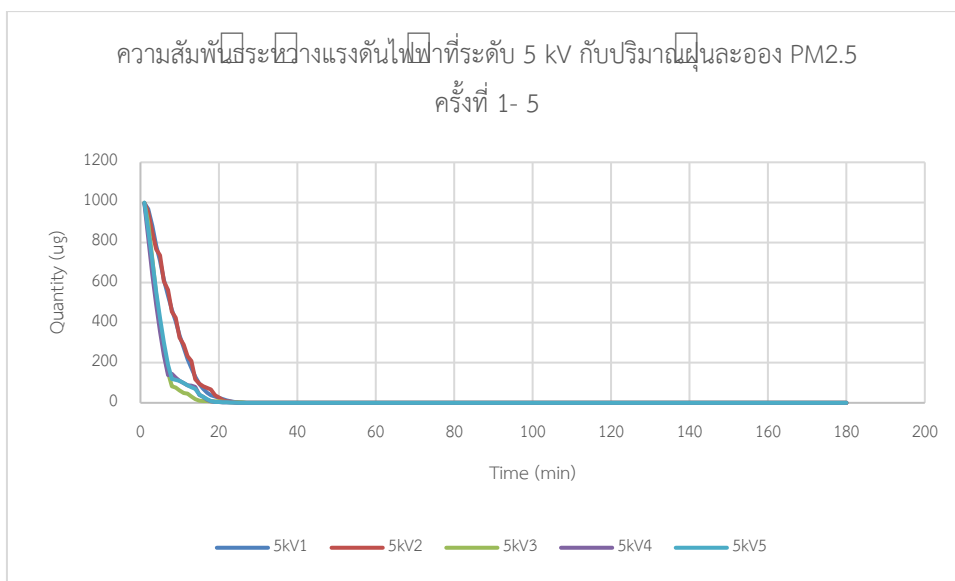


ภาพประกอบที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 5



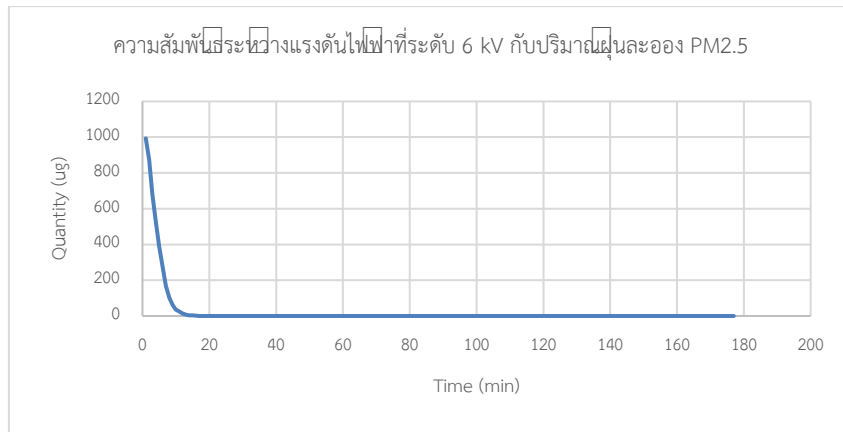


ภาพประกอบที่ 52 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 5 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

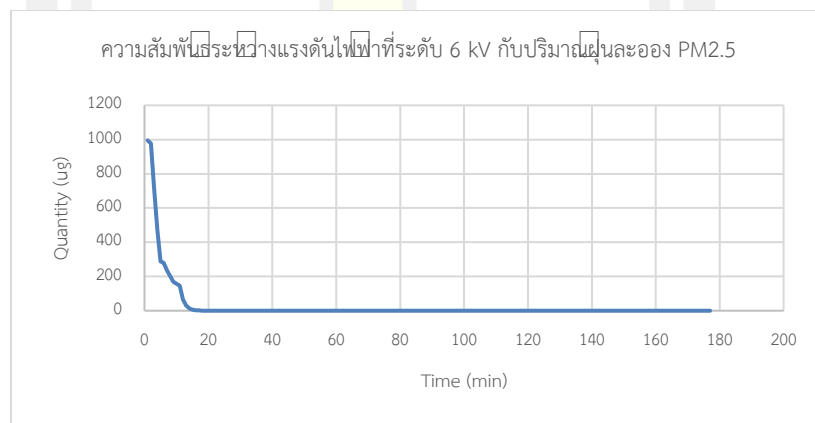
จากภาพประกอบที่ 48-53 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามทีแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 5 kV

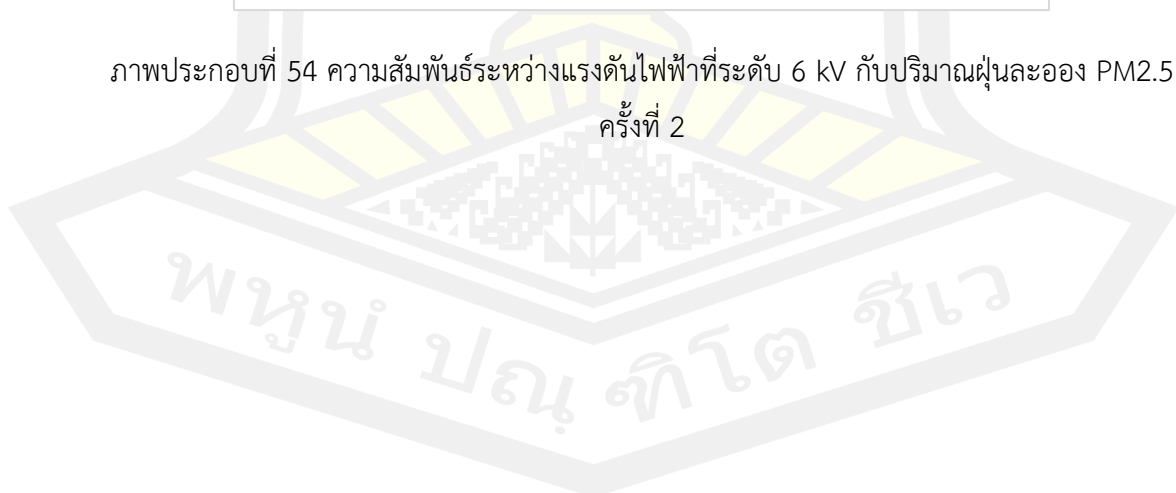
ครั้งที่	เวลา (min)
1	27
2	26
3	27
4	25
5	25

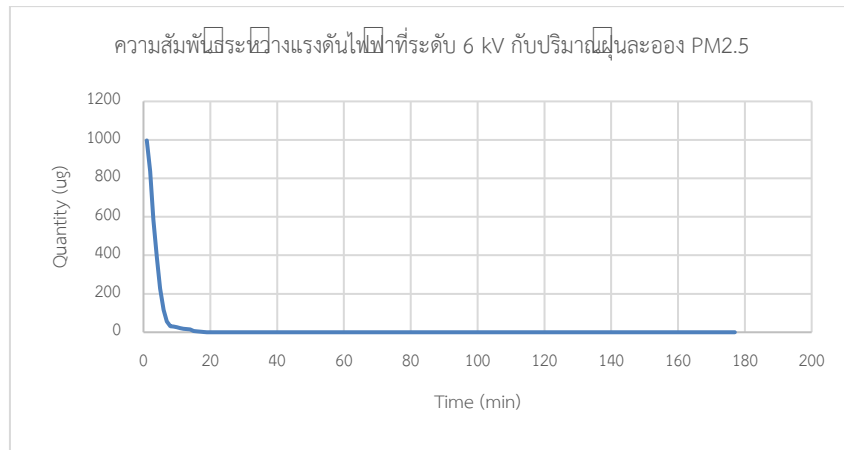


ภาพประกอบที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

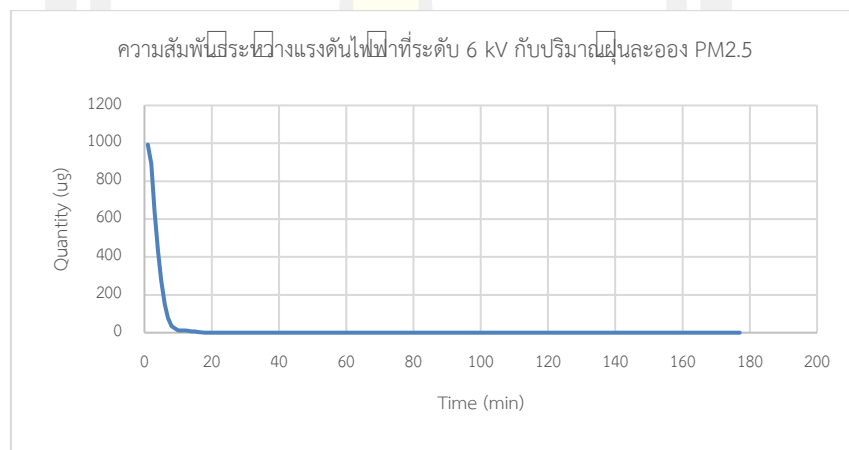


ภาพประกอบที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

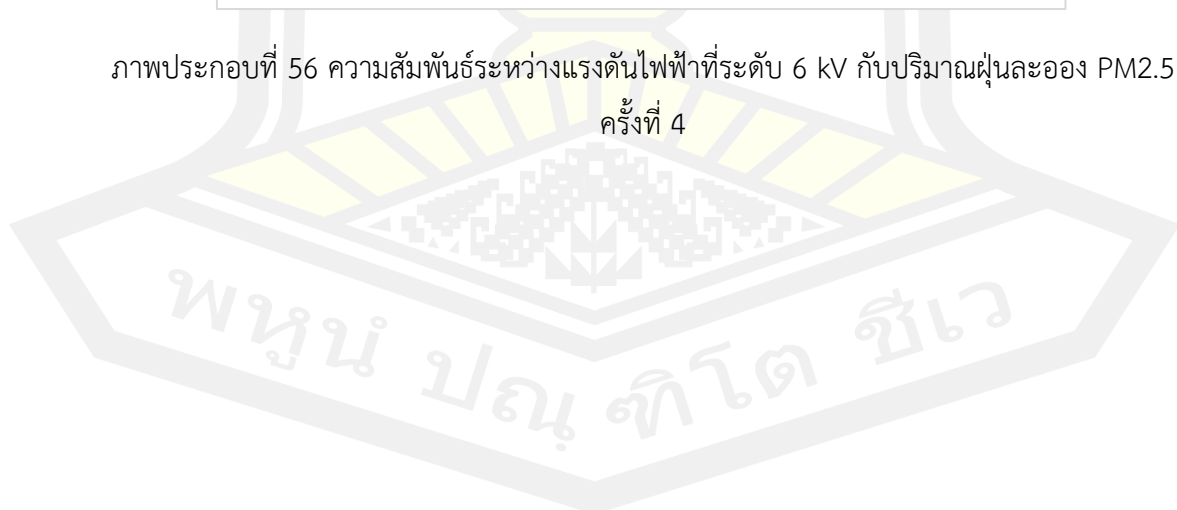


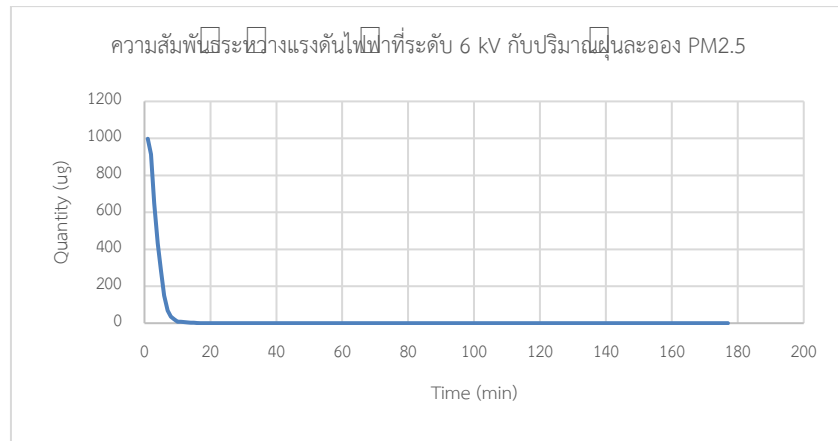


ภาพประกอบที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

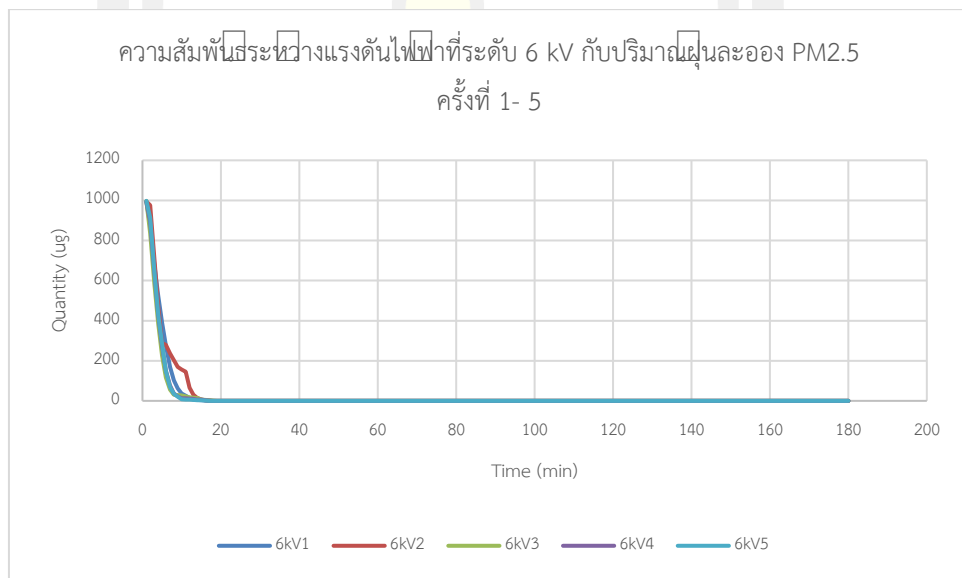


ภาพประกอบที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4





ภาพประกอบที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5



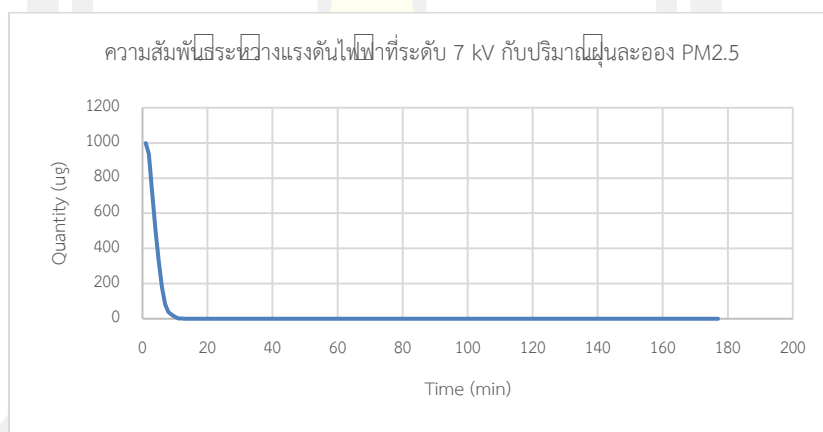
ภาพประกอบที่ 58 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 6 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

พหุ ม บณ จิ โด ชี เว

จากภาพประกอบที่ 54-59 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที
แสดงในตารางที่ 13

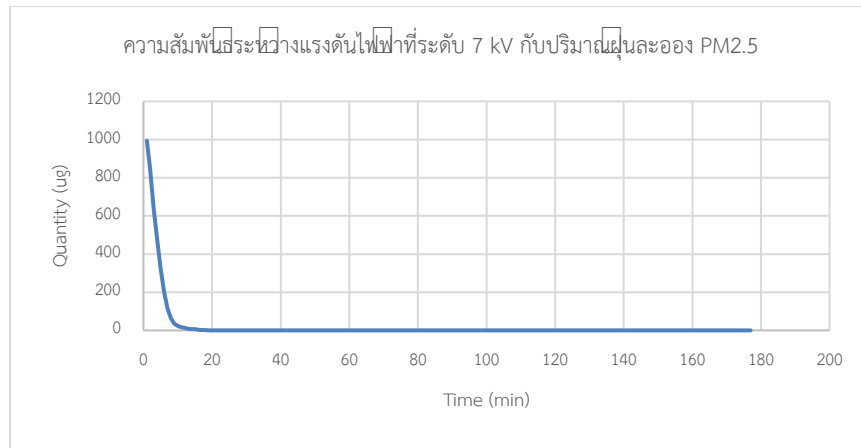
ตารางที่ 13 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6
kV

ครั้งที่	เวลา (min)
1	17
2	18
3	19
4	18
5	17

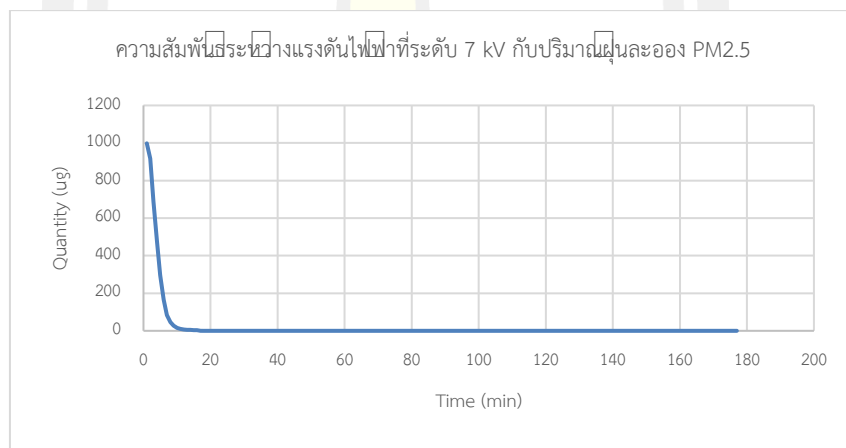


ภาพประกอบที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 1

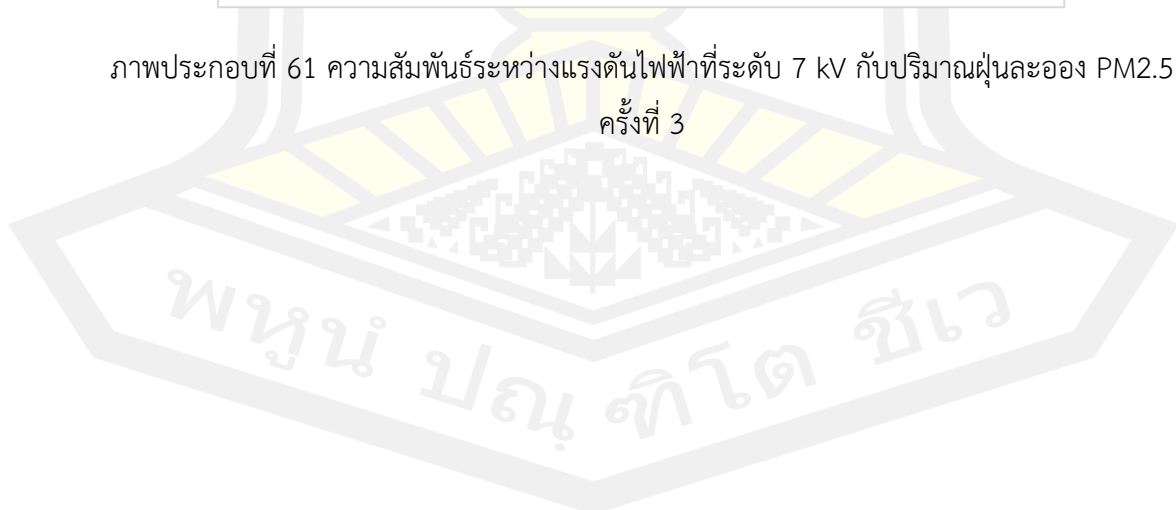
พหุ ประถมศึกษา

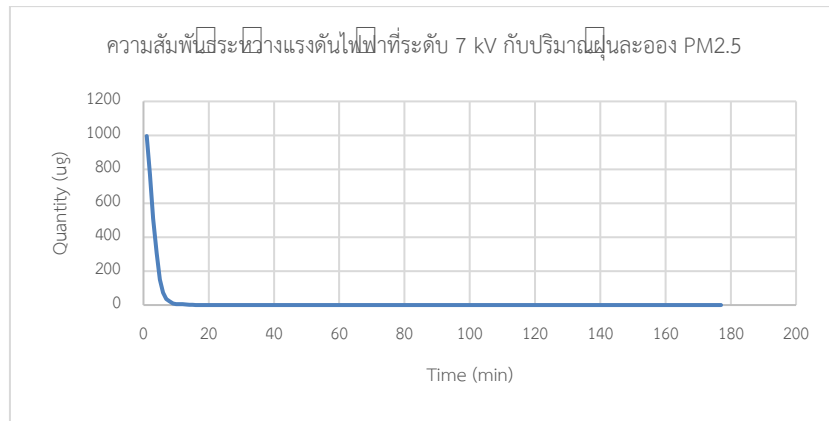


ภาพประกอบที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 2

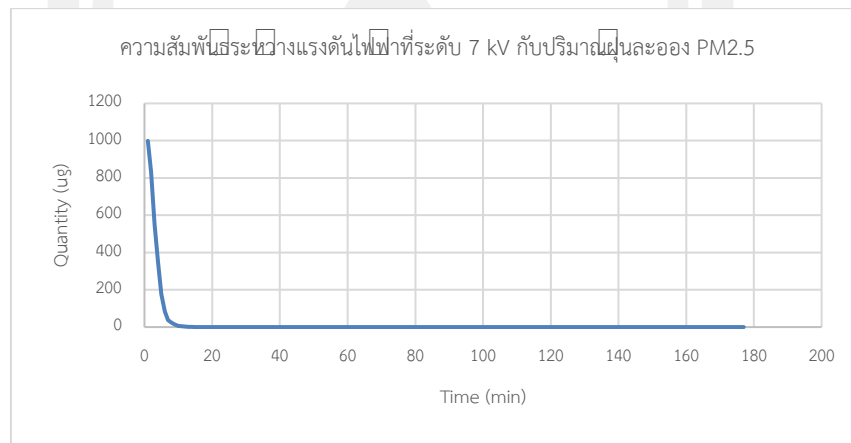


ภาพประกอบที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

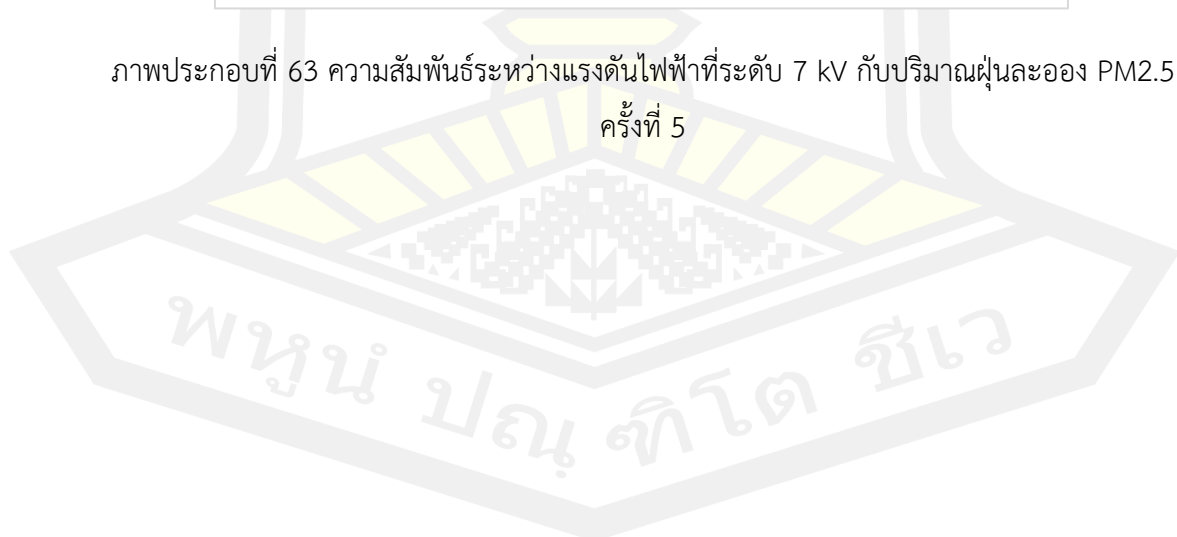


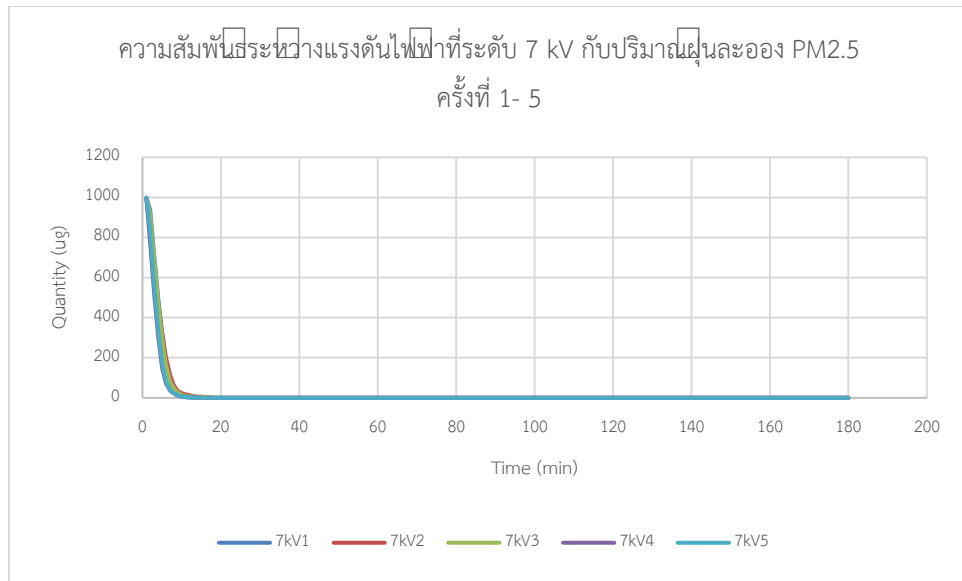


ภาพประกอบที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 5



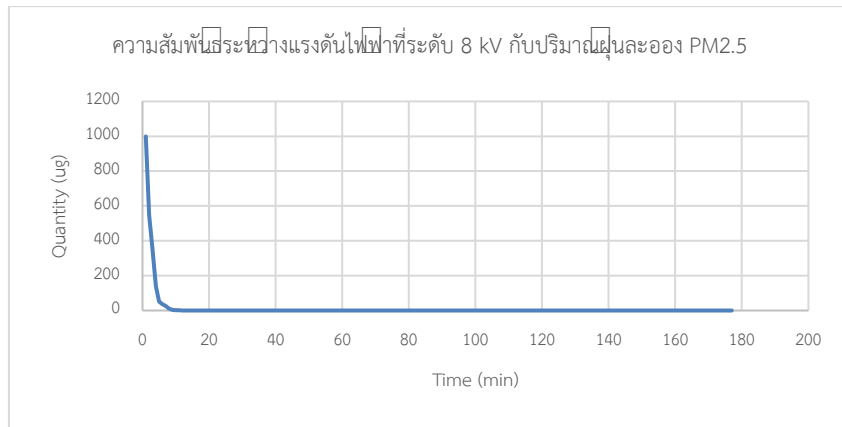


ภาพประกอบที่ 64 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 7 kV กับปริมาณฝุ่น
ละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

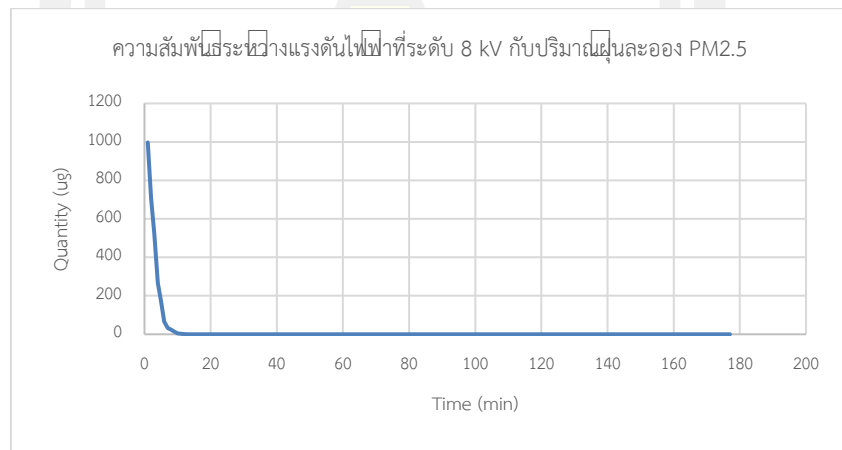
จากภาพประกอบที่ 60-65 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่
แสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 7
kV

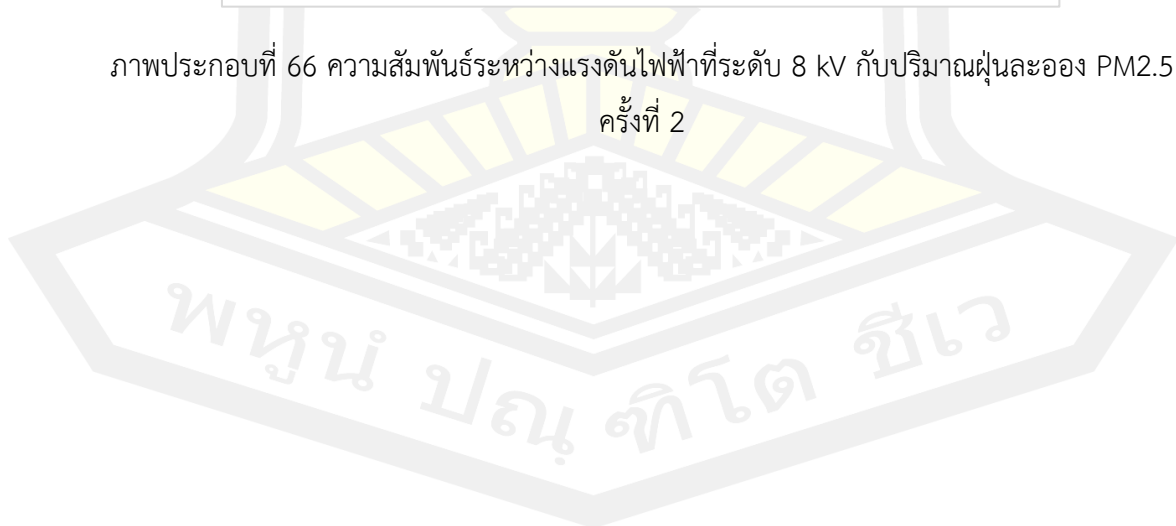
ครั้งที่	เวลา (min)
1	13
2	19
3	17
4	16
5	15

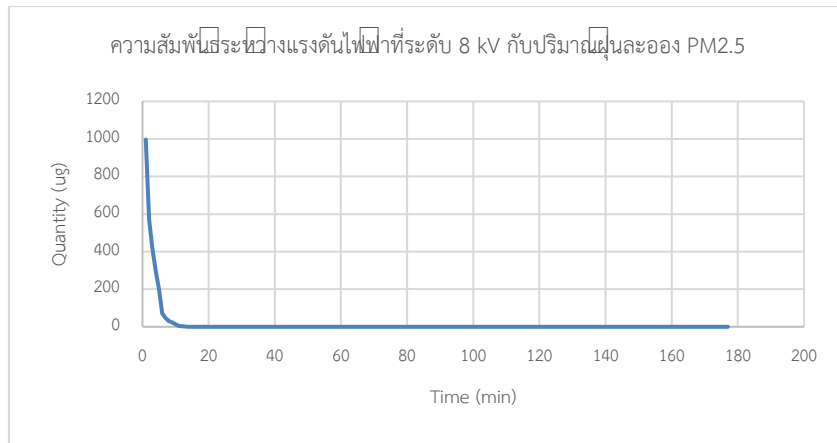


ภาพประกอบที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 1

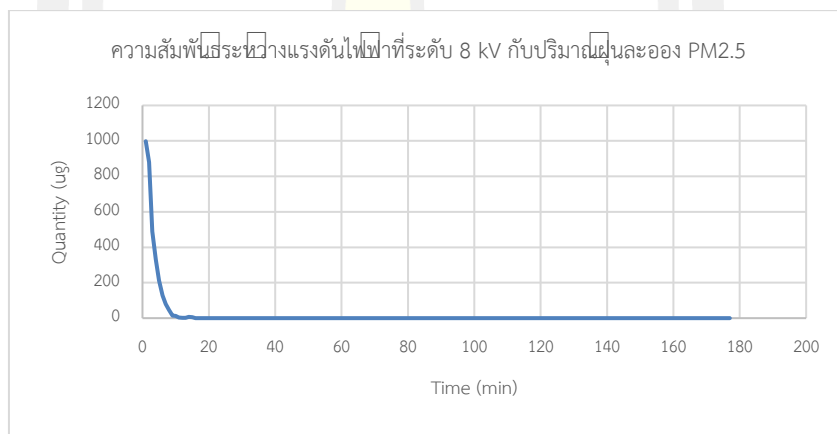


ภาพประกอบที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 2

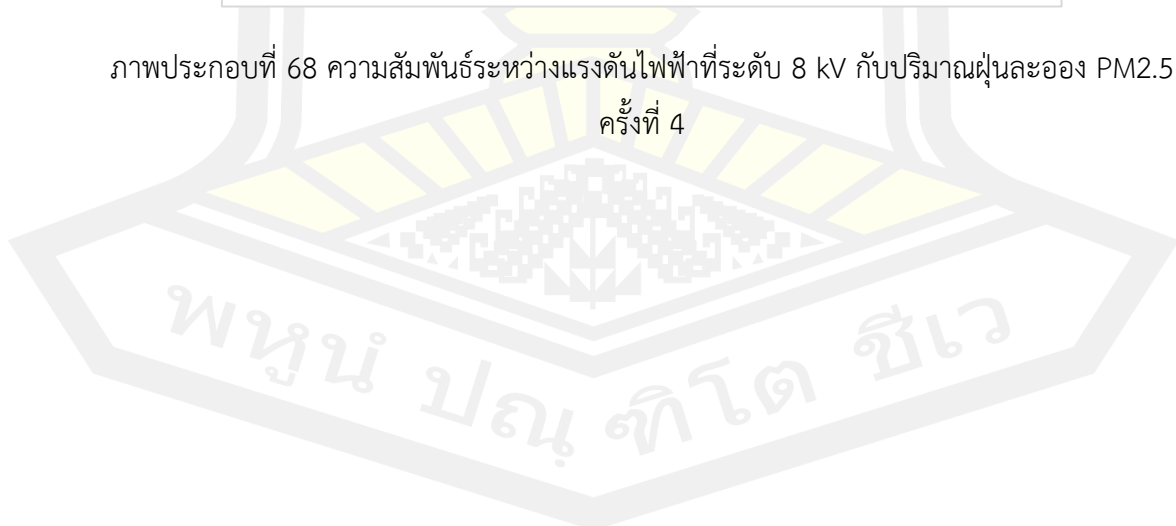


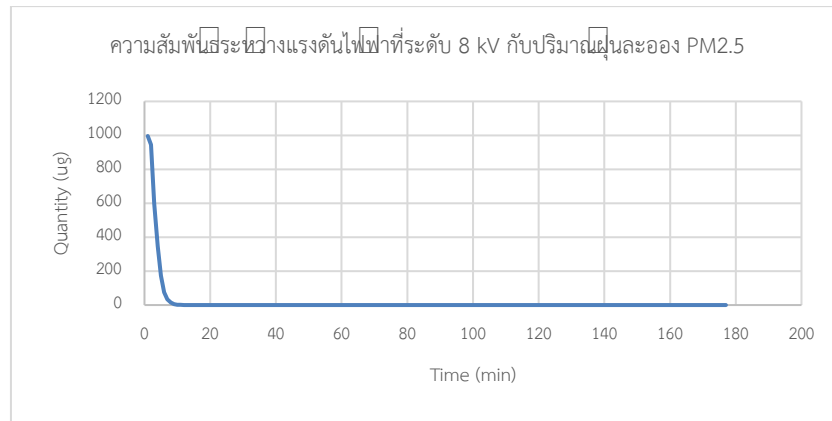


ภาพประกอบที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 3

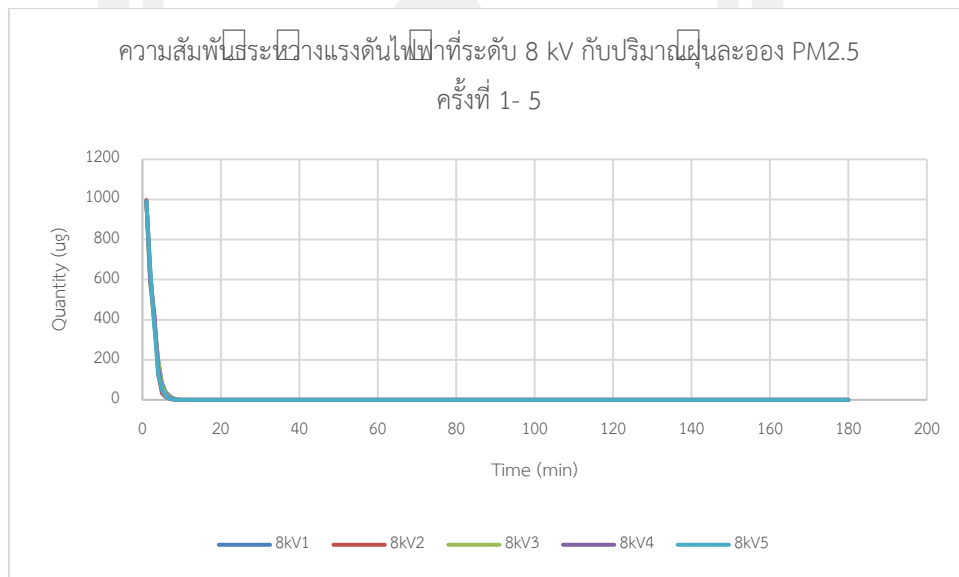


ภาพประกอบที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5
ครั้งที่ 4





ภาพประกอบที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5



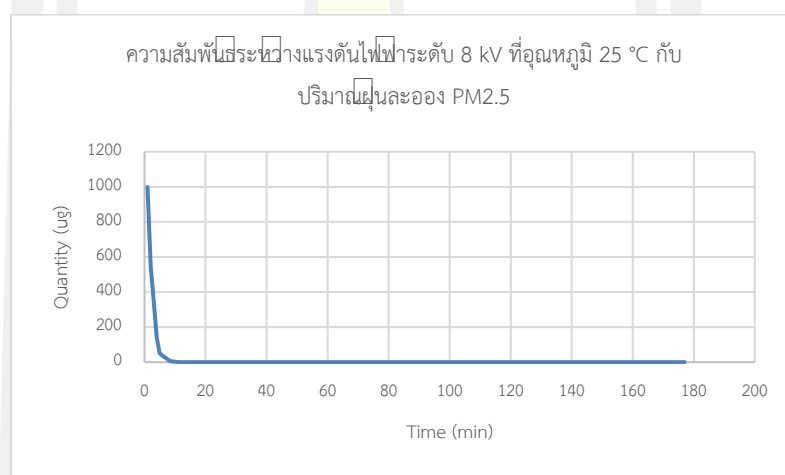
ภาพประกอบที่ 70 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 8 kV กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

พหุบัณฑิต ชีวะ

จากภาพประกอบที่ 66-71 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที
แสดงในตารางที่ 15

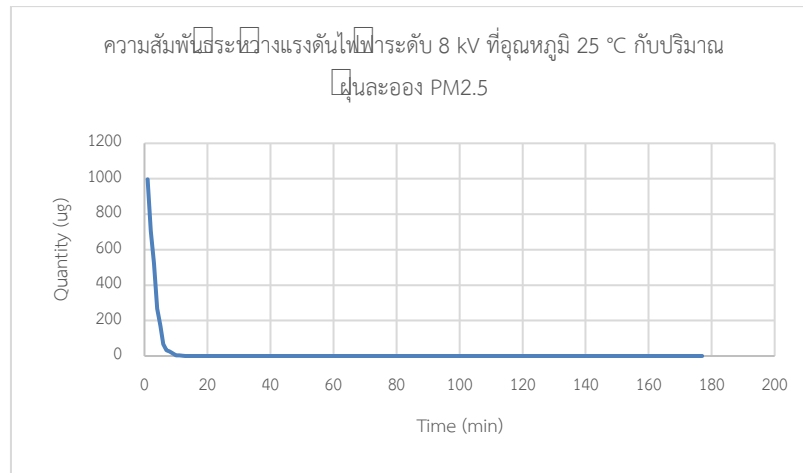
ตารางที่ 15 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 8
kV

ครั้งที่	เวลา (min)
1	10
2	9
3	10
4	9
5	9

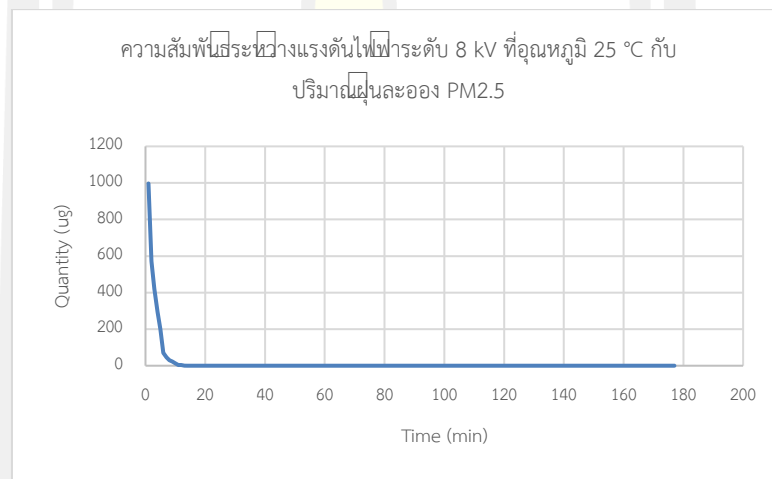


ภาพประกอบที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่น
ละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

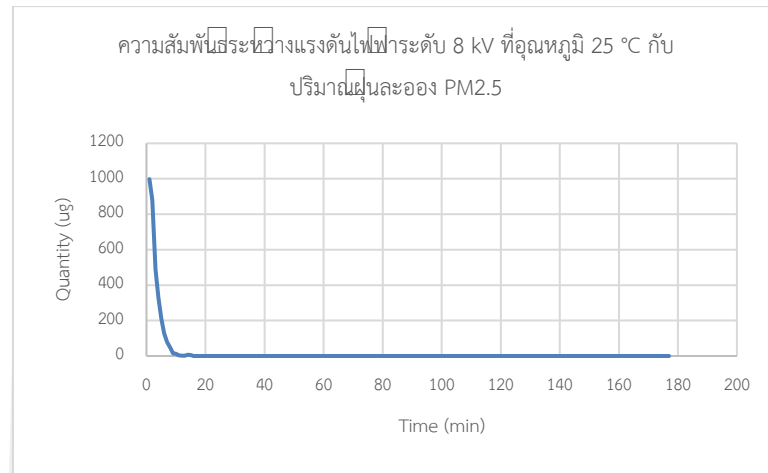
พหุ ประถมศึกษา



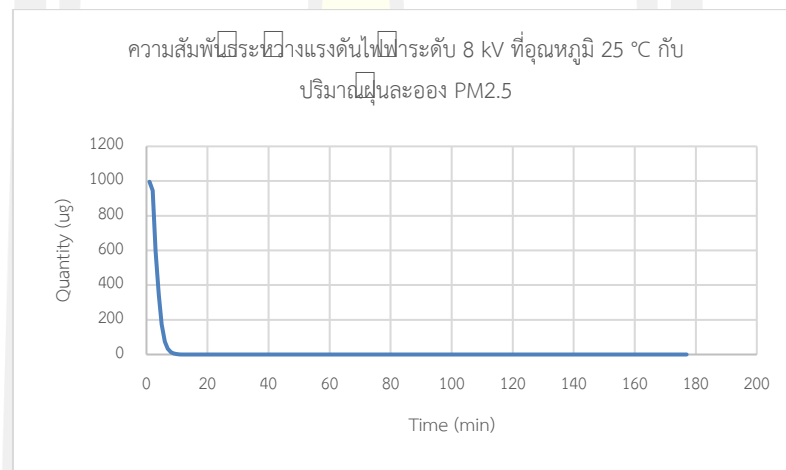
ภาพประกอบที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2



ภาพประกอบที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C ฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

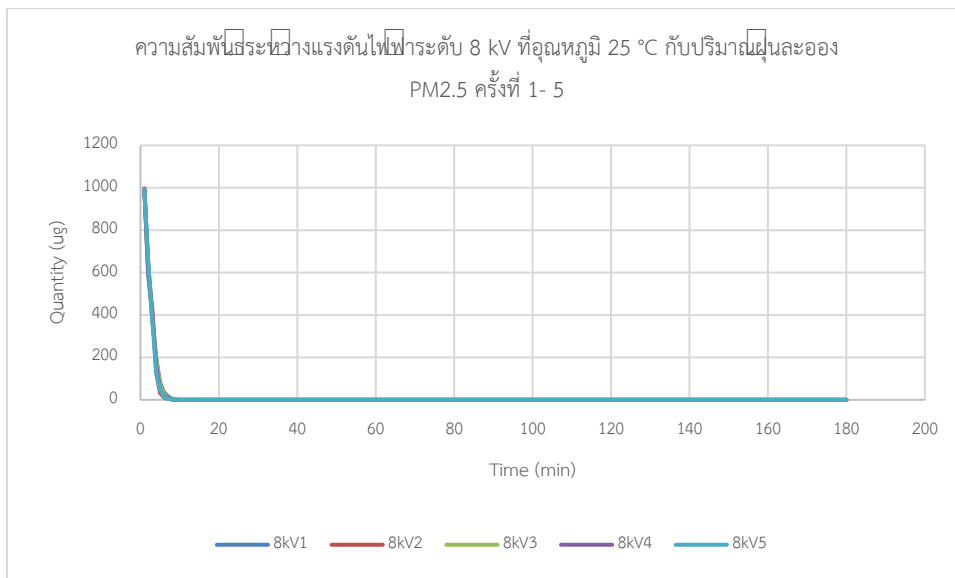


ภาพประกอบที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5

พหุบัณฑิต ชีวะ

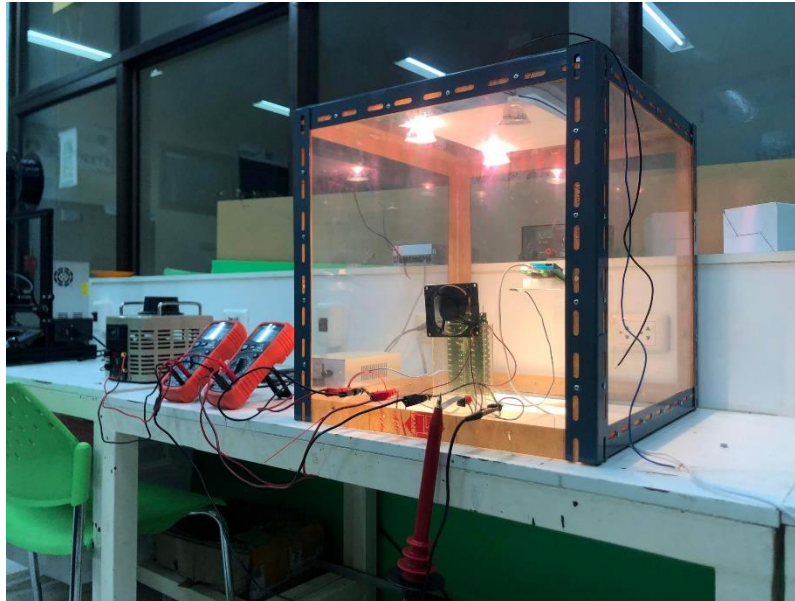


ภาพประกอบที่ 76 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25°C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

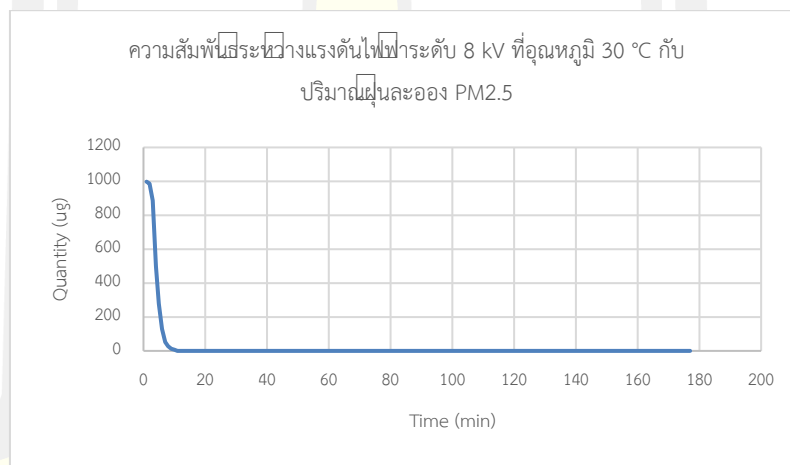
จากภาพประกอบที่ 72-77 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 25 °C

ครั้งที่	เวลา (min)
1	10
2	9
3	10
4	9
5	9

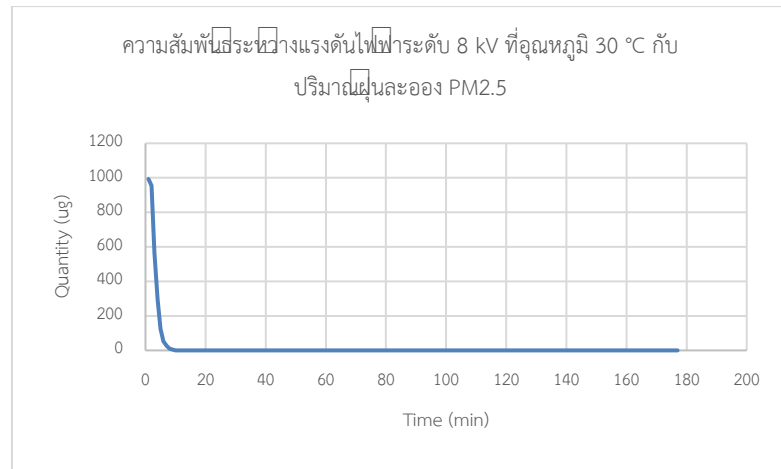


ภาพประกอบที่ 77 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 30 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิดฮาโลเจน จำนวน 2 หลอด

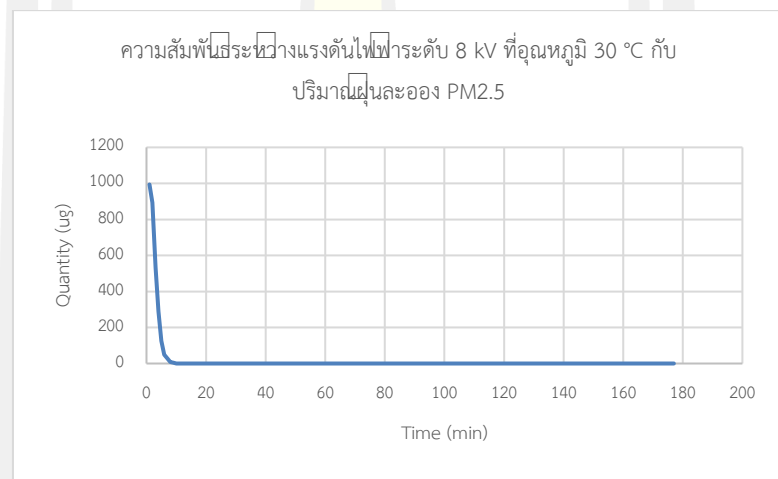


ภาพประกอบที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

พหุ ปลูก โท ชีวะ

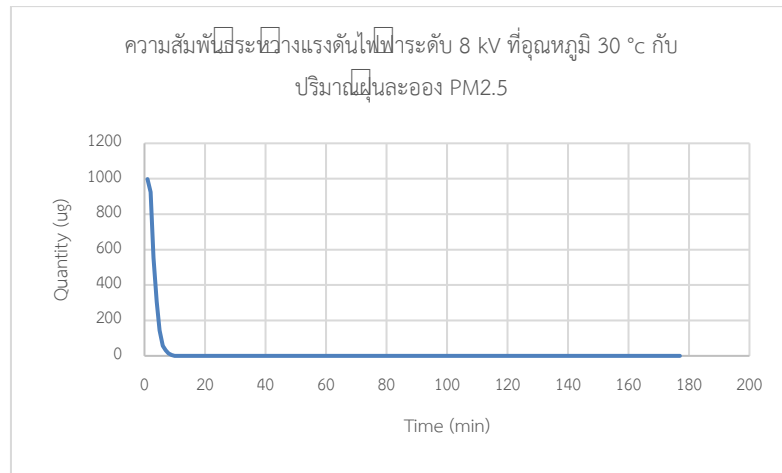


ภาพประกอบที่ 79 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

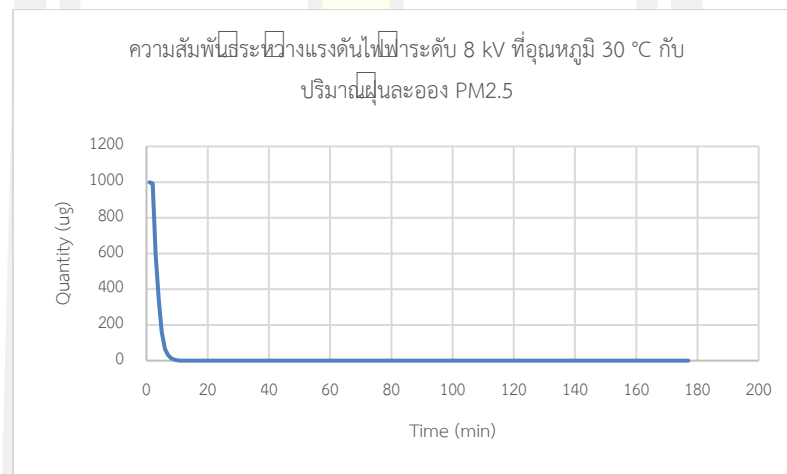


ภาพประกอบที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

พหุบัณฑิต ชีวะ

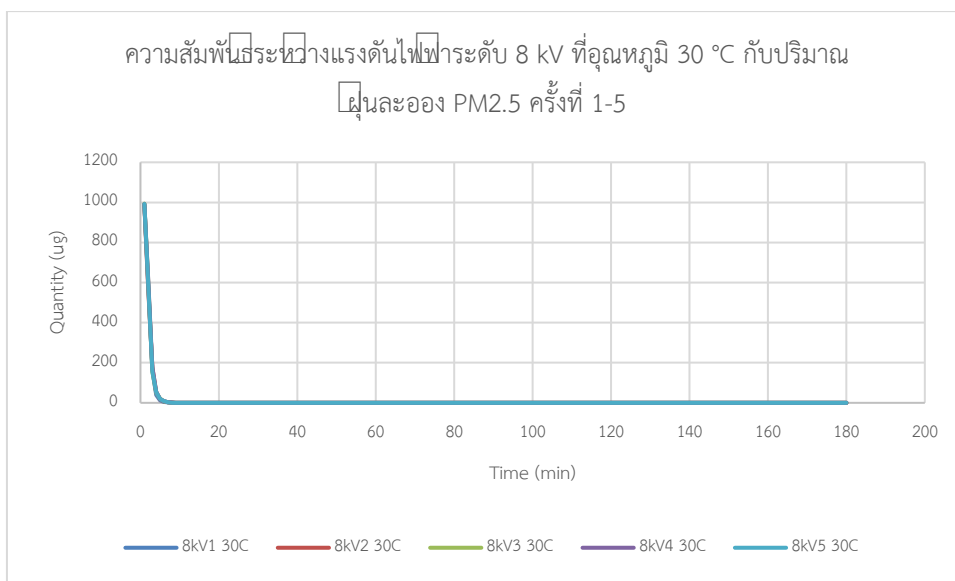


ภาพประกอบที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5

พหุบัณฑิต ชีวะ

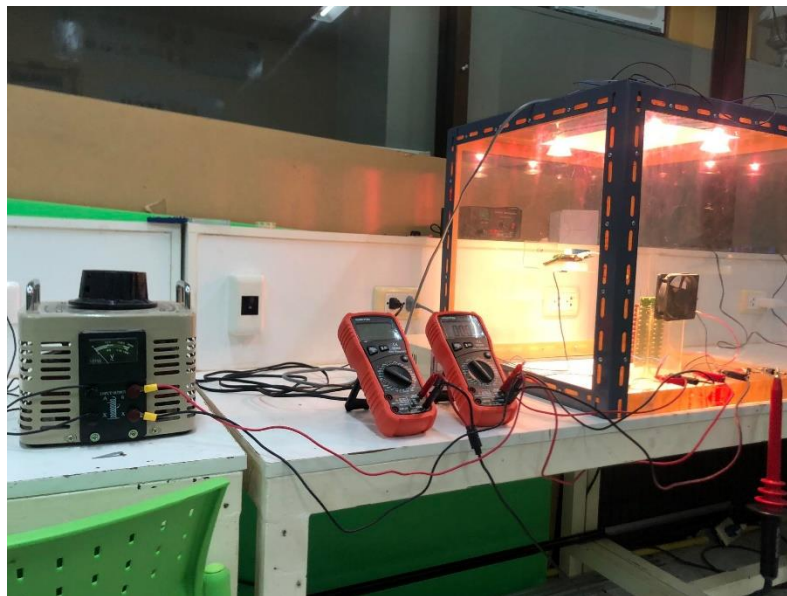


ภาพประกอบที่ 83 กราฟเปรียบเทียบสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5

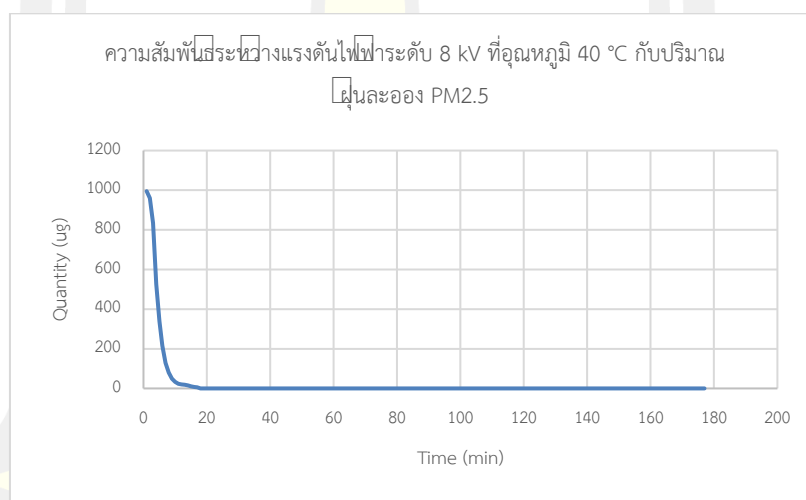
จากภาพประกอบที่ 79-84 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 30 °C

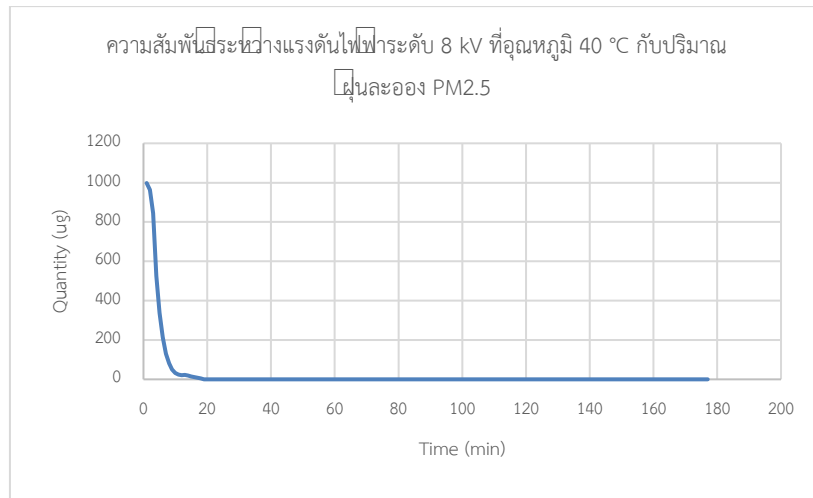
ครั้งที่	เวลา (min)
1	8
2	8
3	9
4	9
5	8



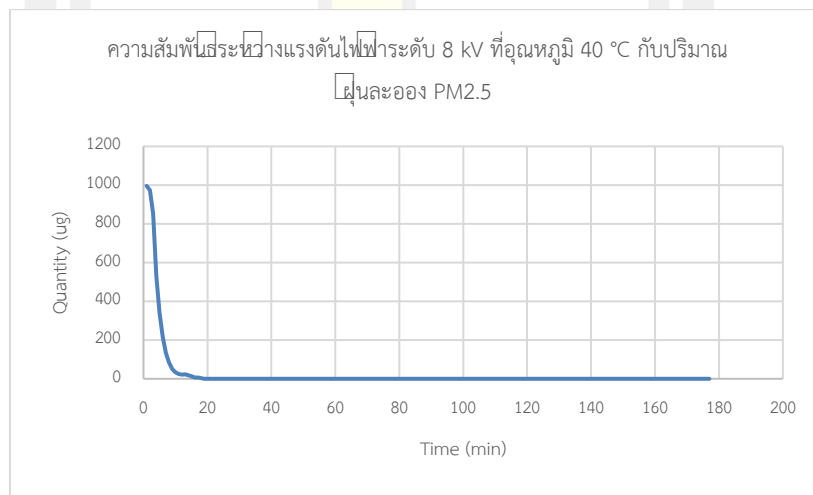
ภาพประกอบที่ 84 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 40 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิดฮาโลเจน จำนวน 4 หลอด



ภาพประกอบที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

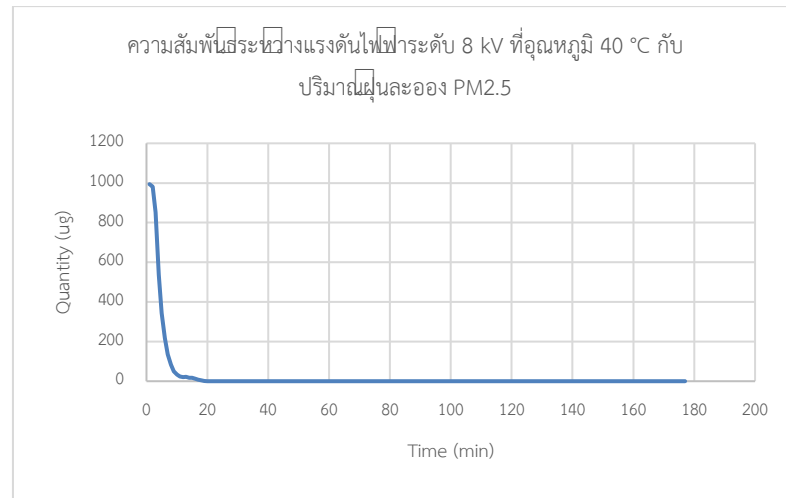


ภาพประกอบที่ 86 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

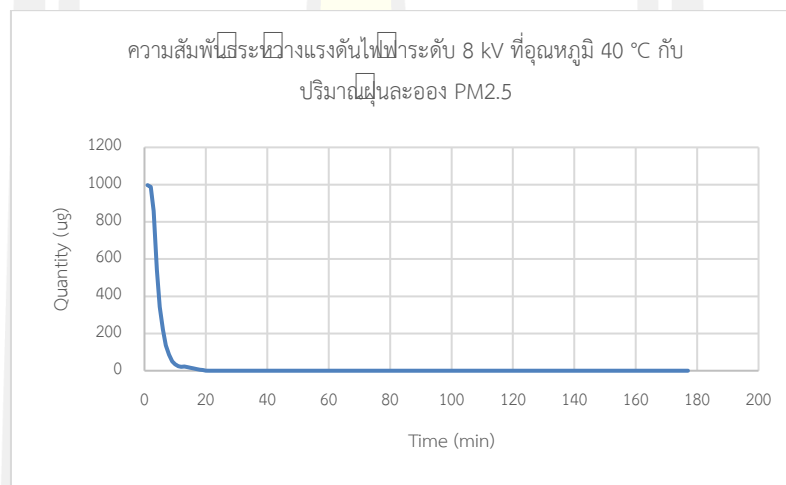


ภาพประกอบที่ 87 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

พหุบัณฑิต ชีวะ

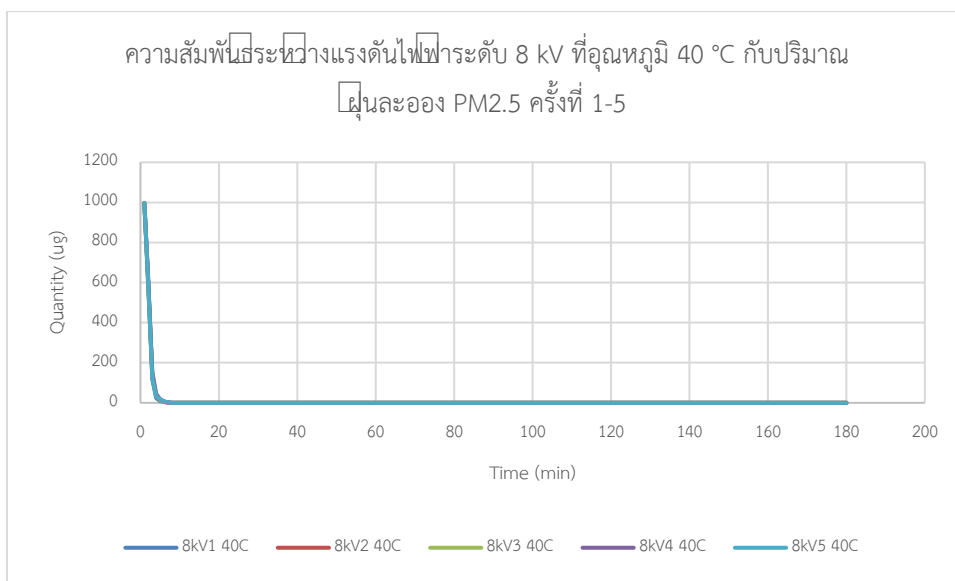


ภาพประกอบที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5

พหุบัณฑิต ชีวะ

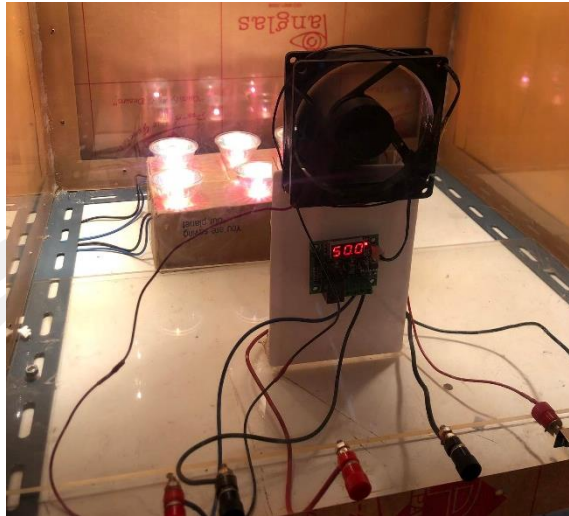


ภาพประกอบที่ 90 กราฟเปรียบเทียบสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1-5

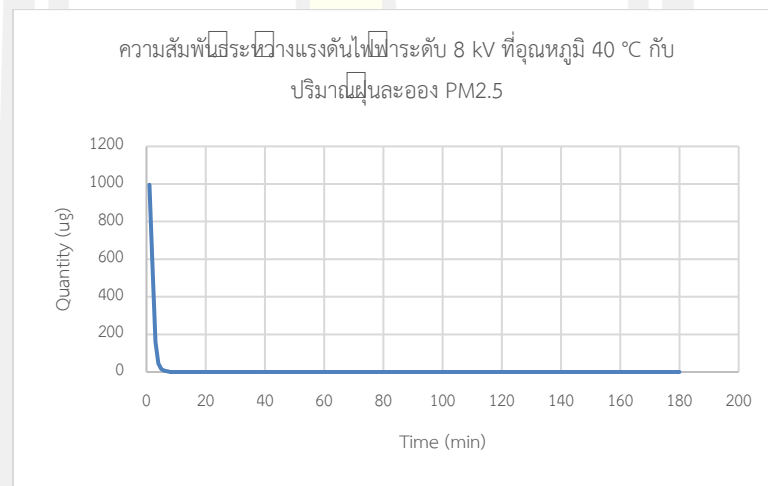
จากภาพประกอบที่ 86-91 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 40 °C

ครั้งที่	เวลา (min)
1	8
2	7
3	8
4	8
5	8

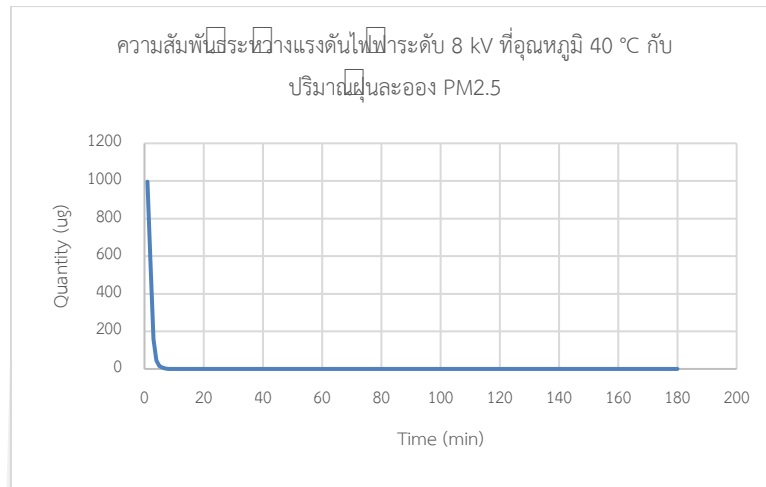


ภาพประกอบที่ 91 การเพิ่มอุณหภูมิในห้องทดลองให้มีอุณหภูมิที่ 50 °C โดยการติดตั้งหลอดชนิดฮาโลเจน จำนวน 10 หลอด



ภาพประกอบที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1

พหุบัณฑิต ชีวะ

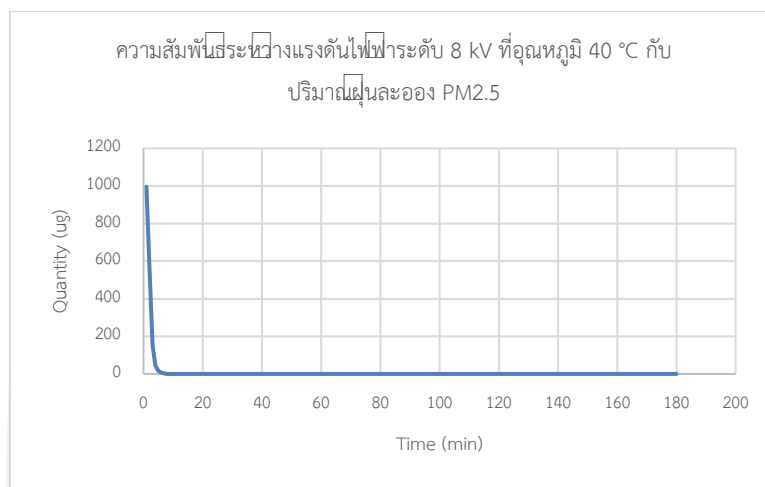


ภาพประกอบที่ 93 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 2

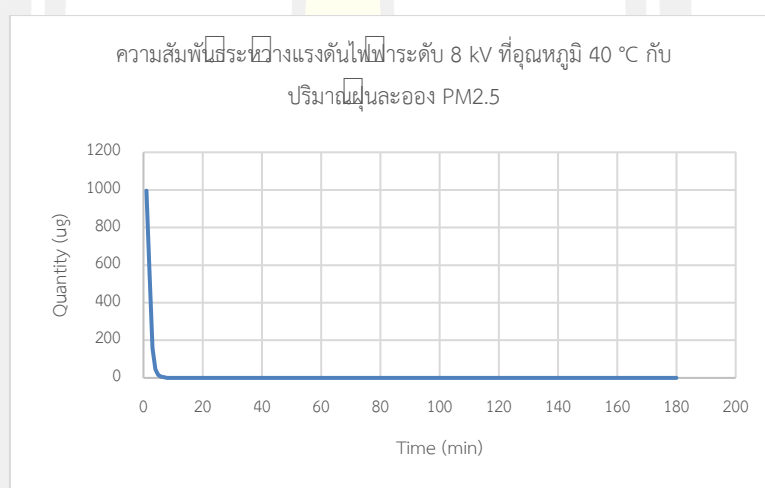


ภาพประกอบที่ 94 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 3

พหุบัณฑิต ชีวะ

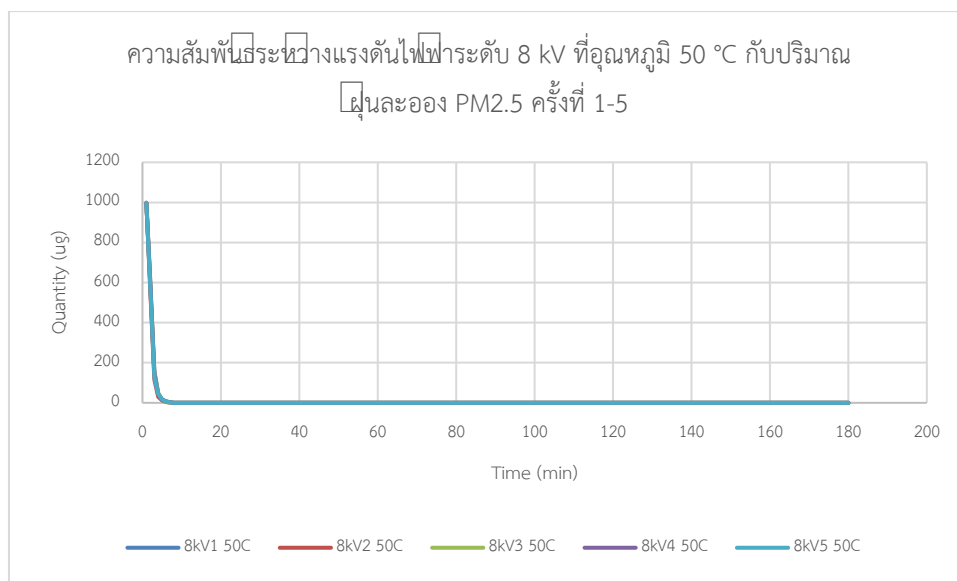


ภาพประกอบที่ 95 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 4



ภาพประกอบที่ 96 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 5

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบที่ 97 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับ 8 kV ที่อุณหภูมิ 50°C กับปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ครั้งที่ 1- 5

จากภาพประกอบที่ 93-98 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ลดลงตามที่แสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ระยะเวลาที่ใช้การลดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ในการทดลองระดับแรงดัน 8 kV ที่อุณหภูมิ 50 °C

ครั้งที่	เวลา (min)
1	8
2	8
3	7
4	8
5	8

4.3 ผลการทดลองการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงในช่วงระดับแรงดัน 1-8 kV

ตารางที่ 20 ระดับแรงดันใช้ในการลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ให้มีปริมาณต่ำที่สุด

ระดับแรงดัน (kV)	ระยะเวลา (min)	ปริมาณฝุ่นละออง (ug)	สมรรถนะการลด pm2.5
1	169-171	2.50-5.40	99.73%
2	114-117	0	100%
3	77-81	0	100%
4	40-43	0	100%
5	25-27	0	100%
6	17-19	0	100%
7	13-19	0	100%
8	8-9	0	100%

จากการทดลอง ช่วงเวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง ปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่ 990 μg ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและฝุ่นละออง PM2.5 ดังตารางที่ 20 พบว่าระดับแรงดัน 8 kV ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุดในกระบวนการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 จึงได้นำค่าแรงดันที่มีสมรรถนะดีที่สุดในการทดลอง มาทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 สมรรถนะการลดปริมาณฝุ่นละออง PM2.5 ที่ระดับแรงดัน 8 kV ในช่วงเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ตัวแปรต้น	ระยะเวลา (min)	ปริมาณฝุ่นละออง (ug)	สมรรถนะการลด pm2.5
25 °C	9-10	0	100%
30 °C	8-9	0	100%
40 °C	7-8	0	100%
50 °C	7-8	0	100%

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยครั้งนี้คือ การพัฒนาอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเทคโนโลยีพลาสมาอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ โดยการวิเคราะห์จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการกำจัดอนุภาคฝุ่นละออง ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องและสนับสนุนแนวคิดเรื่องการใช้อนุภาคไฟฟ้าประจุลบมาใช้ในการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 การสร้างและทดลองอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้กำจัดฝุ่นละออง PM2.5 จากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา ผลการทดลองพบว่า การใช้แรงดันไฟฟ้า 8 kV ณ อุณหภูมิ 25 °C สามารถลดปริมาณอนุภาค PM2.5 990 µg ถึงระดับ 0 µg ภายใน 9.00–10.00 min ในขณะที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1–2 kV ใช้เวลา 169.00–171.00 min และ 114.00–117.00 min ตามลำดับ ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมสำหรับอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 30-50 °C ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 8 kV จะใช้ระยะเวลากำจัดฝุ่นละออง PM2.5 8.00-9.00 min 7.00-8.00 min และ 7.00-8.00 min กล่าวคือ สมรรถนะการกำจัดฝุ่นละออง PM2.5 เพิ่มขึ้น 11.11-12.50% 25.00-28.58% และ 25.00-28.58%

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองกระบวนการกำจัดอนุภาค PM2.5 ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาอนุภาคไฟฟ้าประจุลบพบว่า สมรรถนะการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระดับแรงดันเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลมาจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทำให้มีความเข้มข้นของไอออนที่เกิดจากแรงดันเริ่มเกิดโคโรนา มีค่าสูงขึ้นด้วยทำให้อนุภาค PM2.5 ที่ผ่านถูกไอออนเกาะได้มากขึ้น ทำให้อนุภาค PM2.5 ตกตะกอนลงสู่พื้น เมื่อผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มสูงอุณหภูมิขึ้นเป็น 30-50 °C พบว่าสมรรถนะการลดปริมาณอนุภาค PM2.5 เพิ่มขึ้น ซึ่งจากสมการการอัดประจุแบบแพร่กระจาย ตัวแปรของอุณหภูมิ แปรผันตรงกับจำนวนประจุที่อนุภาค PM2.5 ได้รับจากขั้นตอนการอัดประจุ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจำนวนประจุก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะในการกำจัดอนุภาค PM2.5 เพิ่มขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ทฤษฎีการกำจัดอนุภาคโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาและทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบสำหรับการกำจัดอนุภาคฝุ่นละออง PM2.5 จากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล โดยอุปกรณ์บำบัดไอเสียเป็นแบบท่อที่มีแทงปลายแหลมไปตามแนวท่อและชาร์จประจุด้วยความแรงดันไฟฟ้า ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับศึกษาวิจัยต่อเนื่อง คือ

1. ศึกษาการควบคุมและปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าในการชาร์จประจุให้เหมาะสมกับการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ
2. ศึกษาการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองด้วยวิธีการทางไฟฟ้าด้วยวิธีอื่น ๆ
3. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้า ประจุลบ ร่วมกับการกำจัดอนุภาคด้วยวิธีการอื่น ๆ
4. เพื่อให้ผลการทดลองได้ผลลัพธ์โดยตรงมากขึ้น งานวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาวางแผนทดลองกับ PM2.5 ของเครื่องยนต์ดีเซล

ในการนำอุปกรณ์บำบัดไอเสียสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลด้วยอนุภาคไฟฟ้าประจุลบ ควรมีการปรับ และเพิ่มระบบเพื่อการใช้งานสมบูรณ์ขึ้นดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องชาร์จประจุ เนื่องจากการนำไปใช้งานกับรถยนต์ อุปกรณ์ดังกล่าวใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V จึงควรมีการปรับปรุงให้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่รถยนต์ได้โดยการปรับปรุงวงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง

2. การกำหนดอุณหภูมิในช่วง 30-50 °C ก่อนข้างจะไม่มีผลต่อกำจัดอนุภาค PM2.5 ดังนั้นการใช้งานจริงอาจมีค่าสูงกว่าช่วงดังกล่าวดังนั้น ควรปรับสถานะให้ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียขณะทดสอบมีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าวด้วย หากแก๊สไอเสียมีค่าอุณหภูมิมากกว่าช่วงที่กำหนดควรทำการลดอุณหภูมิก่อนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์ เพราะในการทำงานจริงของอุปกรณ์ อุณหภูมิของอนุภาคที่สูงมากจะทำให้เกิดผลเสียต่ออุปกรณ์โดยอาจทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงได้

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. (2021). จำนวนรถจดทะเบียนสะสม. Retrieved 4 February, from <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [2] ไดकिनไทยแลนด์. (2560). PM2.5 อันตรายและการป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ. Retrieved 4 February, from <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:za5AzHqU7DIJ:https://www.daikin.co.th/service-knowledge/pm-2-5/&cd=3&hl=th&ct=clnk&gl=th>
- [3] สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2547). การเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ. Retrieved 4 February, from <https://opac.rmutt.ac.th/Catalog/BibItem.aspx?BibID=b00028397>
- [4] Sukcharoen, W., Tangaromsuk, P., Sontiatchara, M., Waithayakul, K., Samedkairop, C., Poopongpet, J., ... & Lapmanee, S. (2020). การศึกษามาตรการจัดการปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ของประเทศไทยตามแนวทางองค์การอนามัยโลก. *Vajira Medical Journal: Journal of Urban Medicine*, 64(5), 345-356.
- [5] Likhanov, V. A., & Lopatin, O. P. (2018). Decrease in Toxicity of Vehicle Exhaust Gases of Car Diesel by Conversion to Alcohol-Fuel Emulsions. *Ecology and industry of Russia*, 22(10), 54-59.
- [6] Melbert, A. A., Shaposhnikov, Y. A., Mashensky, A. V., & Voinash, S. A. (2019, February). Effects of 8412/12 catalytic converter prestarting on harmful emissions at negative ambient temperatures. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1177, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- [7] Presser, C., Nazarian, A., & Millo, A. (2018). Laser-driven calorimetry measurements of petroleum and biodiesel fuels. *Fuel*, 214, 656-666.
- [8] อำนาจ วงศ์บัณฑิต. (2019). มาตรการทางกฎหมายในการควบคุมมลพิษทางอากาศจากยานพาหนะทางบก. *วารสาร นิติศาสตร์ มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์*, 48(1).

- [9] Wang, H., Naghavi, M., Allen, C., Barber, R. M., Bhutta, Z. A., Carter, A., ... & Bell, M. L. (2016). Global, regional, and national life expectancy, all-cause mortality, and cause-specific mortality for 249 causes of death, 1980–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet*, 388(10053), 1459-1544.
- [10] Landrigan, P. J. (2017). Air pollution and health. *The Lancet Public Health*, 2(1), e4-e5.
- [11] Kioumourtzoglou, M. A., Schwartz, J. D., Weisskopf, M. G., Melly, S. J., Wang, Y., Dominici, F., & Zanobetti, A. (2016). Long-term PM_{2.5} exposure and neurological hospital admissions in the northeastern United States. *Environmental health perspectives*, 124(1), 23-29.
- [12] Homchaen, W. (2022). ข้อเสนอทางกฎหมายเพื่อแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศจากการเผาป่า. *The Journal of Law, Public Administration and Social Science. School of Law Chiang Rai Rajabhat University*, 6(2), 243-263.
- [13] Thuamkred, P., Surachet, M., & Phianlamloet, J. (2020). มาตรการทางกฎหมายเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในประเทศไทย ที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5. *Rajapark Journal*, 14(36), 80-92.
- [14] มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. (n.d.) ระบบกำจัดสารมลพิษในไอเสีย. Retrieved 4 February, from <https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=26&chap=5&page=t26-5-infodetail04.html>
- [15] กัมปนาท เทียนน้อย. (2012). การควบคุมปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้กระบวนการซีเล็กทีฟแคตตาลิซิสรีดักชัน. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 4(3).
- [16] Abdel-Rahman, A. A. (1998). On the emissions from internal-combustion engines: a review. *International Journal of Energy Research*, 22(6), 483-513.

- [17] Patil, A. S., Halbe, V. G., & Vora, K. C. (2005). A System Approach to Automotive Air Intake System Development.
- [18] Abdullah, N. R., Shahrudin, N. S., Mamat, R., Ihsan Mamat, A. M., & Zulkifli, A. (2014). Effects of air intake pressure on the engine performance, fuel economy and exhaust emissions of a small gasoline engine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 6, 949-58.
- [19] Khair, M. K., & Majewski, W. A. (2006). Diesel emissions and their control (Vol. 303). SAE Technical Paper.
- [20] Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- [21] Khair, M. K. (2003). A review of diesel particulate filter technologies.
- [22] de Souza, G. R., de Castro Pellegrini, C., Ferreira, S. L., Pau, F. S., & Armas, O. (2019). Study of intake manifolds of an internal combustion engine: A new geometry based on experimental results and numerical simulations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 9, 248-258.
- [23] กิตติพงษ์ ตันมิตร, เอกสารประกอบการสอนวิชา 162 441 HIGH VOLTAGE ENGINEERING, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [24] Goree, J. (1992). Ion trapping by a charged dust grain in a plasma. *Physical review letters*, 69(2), 277.
- [25] โชติ อมรศักดิ์, ชาคริต, ลากใหญ่, & ดวงนภา. (2019). ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่สัมพันธ์ต่อการเกิดปัญหามลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม เพื่อการเรียนรู้*, 9(2), 237-249.
- [26] ฉัตร สุมน พฤฒิ ภิญโญ. (2017). กฎหมายกับการควบคุมมลภาวะทางอากาศ. *Public Health Policy and Laws Journal*, 3(3), 401-424.
- [27] Jangkhum, T. (2020). ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของผลกระทบของมลพิษทางอากาศที่มีต่อสุขภาพของผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจพื้นที่อำเภอพิมายจังหวัด

- นครราชสีมา. Journal of Humanities and Social Sciences, Rajapruk University, 6(2), 231-245.
- [28] พวงผกา บุญโสภากย์, ประสาน บุญโสภากย์, & ณปภัชฌ์ กิจไพศาล. (2018). มาตรการทางกฎหมายในการป้องกัน และควบคุมมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม. KASEM BUNDIT JOURNAL, 19(March), 118-129.
- [29] ธนากร ผิวจี, & ศุภโยธิน ณ สงขลา. (2015). การพัฒนาเครื่องเตื่อนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในบริเวณตรวจสภาพรถสำนักงานขนส่งกรุงเทพมหานครพื้นที่. รายงานการประชุมวิชาการ และนำเสนอผลการวิจัยระดับชาติ และนานาชาติกลุ่มระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์, 1(6), 284-294.
- [30] กรมควบคุมมลพิษ. สรุปรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ. ศ. 2545-พ.ศ. 2556.
- [31] กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์มลพิษประเทศไทย ปี 2543-2558.
- [32] ศิริพล ทองอ่อน, ชัยยศ ดำรงกิจโกศล. (2020). ผลของภาระการบรรทุกผู้โดยสารต่อปริมาณการปล่อยสารมลพิษของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลไม่เกิน 7 ที่นั่ง. Kasem Bundit Engineering Journal, 10(2), 27-37.
- [33] Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (1986). Internal Combustion Engines; Applied Thermosciences. USA: John Willy & Sons.
- [34] กัมปนาท เทียน น้อย. (2012). การควบคุมปริมาณไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้กระบวนการซีเล็กทีฟแคตตาลิสต์รีดักชัน. Princess of Naradhiwas University Journal, 4(3).
- [35] Lakkireddy, V. R., Mohammed, H., Johnson, J. H., & Bagley, S. T. (2006). The effect of a diesel oxidation catalyst and a catalyzed particulate filter on the emissions from a heavy-duty diesel engine (No. 2006-01-0875). SAE Technical Paper.
- [36] อัจฉรีย์ ทิพนธธรณินทร์. (2016). แนวทางการแก้ปัญหาหมอกควันสำหรับจังหวัดเชียงใหม่. วารสาร ด้านการบริหารรัฐกิจ และการเมือง, 4(1), 72-105.
- [37] ฉัตรชัย สิงห์อุตร, ทศวรรษ โอวสุวรรณกุล. เครื่องบำบัดควันพิษในไอเสียรถยนต์.

- [38] วริศรา กิติภูวตล. (2022). มาตรการทางกฎหมายในการควบคุมมลพิษทางอากาศในประเทศไทย: ศึกษาแนวทางการป้องกันควบคุม และแก้ไข หรือ กำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิน 2.5 ไมครอน ที่มีประสิทธิภาพในต่างประเทศ. *The Journal of Law, Public Administration and Social Science*. School of Law Chiang Rai Rajabhat University, 6(1), 25-46.
- [39] กาญจนา มะนาวหวาน, พาณิชัยโพ ตะกาว, ประภษณี จันทรรักษ์, ธันวดี ศรีธาวิรัตน์. (2016). โลหะหนักในฝุ่นละออง (PM10) บริเวณสถานีขนส่งผู้โดยสาร จังหวัดพิษณุโลก. *PSRU Journal of Science and Technology*, 1(3), 1-9.
- [40] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2560). ผลกระทบของอนุภาคมลสารมลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ, Retrieved 9 February, form <https://datacenter.deqp.go.th/knowledge/%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8/%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%9E-%E0%B8%A9%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8/>
- [41] รศ.ดร.พงศ์เทพ วิวรรณเดช. (2555). ฝุ่นละอองมีผลกระทบต่อร่างกาย. Retrieved 12 February, form <https://www.bangkokhospital.com/content/stay-away-from-toxic-dust>
- [42] ผศ.ดร.อารุญ เกตุสาคร.(2562). คว้นรูปเพิ่มเสียง ‘มะเร็งปอด’ วิจัยพบกลุ่มเสี่ยงในวัด มีสารก่อมะเร็งสูงกว่าปกติ. Retrieved 20 March, form <https://www.hfocus.org/content/2019/02/16816>
- [43] ธง รื้อ, & เบญจวรรณ. การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพของประชากรในจังหวัดราชบุรี จากการรับสัมผัสโลหะในฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิน 10 ไมครอน (PM10) (Doctoral dissertation, มหาวิทยาลัย ศิลปากร).
- [44] กรมอนามัย และกรมควบคุมโรคกระทรวงสาธารณสุข. (2558). แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงจากมลพิษทางอากาศ กรณีฝุ่นละอองขนาดเล็ก. Retrieved 9 February,

form

http://envocc.ddc.moph.go.th/uploads/downloads/do_manual_PM2.5.pdf

[45] เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล. (2018). การวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นละอองเชิงมวล PM2. 5 และPM10 ในบรรยากาศด้วยเครื่องตรวจวัดฝุ่น ละอองไร้สายในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย. *Journal of Innovative Technology Research*, 2(1), 59-78.

[46] สุปัทพ์นัหวังวงศ์วัฒนา. (2560). การขับเคลื่อนมาตรการแก้ไขปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือ PM2.5 เปิดหัวข้อเสนอ ภาครัฐควรแก้ไขอย่างไร. Retrieved 12 February, form https://www.nstda-tiis.or.th/th/publications_media/pm2-5_health-effect-and-solution/

[47] กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ. (2564). ข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ. Retrieved 12 February, form http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi_info.php

[48] ไทยโพสต์ออนไลน์. (2563). ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศของ. Retrieved 12 February, form <https://thai-post.net>detail>

[49] ชชาติ สาเลาะครบุรี. มลพิษฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศจากท่อไอเสียรถยนต์ส่วนบุคคล.

[50] Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1), 15-27.

[51] World Health Organization. (2562). การจัดทำเกณฑ์แนะนำคุณภาพอากาศขององค์การอนามัยโลก (WHO Air Quality Guideline) ในปีพ.ศ. 2548, Retrieved 12 February, form [briefing-on-air-pollution-th-thai.pdf \(who.int\)](http://www.who.int/briefing-on-air-pollution-th-thai.pdf)

[52] ระบบควบคุมไอเสีย (2012) ,Retrieved 12 February, form <https://www.auto2drive.com/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%A1%E0%B9%84%E0%B8%AD%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%A2/>

- [53] บัณญัติ โฉมงาม, ศิริประภา ร่มเย็น, & จันทร์สุดา คำต๋อย. (2011). การควบคุมมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลของชุมชนป่าแดด. *The Journal of Industrial Technology*, 7(2), 9-21.
- [54] AC Auto Service. (n.d.) DPF ในเครื่องยนต์ดีเซล. Retrieved 12 February, from <https://www.acautoservice.co.th/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [55] Jiaqiang, E., Luo, J., Han, D., Tan, Y., Feng, C., & Deng, Y. (2022). Effects of different catalysts on light-off temperature of volatile organic components in the rotary diesel particulate filter during the regeneration. *Fuel*, 310, 122451.
- [56] Ketkaew, S. (2019, July). The development of dust smoke eliminator using C-Ozonize electrical system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 572, No. 1, p. 012083). IOP Publishing
- [57] สุदारัตน์, & ขวัญอ่อน. รายงาน การวิจัยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับประยุกต์ในระบบพลังงานทดแทน.
- [58] White, H. J. (1963). *Industrial electrostatic precipitation*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [59] Hasler, P. H., & Nussbaumer, T. (1999). Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. *Biomass and bioenergy*, 16(6), 385-395.
- [60] ชนินทร์ วนนุชกุล, ภูมิศักดิ์ หวังสุข, & สุธีรยุทธ มาสำราญ. การใช้พัลส์สนามไฟฟ้าความเข้มสูงเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเหลว.
- [61] Intra, P., Limueadphai, P., & Tippayawong, N. (2010). Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a multiple tubular electrostatic precipitator. *Particulate Science and Technology*, 28(6), 547-565.
- [62] Intra, P., Limueadphai, P., & Tippayawong, N. (2010). Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a

- multiple tubular electrostatic precipitator. *Particulate Science and Technology*, 28(6), 547-565.
- [63] Intra, P., & Dussadee, N. (2007). Characterisation of wire-cylinder electrostatic precipitator for exhaust gas particles removal of biomass furnace. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 14(1), 29-39.
- [64] Assanavijit, V., & Intra, P. (2019). ผลของอุณหภูมิแก๊ส และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกันร่วม.
- [65] Fowler, R. H., & Nordheim, L. (1928). Electron Emission in Intense Electric Fields. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 119, 173-181.
- [66] ฉัตรชัย สิงห์อุตร, & ทศวรรษ โอวสุวรรณกุล. เครื่องบำบัดควันพิษในโอเลียร์ถยนต์.
- [67] Ketkaew, S. (2006). Ozone Gas Generation Using High Voltage at High Frequency Electric Field. *UBU Academic Journal*, 8(3), 96-107.
- [68] พานิช อินต๊ะ, ธเนศวร ศิริอาชวะวัฒน์, วุฒิพงษ์ เงินท็อก. (2021). การพัฒนา และการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องฟอกอากาศหลักการไฟฟ้าสถิต สำหรับกำจัดฝุ่นละอองและไปโอเอโรซอลจากอากาศภายในอาคาร. *Thai Science and Technology Journal*, 1072-1086.
- [69] วิสูตร อาสนวิจิตร, & กรพจน์ มะโนใจ. (2017). การพัฒนาต้นแบบระบบดักควันไฟฟ้าสถิตแบบการควบคุมวงจรปิด. *Journal of Innovative Technology Research*, 1(1), 71-84.
- [70] วิสูตร อาสนวิจิตร, พานิช อินต๊ะ, อนุกุล ปันสา. (2019). การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับกำจัดควันจากกระบวนการประกอบอาหารในครัวเรือน. *Thai Science and Technology Journal*, 566-587.]
- [71] ไชยวงศ์, มงคล, อาสน วิจิตร, วิสูตร, ยาวุฒิ, อาทิตย์, พานิช. การวิเคราะห์ผลของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่อการอัดประจุไฟฟ้าอนุภาคในเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต.

- [72] วิสูตร อาสนวิจิตร, ฐิติวัฒน์ ปันผาง, พานิช อินต๊ะ. (2018). การออกแบบและประเมินตัว ตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบหลายท่อสำหรับดักฝุ่นละอองขนาดเล็กจากโรงบ่มใบ ยาสูบ. *Journal of Science & Technology MSU*, 37(6).
- [73] ช ญา ศักดิ์ รัตน์ โชติ. การพัฒนาเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตสำหรับการดักจับเขม่า จากการเผาไหม้ไม้พิน (Doctoral dissertation).
- [74] สหสวรรค์ ภูจีระ, ฉัตรชัย เบญจปิยะพร, กฤษฏาภรณ์ เสนาวงษ์, โชคชัย ชูยอ้อย และสมพร เกษแก้ว. (2020). การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ใช้น้ำมันยางนา เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.
- [75] Lin, Y. C., Li, Y. C., Amesho, K. T., Chou, F. C., & Cheng, P. C. (2020). Filterable PM_{2.5}, Metallic Elements, and Organic Carbon Emissions from the Exhausts of Diesel Vehicles. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(6), 1319-1328.
- [76] NATE. (2014). How to Use a Multimeter. Retrieved 6 April 2021. From <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-a-multimeter>
- [77] SMI Instruments Co., Ltd. FLUKE - 80K-40 Probe, High Voltage Retrieved 20 February, form https://www.smi-i.com/b_product.php?product=199
- [78] Michael H and Chris Chaeha Lim. (2018). AirBeam2 Technical Specifications, Operation & Performance Retrieved 20 February, form <https://www.habitatmap.org/blog/airbeam2-technical-specifications-operation-performance>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	วัฒนา เชื้อล้นฟ้า
วันเกิด	29 กรกฎาคม 2540
สถานที่เกิด	ร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	14 หมู่ 1 ต.บ้านตูม อ.อาจสามารถ จ.ร้อยเอ็ด 45160
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2559 มัธยมปลาย โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย พ.ศ.2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม

พหุบัณฑิต ชีวะ