

ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในห้องทดสอบ  
จำลองแบบกึ่งปิด



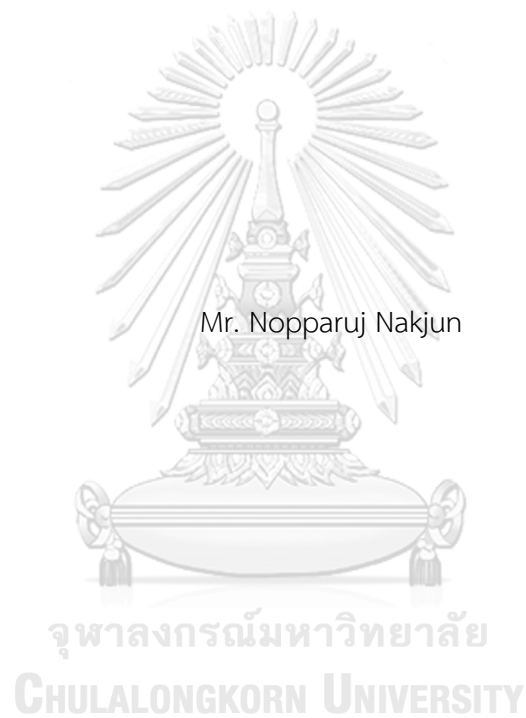
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Efficiency of surfactants for PM<sub>2.5</sub> reduction in a semi-closed testing chamber



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด
โดย	นายนพรุจ นาคจันทร์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พุกกษาสีทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา ฉัพพรรณรัตน์)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พุกกษาสีทธิ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง)	
.....	กรรมการ
(ดร.วัชรภรณ์ สุนสิน)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล)	

นพรุจ นาคจันทร์ : ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5

ไมครอน ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด. ( Efficiency of surfactants for PM<sub>2.5</sub> reduction in a semi-closed testing chamber) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ทรรศนีย์ พุกกาสิทธิ, อ.ที่ปรึกษาร่วม

: ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> โดยการปรับเปลี่ยนลักษณะวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ ได้แก่ ขนาดหัวฉีดพ่น แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีด และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ด้วยสารลดแรงตึงผิว 4 ชนิด ได้แก่ Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride และ Cocamidopropyl betaine โดยทำการทดสอบในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิด พร้อมทั้งวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวตามขนาดของอนุภาคฝุ่นหลังจากผ่านกระบวนการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเกาะรวมกันของฝุ่นละอองที่เปลี่ยนแปลงไป และลักษณะการไหลของฝุ่นละอองในระบบทดสอบด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลการศึกษพบว่า การฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสกาล ด้วยหัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว มีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> สูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 22 ± 1.4 ซึ่งปัจจัยที่เพิ่มประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ ระดับแรงดันฉีดพ่นและขนาดหัวฉีดพ่น (r = 0.775 และ 0.388 ตามลำดับ) ผลการทดสอบด้วยสารลดแรงตึงผิวพบว่า Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) โดยมีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 23.6 ± 1.4 แต่ประสิทธิภาพดีกว่าน้ำเพียงเล็กน้อย การกระจายตัวตามขนาดของอนุภาคเมื่อฉีดพ่น Tween-80, Cocamidopropyl betaine และ Benzalkonium chloride พบการกระจายของอนุภาคฝุ่นอยู่ในช่วงชั้นขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน แสดงถึงสารทั้ง 3 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารเกาะรวมที่ทำให้อนุภาค PM<sub>2.5</sub> มีขนาดใหญ่ขึ้น และลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองที่ฉีดพ่นด้วย Tween-80 มีลักษณะการเกาะรวมกันทางกายภาพของอนุภาคชัดเจนที่สุด แบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองในสถานะทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่นและขนาดหัวฉีดพ่นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดกั้นการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองที่ผ่านละอองน้ำได้ โดยส่งผลกระทบต่อชัดเจนที่สุดเมื่อฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ระดับแรงดัน 0.4 เมกะปาสกาล

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2564	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6280083320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: PM<sub>2.5</sub>, water spraying, surfactants, nozzle size, water pressure, number of nozzles  
 Nopparuj Nakjun : Efficiency of surfactants for PM<sub>2.5</sub> reduction in a semi-closed testing chamber. Advisor: Asst. Prof. TASSANEE CHETWITTAYACHAN, Ph.D. Co-advisor: Ratchanon Piemjaiswang, Ph.D.

The objectives of this study were to investigate the PM<sub>2.5</sub> removal efficiency by using different spraying methods with variations in spray nozzle size, spray pressure, and nozzles number, to examine the efficiency of four surfactants, including, Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride, and Cocamidopropyl betaine, for reducing PM<sub>2.5</sub> in a semi-closed testing chamber, to analyze the particle size distribution and morphological characteristics of the particle agglomeration after spraying water and surfactants, and to simulate the flow of particulate matter in the chamber by the computational fluid dynamics (CFD) technique. The results showed that water spraying with a nozzle diameter of 0.6 mm and at a pressure of 0.4 MPa gave the maximum average PM<sub>2.5</sub> reduction efficiency of 22% ± 1.4%. The factors that significantly increased the PM<sub>2.5</sub> removal efficiency were spraying pressure level and spray nozzle size ( $r = 0.775$  and  $0.388$ , respectively). 1% w/v Tween-80 could significantly remove PM<sub>2.5</sub> better than other surfactants at a 95% confidence interval ( $p$ -value < 0.05), with an average efficiency of 23.6% ± 1.4%, however, it was slightly better than that of water. The particle size distributions after spraying with Tween-80, Cocoamidopropyl betaine, and Benzalkonium chloride were found in the particle size range greater than 2.5 microns, indicating these compounds could enhance agglomeration of PM<sub>2.5</sub> and shift to larger particle sizes. In addition, the physical morphology of the particles sprayed with Tween-80 showed the most obvious particle agglomeration. The simulation result of the particle flow under the testing conditions demonstrated that increasing the spray pressure and nozzle size reinforced the PM removal efficiency of the sprayed water stream, in particular, the highest efficacy could be observed when spraying with a nozzle of 0.6 mm in size and water pressure of 0.4 MPa.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พลภักษาสิทธิ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ได้แนะนำแนวทางและความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย ตั้งแต่ขั้นวางแผนและออกแบบการวิจัย จนถึงขั้นตอนการตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังคอยช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และอบรมสั่งสอนผู้วิจัยในเรื่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสภามหาวิทยาลัย รังสิตศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ดร.วัชรภรณ์ สุนสิน และขอขอบพระคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกมหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัทธ์ พงษ์เกียรติกุล ที่ได้เสียสละเวลาในการตรวจสอบ แก้ไข และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรุตตม์ สหาวิน ที่ให้คำแนะนำในการออกแบบงานวิจัย และสนับสนุนพื้นที่ในการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ต้นจนจบ ขอขอบพระคุณภาควิชาสารานุกรมศาสตร์ คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ให้ความอนุเคราะห์ในการหยิบยืมให้เครื่องมือสำหรับการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล และขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ร.ต.อ.หญิง เกศษกรหญิง ดร.สุชาดา สุขห่อง คณาจารย์และนักวิจัยประจำคณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยอนุเคราะห์แนะนำและจัดสรรหาสารเคมีสำหรับนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากหลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการ “ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อลดการสัมผัสพีเอ็ม 2.5” ของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ช่วยสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเรื่อยมา ขอขอบคุณครอบครัวสหาวินที่ให้การช่วยเหลือในด้านต่างๆมากมายรวมถึงอนุเคราะห์ให้พื้นที่สำหรับดำเนินการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ที่คอยให้คำแนะนำสนับสนุน ให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือซึ่งกันและกันตลอดมา

นพรุจ นาคจันทร์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM <sub>2.5</sub> ).....	5
2.1.1 นิยามของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน.....	5
2.1.2 ประเภทของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน.....	5
2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานของ PM <sub>2.5</sub> .....	6
2.1.4 การแพร่กระจายของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร.....	9

2.1.5 แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร .....	10
2.1.6 การรับสัมผัสและผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน .....	13
2.1.7 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร .....	14
2.2 การควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร .....	15
2.2.1 การควบคุมที่แหล่งกำเนิด (Sources control) .....	15
2.2.2 การควบคุมระหว่างการแพร่กระจาย (Control during transmission).....	18
2.3 ทฤษฎีการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละออง (Agglomeration).....	18
2.3.1 การรวมตัวระหว่างอนุภาค (Particles agglomeration).....	18
2.3.2 การรวมตัวกันทางเคมี (Chemical agglomeration).....	19
2.3.3 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการรวมตัวของฝุ่นละอองในอากาศ.....	19
2.4 การใช้ละอองน้ำในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก .....	22
2.4.1 ปัจจัยด้านการฉีดพ่นละอองน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่น.....	24
2.5 การใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก.....	25
2.5.1 สารลดแรงตึงผิว .....	25
2.5.2 ปัจจัยด้านคุณสมบัติของสารที่ใช้ในการฉีดพ่นต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่น.....	28
2.6 เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) .....	32
บทที่ 3.....	34
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	34
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	35
3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	35
3.2.2 ช่วงเวลาดำเนินการศึกษาทดลอง .....	36
3.2.3 การเตรียมอุปกรณ์กำเนิดอนุภาค (dust generator).....	37
3.2.4 การวัดอัตราการไหลของอากาศจากเครื่องกำเนิดอนุภาค.....	38
3.2.5 การเตรียมอุปกรณ์ฉีดพ่นละออง .....	38



3.2.6 การวัดความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนทดลอง.....	38
3.2.7 การเตรียมเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที .....	39
3.2.8 การเตรียมกระดาษกรอง .....	39
3.2.9 การเตรียมอุปกรณ์ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ .....	39
3.2.10 วิธีการทดลอง.....	39
3.3 การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> ไมครอน (PM <sub>2.5</sub> ).....	43
3.3.1 การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> แบบอ่านค่าทันที.....	43
3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวตามน้ำหนักของ PM <sub>2.5</sub> .....	43
3.3.3 การสร้างแบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	44
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	50
3.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละออง (Removal efficiency).....	50
3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	50
บทที่ 4 .....	53
4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> ก่อนการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรง ตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด.....	53
4.1.1 ช่วงระยะเวลาการแพร่กระจายของ PM <sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	53
4.1.2 การทดสอบการแพร่กระจายของ PM <sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	54
4.2 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	56
4.2.1 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยลักษณะวิธีการฉีดพ่นต่างๆ .....	56
4.2.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ระหว่างการ ปรับเปลี่ยนขนาดหัวฉีดพ่น แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีดพ่นที่ใช้ .....	76
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดหัวฉีด จำนวนหัวฉีด และแรงดันฉีดพ่น ต่อประสิทธิภาพใน การลด PM <sub>2.5</sub> .....	78
4.3 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองสารลดแรงตึงผิว .....	81

4.4 การกระจายตัวตามขนาดของ $PM_{2.5}$ หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	85
4.5 ลักษณะการเกาะรวมทางกายภาพของ $PM_{2.5}$ หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	89
4.6 ลักษณะการไหลของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	95
บทที่ 5 .....	103
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	103
5.1.1 ประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ของการฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	103
5.1.2 ประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ของการฉีดพ่นละอองสารลดแรงตึงผิว.....	104
5.1.3 การกระจายตัวตามขนาดของ $PM_{2.5}$ หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด.....	104
5.1.4 ลักษณะการจับตัวกันทางกายภาพของ $PM_{2.5}$ หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	105
5.1.5 ลักษณะการไหลของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) .....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	106
บรรณานุกรม .....	108
ภาคผนวก .....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	119
ภาคผนวก ค.....	120
ภาคผนวก ง.....	123

ภาคผนวก จ.....	150
ภาคผนวก ฉ.....	154
ภาคผนวก ช.....	157
ภาคผนวก ซ.....	158
ประวัติผู้เขียน .....	161



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิด และลักษณะทางสัณฐานของกลุ่มอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน .....	7
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่มาจากการเผาธูป.....	12
ตารางที่ 3 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร.....	15
ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติความเป็นประจุของ PM <sub>2.5</sub> .....	29
ตารางที่ 5 รูปแบบการทดลอง.....	41
ตารางที่ 6 คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการจำลองการไหล.....	48
ตารางที่ 7 รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขต.....	49
ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัย ที่ใช้ในการทดลองแบบแฟกทอเรียล.....	51
ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	57
ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	59
ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	61
ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	63
ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	65
ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	67
ตารางที่ 15 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	69

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว .....	71
ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว.....	73
ตารางที่ 18 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ในรูปแบบและลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน .....	75
ตารางที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> .....	79
ตารางที่ 20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรของขนาดหัวฉีด แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีด .....	80
ตารางที่ 21 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิว .....	83
ตารางที่ 22 ลักษณะสัญญาณวิทยาตามการกระจายตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิว ในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิด .....	93
ตารางที่ 23 ปริมาณความเข้มข้น และความแตกต่างของ PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบการแพร่กระจายของ PM <sub>2.5</sub> ภายในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดเป็นเวลา 30 นาที.....	118
ตารางที่ 24 ค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้น และร้อยละความแตกต่างของ PM <sub>2.5</sub> จากชุดควบคุมการทดลอง .....	119
ตารางที่ 25 ความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนและระหว่างการทดสอบ .....	120
ตารางที่ 26 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด.....	123
ตารางที่ 27 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด.....	124
ตารางที่ 28 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด.....	125
ตารางที่ 29 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด.....	126
ตารางที่ 30 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด.....	127



ตารางที่ 44 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด.....	141
ตารางที่ 45 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด.....	142
ตารางที่ 46 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด.....	143
ตารางที่ 47 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด.....	144
ตารางที่ 48 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด.....	145
ตารางที่ 49 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด.....	146
ตารางที่ 50 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด.....	147
ตารางที่ 51 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด.....	148
ตารางที่ 52 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด.....	149
ตารางที่ 53 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v .....	150
ตารางที่ 54 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1% w/v .....	151
ตารางที่ 55 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v .....	152
ตารางที่ 56 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v .....	153
ตารางที่ 57 ผลการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 และ 200 มิลลิกรัม .....	154

ตารางที่ 58 ค่าอัตราการไหลของน้ำในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ .....	157
ตารางที่ 59 อัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลวในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ .....	157
ตารางที่ 60 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ระหว่างแรงดันฉีดพ่นแต่ละระดับด้วยสถิติ One-Way ANOVA.....	158
ตารางที่ 61 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ระหว่างการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีดด้วยสถิติ One-Way ANOVA .....	158
ตารางที่ 62 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ระหว่างหัวฉีดพ่นแต่ละขนาดด้วยสถิติ One-Way ANOVA.....	159
ตารางที่ 63 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฉีดพ่นแต่ละขนาดด้วยสถิติ Pearson correlation	159
ตารางที่ 64 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีดพ่นแต่ละระดับด้วยสถิติ Pearson correlation .....	159
ตารางที่ 65 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีดด้วยสถิติ Pearson correlation .....	160
ตารางที่ 66 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ระหว่างการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดด้วยสถิติ One-Way ANOVA .....	160



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ประเภทของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร.....	11
ภาพที่ 2 ศักยภาพในการสะสมในร่างกายของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดแตกต่างกัน .....	14
ภาพที่ 3 กลไกการรวมตัวกันทางเคมี.....	19
ภาพที่ 4 แผนผังกลไกการจับตัวกันของอนุภาคฝุ่นละอองกับละอองน้ำ .....	22
ภาพที่ 5 การรวมตัวของอนุภาคฝุ่นกับหยดน้ำที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	25
ภาพที่ 6 โมเลกุลส่วนหัวและหางของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	26
ภาพที่ 7 การจับตัวของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอนุภาคฝุ่นถ่านหิน.....	27
ภาพที่ 8 เส้นทางเดินของอนุภาค (Particle tracing) ในห้องปรับอากาศที่มีตู้วางของอยู่กลางห้อง .	32
ภาพที่ 9 โรงเรือนทดลอง (Chamber test) .....	34
ภาพที่ 10 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในโรงเรือนทดลอง .....	35
ภาพที่ 11 แบบจำลองอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคแบบประยุกต์.....	37
ภาพที่ 12 อุปกรณ์กำเนิดอนุภาคแบบประยุกต์ .....	37
ภาพที่ 13 อุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำ.....	38
ภาพที่ 14 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ฉีดพ่นละออง .....	38
ภาพที่ 15 ตู้อัดแปลงสำหรับใส่เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก .....	39
ภาพที่ 16 การดำเนินการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM <sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิด .....	41
ภาพที่ 17 แผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor).....	42
ภาพที่ 18 โปรแกรม Aeroqual series s500 monitor Software version 6.5.....	43
ภาพที่ 19 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด .....	45
ภาพที่ 20 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ด้านหน้า).....	45

ภาพที่ 21 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ด้านหลัง).....	46
ภาพที่ 22 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ตำแหน่งหัวฉีดพ่นละอองน้ำ) .....	46
ภาพที่ 23 จุดตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> .....	50
ภาพที่ 24 รายละเอียดลำดับขั้นตอนการศึกษา.....	52
ภาพที่ 25 ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> จากการทดสอบการแพร่กระจายของ PM <sub>2.5</sub> ระยะยาว (30 นาที) ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด.....	54
ภาพที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> บริเวณช่องเปิดขาเข้าและขาออกของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดจากชุดควบคุมการทดสอบทั้งหมด .....	55
ภาพที่ 27 ค่าร้อยละความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> จากชุดควบคุมการทดสอบทั้งหมด .....	56
ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	58
ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	60
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	62
ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	64
ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	66
ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	68
ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	70
ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว.....	72

ภาพที่ 36 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว..... 74

ภาพที่ 37 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการปรับเปลี่ยนรูปแบบและลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน ..... 75

ภาพที่ 38 ประสิทธิภาพการลด PM<sub>2.5</sub> กับแรงดันฉีดพ่น ของหัวฉีดขนาดต่างๆ..... 76

ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพการลด PM<sub>2.5</sub> กับการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีด ของแรงดันฉีดพ่นในระดับต่างๆ ..... 77

ภาพที่ 40 ประสิทธิภาพการลด PM<sub>2.5</sub> กับขนาดหัวฉีดพ่น ของการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีด ..... 78

ภาพที่ 41 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่น Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride และ Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v ..... 84

ภาพที่ 42 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ..... 84

ภาพที่ 43 โครงสร้างทางเคมีของ Tween-80 (Polysorbate 80)..... 85

ภาพที่ 44 ค่าร้อยละความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> จากการเก็บตัวอย่างคว้นรูปเปล่า ร่วมกับการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดในแต่ละระดับชั้นของขนาดอนุภาค..... 87

ภาพที่ 45 ค่า normalization ของความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> จากการเก็บตัวอย่างคว้นรูปเปล่า ร่วมกับการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดในแต่ละระดับชั้นของขนาดอนุภาค ..... 88

ภาพที่ 46 ลักษณะสัญญาณวิทยาตามการกระจายตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองที่มาจากคว้นรูปที่รวบรวมในช่วงชั้นต่างๆ (ที่กำลังขนาด 5,000 เท่า)..... 90

ภาพที่ 47 ลักษณะสัญญาณวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองจากคว้นรูป..... 91

ภาพที่ 48 เปรียบเทียบลักษณะทางสัญญาณวิทยาของอนุภาคที่พบในน้ำประปา..... 94

ภาพที่ 49 เปรียบเทียบลักษณะทางสัญญาณวิทยาของอนุภาค Benzalkonium chloride ..... 94

ภาพที่ 50 ลักษณะสัญญาณวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองจากตัวอย่างการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ชั้นกรองอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอน..... 95

ภาพที่ 51 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสภาวะที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ..... 96



ภาพที่ 61 คอนทัวร์การกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบ  
แบบกึ่งปิด..... 102

ภาพที่ 62 Control chart แสดงผลการซั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 มิลลิกรัม ..... 156

ภาพที่ 63 Control chart แสดงผลการซั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 200 มิลลิกรัม ..... 156



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ( $PM_{2.5}$ ) ที่มีปริมาณสูงขึ้นในบรรยากาศ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างมากโดยเฉพาะกับผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคาร และที่พักอาศัย ซึ่งกิจกรรมและสภาพแวดล้อมภายในอาคารเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้ก่อกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ได้ เช่น การใช้เชื้อเพลิงในการประกอบอาหารหรือให้ความร้อน การเคลื่อนไหวของบุคคลและสิ่งของภายในอาคารที่ทำให้เกิดฟุ้งกระจายกลับของฝุ่น (Re-suspension of particles) ที่มีอยู่แล้วบนพื้นผิวของวัสดุหรือสิ่งของในอาคารเป็นต้น โดยผลกระทบจากการรับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ของผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารทั้งในระยะสั้นและระยะยาว มีโอกาสทำให้เกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจและหลอดเลือดหัวใจได้อาจส่งผลกระทบต่อจนถึงขั้นทำให้เกิดการเสียชีวิตได้ในที่สุด (Martins & Carrilho da Graça, 2018) องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กล่าวไว้ว่า ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน มีความเสี่ยงต่อสุขภาพในระยะยาวที่รุนแรงกว่าฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ( $PM_{10}$ ) (ขนาดอนุภาคในช่วง 2.5-10 ไมครอน) โดยคาดว่าอัตราการเสียชีวิตจากการรับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.2-0.6 ต่อ 10 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร จากทุกสาเหตุของการเกิดโรคจากฝุ่นละออง ในขณะที่การรับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจะมีอัตราการเสียชีวิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 6-13 ต่อ 10 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร จากการเป็นโรคที่เกี่ยวข้องกับหลอดเลือดหัวใจ (World Health Organization, 2013)

หนึ่งในแหล่งกำเนิดหลักฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารที่สำคัญมาจากแหล่งกำเนิดภายนอกที่แพร่กระจายเข้ามาภายในอาคารด้วยอิทธิพลของกระแสลมที่พัดพาฝุ่นละอองเหล่านี้เข้าสู่ภายในอาคาร (Li, Wen, & Zhang, 2017) ซึ่งทำให้ปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่ภายนอกอาคารเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารที่เพิ่มมากขึ้น (United States. Environmental Protection Agency, 2017) โดยผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในและภายนอกอาคาร (I/O ratio) มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งสามารถระบุได้ว่าฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารได้รับอิทธิพลมากจากฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มีแหล่งกำเนิดมาจากภายนอกอาคารเป็นหลัก โดยฝุ่นละอองภายในอาคารและภายนอกอาคารมีความสัมพันธ์เชิง

บวกต่อกัน กล่าวคือ ฝุ่นละอองภายในอาคารได้รับอิทธิพลจากฝุ่นละอองภายนอกอาคาร เมื่อฝุ่นละอองภายนอกอาคารมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ฝุ่นละอองภายในอาคารจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกัน (ศิริภัทร อินทร์ตระกูล, ทรรศนีย์ พฤกษาสีทธิ, & นรุตม์ สหนาวิน, 2563)

การฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละออง เป็นวิธีการควบคุมฝุ่นละอองที่ใช้กันมาอย่างยาวนานและพบได้บ่อยครั้ง โดยวิธีการนี้จะทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่สามารถลอยตัวอยู่ในบรรยากาศได้ เนื่องจากฝุ่นละอองเหล่านี้จะถูกทำให้เปียกด้วยละอองน้ำและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคฝุ่น ทำให้อนุภาคมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและตกลงสู่พื้น (Kumar & Kumar, 2018) ถึงแม้ว่าการฉีดพ่นละอองน้ำจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่มีการศึกษาพบว่า การฉีดพ่นละอองน้ำมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนเพียงเท่านั้น ยิ่งอนุภาคฝุ่นละอองมีขนาดเล็กลงประสิทธิภาพในการลดฝุ่นของการฉีดพ่นละอองน้ำลดลงไปด้วย จากการศึกษาของ Wang et al. (2019) พบว่าขนาดของฝุ่นละอองส่งผลต่อประสิทธิภาพของการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่น โดยการฉีดพ่นละอองน้ำมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 85.02 ในขณะที่การฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 51.66 เท่านั้น

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและทดลองนำสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกลางในการรวมตัว (Agglomerant) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศ โดยหนึ่งในสารเคมีที่น่าสนใจคือสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติในการลดความตึงผิวของสารละลาย ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับระหว่างสารละลายและสารที่มีสถานะต่างกัน (ของแข็งและแก๊ส) (Nakama, 2017) อีกทั้งสารลดแรงตึงผิวยังมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นตัวกลางในการรวมตัวกับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนได้ดี เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปจับกับพื้นผิวของอนุภาค ทำให้ค่าความตึงผิวลดลงและกลายเป็นฟิล์มของเหลวเพื่อเป็นโครงสร้างที่ช่วยให้อนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กเกิดการจับตัวระหว่างกันได้ง่ายยิ่งขึ้น ทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้นจนไม่สามารถลอยตัวอยู่ในอากาศได้และตกลงสู่พื้น (Bin et al., 2018) โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มอัตราการเกาะรวม (agglomeration) ของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนในอากาศ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนดียิ่งขึ้น (Bin et al., 2018; Tang, Zhao, Sun, Hu, & Han, 2016; Tessum & Raynor, 2017; P. Wang, Han, Tian, Liu, & Jiang, 2020; Xu, Chen, Eksteen, & Xu, 2018) ในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำและสารลดแรงตึงผิวในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่

เกิน 2.5 ไมครอนในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดด้วยวิธีการฉีดพ่นละออง และศึกษาการปรับเปลี่ยนลักษณะวิธีการฉีดพ่นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน การศึกษานี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษา การประยุกต์ใช้สารเคมี และพัฒนาวิธีการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนในอากาศด้วยวิธีการฉีดพ่นละอองต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้น้ำและสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดด้วยวิธีการฉีดพ่นละออง

1.2.2 เพื่อศึกษารูปแบบวิธีการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ด้วยเครื่องฉีดพ่นละออง ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิด

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 การฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิว มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ  $PM_{2.5}$  ได้มากกว่าการฉีดพ่นด้วยน้ำ

1.3.2 ขนาดของหัวฉีดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  มากกว่า แรงดันของการฉีดพ่น

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 พื้นที่ศึกษา/สถานที่ทำการทดลอง  
ดำเนินการทดลองการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในโรงเรือนจำลองห้องทดสอบที่มีระบบระบายอากาศแบบกึ่งปิดขนาดความกว้าง 3 เมตร ความลึก 2 เมตร และความสูง 2 เมตร

1.4.2 ระยะเวลาในการทดลอง  
ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิว ในการลด  $PM_{2.5}$  ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 โดยการทดลองแต่ละครั้งจะทำการฉีดพ่นสารและตรวจวัดข้อมูลปริมาณ  $PM_{2.5}$  อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 15 นาที

1.4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง



วิเคราะห์ประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิว ภายในห้องทดสอบแบบกึ่งปิด โดยใช้เครื่อง Aeroqual series 500 วัดปริมาณ  $PM_{2.5}$  แบบอ่านค่าทันทีในบริเวณจุดก่อนและหลังผ่านม่านฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  เฉลี่ยรายนาที่มาวิเคราะห์แนวโน้ม และประสิทธิภาพสารลดแรงตึงผิว ในการลด  $PM_{2.5}$  ด้วยวิธีการคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละออง (Removal efficiency) โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  กับการฉีดพ่นด้วยน้ำและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับเปลี่ยนรูปแบบการฉีดพ่นสารที่แตกต่างกัน และศึกษาลักษณะการเกาะรวมระหว่าง  $PM_{2.5}$  กับน้ำและสารลดแรงตึงผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และสร้างแบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองในการทดลองด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาคุณสมบัติการลด  $PM_{2.5}$  ของสารลดแรงตึงผิวและน้ำ เพื่อใช้ในการพัฒนาสารผลิตภัณฑ์เพื่อลด  $PM_{2.5}$  และเป็นแนวทางในการศึกษาและต่อยอดงานวิจัยต่อไปในอนาคต

1.5.2 เป็นข้อมูลแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงการลดปริมาณ  $PM_{2.5}$  ในอากาศด้วยวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM<sub>2.5</sub>)

##### 2.1.1 นิยามของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

US.EPA ได้อธิบายลักษณะของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM<sub>2.5</sub>) ว่า เป็นฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 ไมครอนลงมา จัดอยู่ในชนิดฝุ่นละเอียด (Fine particle) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของมนุษย์ที่โดยเฉลี่ยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 ไมครอนโดยมีขนาดใหญ่กว่า PM<sub>2.5</sub> ถึง 30 เท่า ซึ่งเป็นฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ในชั้นบรรยากาศแล้วเกิดเป็นฝุ่นละออง (United States Environmental Protection Agency, 2018)

##### 2.1.2 ประเภทของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

การจำแนกประเภทของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM<sub>2.5</sub>) หรือฝุ่นละเอียดในอากาศสามารถจำแนกได้ตามลักษณะการเกิดของฝุ่นละออง (Wilson and Suh, 1997) ได้แก่

###### 2.1.2.1 ฝุ่นละเอียดปฐมภูมิ (Primary fine particle)

คือ ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มีที่มาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น การเผาไหม้น้ำมันดีเซลจากยานพาหนะ การเผาในที่โล่ง อุตสาหกรรมการผลิตเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์สูง

###### 2.1.2.1 ฝุ่นละเอียดทุติยภูมิ (Secondary fine particle)

คือ ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มาจากการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในบรรยากาศหลังจากที่ฝุ่นถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดได้ระยะหนึ่งและทำปฏิกิริยากับสารอื่นในบรรยากาศ โดยฝุ่นประเภทนี้อาจกลายเป็นอนุภาคใหม่หรือมีอนุภาคคงเดิมแต่มีองค์ประกอบของอนุภาคเพิ่มขึ้น เช่น ฝุ่นละอองที่เกิดจากการออกซิเดชัน (Oxidation) ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ฝุ่นละอองที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเพื่อสร้างอนุภาคขนาดเล็กอื่นๆ ของแอมโมเนียมไนเตรตได้ เป็นต้น

### 2.1.3 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางสัณฐานของ PM<sub>2.5</sub>

#### 2.1.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

ฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในบรรยากาศโดยทั่วไป รวมถึงฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจะมีปริมาณความเข้มข้นและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง โครงสร้างการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การจับตัวเป็นก้อน (Coagulation) การควบแน่น (Condensation) การระเหย (Evaporation) การดูดซับ (Absorption) ที่เกิดขึ้นตลอดเวลาซึ่งจะมีผลต่อการแพร่กระจาย (Diffusion) และการตกลงสู่พื้นดินของฝุ่นละออง จากสภาพเหล่านี้ทำให้ทั้งปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองเปลี่ยนแปลงไปด้วย มวลของฝุ่นละอองส่วนใหญ่ในเขตเมืองและเขตชานเมืองมักจะหมายถึงการรวมตัวกันขององค์ประกอบทางเคมีดังต่อไปนี้ ซึ่งอยู่ในรูปแบบฝุ่นละอองปฐมภูมิ และทุติยภูมิ (ธนวัฒน์ แซ่สวัสดิ์, 2548)

1) สารประกอบซัลเฟต (Sulfate compound) ในอากาศอยู่ทั้งในรูปที่เป็นอนุภาคปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยรูปทั่วไปของสารประกอบซัลเฟตที่พบมากในฝุ่นละอองในอากาศ คือ แอมโมเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมไบซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก สารประกอบเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่ถูกผลิตโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปเป็นซัลเฟตในฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิด แหล่งกำเนิดของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2) สารประกอบไนเตรต (Nitrate compound) ที่พบในฝุ่นละอองมากที่สุด คือ แอมโมเนียมไนเตรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปผันกลับได้ไปมาระหว่างก๊าซและอนุภาค (Gas-to-particle equilibrium) ระหว่างกรดแอมโมเนียและรูปกรดไนตริก และฝุ่นแอมโมเนียมไนเตรต เนื่องจากสมดุลสามารถผันกลับได้ ทำให้อนุภาคที่ประกอบด้วยแอมโมเนียมไนเตรตสามารถระเหยสู่อากาศได้โดยขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

3) สารประกอบแอมโมเนียม (Ammonium compound) ในฝุ่นละอองจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมไบซัลเฟต และแอมโมเนียมไนเตรต โดยแอมโมเนียมซัลเฟตและแอมโมเนียมไบซัลเฟตเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกและแอมโมเนียที่ไม่สามารถผันกลับได้

4) คาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon) สารอินทรีย์ที่พบในฝุ่นละอองที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบหลายชนิดโดยประกอบด้วยสารประกอบของคาร์บอนมากกว่า 20 อะตอม แหล่งกำเนิดของคาร์บอนอินทรีย์มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและฝุ่นจากถนน

5) คาร์บอนอินทรีย์ (Elemental carbon) เป็นสารประกอบที่ใช้ติดตามตรวจสอบ (Tracer) ฝุ่นละอองที่มากจากการเผาไหม้ซึ่งจะพบสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ปริมาณน้อยในฝุ่นดินและละอองลอยจากทะเล ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์จะแปรผันตามปริมาณคาร์บอนอินทรีย์

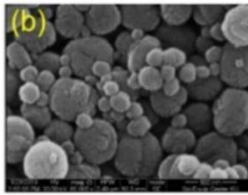
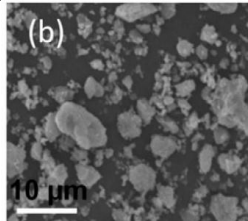
6) น้ำ (Water) เป็นตัวทำละลายสารประกอบประเภทต่างๆ เช่น สารประกอบไนเตรท ซัลเฟต แอมโมเนียม โซเดียม คาร์บอนอินทรีย์ และคาร์บอนอินทรีย์ได้ โดยฝุ่นละอองจะดูดซับไอน้ำที่อยู่ในอากาศ

7) Geological material โดยฝุ่นแขวนลอยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยออกไซด์ของอะลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม โทเทเนียม เหล็ก และออกไซด์ของโลหะอื่นๆ กระบวนการรวมตัวของสารประกอบนี้เกิดจากกระบวนการทางธรณีวิทยา และกระบวนการทางอุตุนิยมวิทยา ธาตุที่พบโดยการวิเคราะห์โดยการฉายรังสีเอกซ์ในฝุ่นละอองขนาดเล็กคือ ซัลเฟอร์และอะลูมิเนียม ซึ่งจะพบในฝุ่นดิน (Clay) โดยอยู่ในรูปสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต

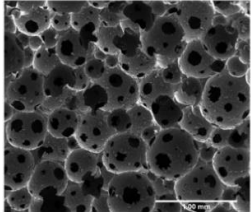
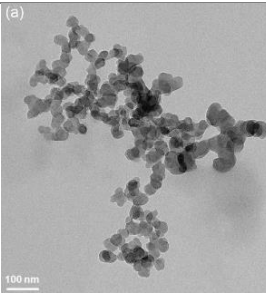
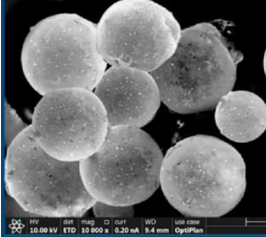
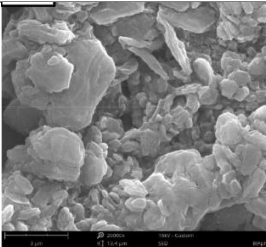
### 2.1.3.2 ลักษณะทางสัญญาณของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

ลักษณะทางสัญญาณของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่ โดยสามารถสรุปลักษณะทางสัญญาณจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิด และลักษณะทางสัญญาณของกลุ่มอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

กลุ่มของอนุภาคฝุ่นละออง	แหล่งกำเนิด	ลักษณะทางสัญญาณ	ที่มา	รูปประกอบ
อะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate)	พบมากในเขตอุตสาหกรรม เป็นอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มาจากวัสดุก่อสร้าง การสัญจรของยานพาหนะในพื้นที่ และฝุ่นเถ้าลอยที่มากจากการเผา	รูปร่างเชิงมุม หลายเหลี่ยมจนไปถึงทรงกลม	(Ramanathan, Gopinath, Arshad, & Poopalan, 2020)	 ที่มา : (Ramanathan et al., 2020)
แคลเซียมเข้มข้น (Calcium-rich)	พบมากในเขตอุตสาหกรรม เป็นกลุ่มอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มากจากการพังทลายของดินและหิน และการใช้วัสดุก่อสร้างที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์	รูปร่างเชิงมุม หลายเหลี่ยมจนไปถึงทรงกลม	(El-Sherbiny, El-Sheikh, & Barhoum, 2015; Khaliullin et al., 2019)	 ที่มา : (El-Sherbiny et al., 2015)

ตารางที่ 1 (ต่อ) แหล่งกำเนิด และลักษณะทางสัณฐานของกลุ่มอนุภาคฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน

กลุ่มของอนุภาคฝุ่น ละออง	แหล่งกำเนิด	ลักษณะทาง สัณฐาน	ที่มา	รูปประกอบ
คาร์บอน ( Biological carbon)	พบมากในพื้นที่ชนบทและ สวนสาธารณะ เป็นกลุ่มอนุภาคฝุ่น ละอองขนาดเล็กที่มาจากอนุภาค ทางชีวภาพ (ละอองเกสร, สปอร์ และเศษของพืช)	รูปร่างทรงกลม หรือทรงรีแบบ สมมาตร	(Narasimman, Vijayan, & Prabhakaran, 2014)	 ที่มา: (Narasimman et al., 2014)
เขม่าควัน (Soot)	พบมากในเขตเมือง ซึ่งเป็นกลุ่ม อนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มา จากการเผาไหม้สารอินทรีย์และ เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ของ เครื่องยนต์จากยานพาหนะ	รูปร่างเป็น เส้นตรงมาก ไป จนถึงรูปร่างเส้นที่ มีการแตกแขนง ออกไป โดย ส่วนมากจะจับตัว กันในลักษณะเป็น กลุ่มก้อน	(X. Liu et al., 2020; Zhu, Shang, & Zhu, 2020)	 ที่มา: (Zhu et al., 2020)
ซีโนสเฟียร์ (Cenosphere)	พบมากในเขตเมือง ซึ่งเป็นกลุ่ม อนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มา จากการจราจร และการเผาไหม้ที่ ไม่สมบูรณ์ของดีเซล น้ำมัน เชื้อเพลิง และมากจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงถ่านหิน	รูปร่างทรงกลม	(Huo, Yan, Li, Li, & Huang, 2009; X. Wang, Zhang, Liu, Liang, & Zhang, 2019)	 ที่มา: (X. Wang et al., 2019)
เกลือโซเดียมคลอไรด์ ( Salts of sodium chloride)	เป็นกลุ่มอนุภาคฝุ่นละอองขนาด เล็กที่มาจากละอองลอยในทะเล	รูปร่างไม่แน่นอน ส่วนมากจะมี รูปร่างทรงเหลี่ยม เป็นบล็อก (Blocky)	(Han, Guene Lougou, Xu, Shuai, & Huang, 2020)	 ที่มา: (Han et al., 2020)

#### 2.1.4 การแพร่กระจายของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

ฝุ่นละอองมีลักษณะการแพร่กระจายที่ต่างกัน เนื่องจากอนุภาคของฝุ่นละอองมีความหลากหลายขององค์ประกอบทางเคมี และมีลักษณะการรวมตัวทางกายภาพที่แตกต่างกัน (อยู่ในลักษณะของเหลวหรือของแข็ง) โดยอนุภาคฝุ่นละอองสามารถจำแนกได้ตามขนาด กลไกการก่อตัว แหล่งกำเนิด องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะการคงตัวในบรรยากาศ ซึ่งการจำแนกลักษณะของอนุภาคฝุ่นละอองเหล่านี้สามารถบ่งบอกความแตกต่างของแหล่งกำเนิด กระบวนการก่อตัว องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะและระยะเวลาการคงตัวในชั้นบรรยากาศ และระยะทางการเคลื่อนที่หรือการแพร่กระจายในบรรยากาศของฝุ่นละอองที่มีลักษณะแตกต่างกันได้ (United States Environmental Protection Agency, 1996)

ระดับการแพร่กระจายของความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่ภายนอกอาคาร ประเภทของการระบายอากาศ ระบบกรองอากาศ แหล่งกำเนิดภายในอาคาร และกิจกรรมของบุคคลที่อาศัยอยู่ภายในอาคาร เป็นต้น (United States Environmental Protection Agency, 2017) จากการศึกษาพบว่า ระบบระบายอากาศภายในอาคารมีส่วนช่วยให้ระดับการแพร่กระจายของฝุ่นละอองภายในอาคารลดลงได้ ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่แพร่กระจายอยู่ในอาคารจะขึ้นอยู่กับรูปแบบและลักษณะของการระบายอากาศของห้องที่อยู่ในอาคาร โดยภายในห้องที่มีระบบไหลเวียนอากาศจะทำให้ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในห้องลดน้อยลงและลดระดับการแพร่กระจายของฝุ่นละอองได้ดีกว่าห้องที่มีระบบระบายอากาศจากธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (Ma, Jiang, & Li, 2015) นอกจากนี้อุปกรณ์ฟอกอากาศภายในอาคารมีส่วนทำให้ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารมีปริมาณน้อยกว่าภายนอกอาคาร และเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารหรือที่พักอาศัยที่ไม่มีอุปกรณ์ฟอกอากาศแล้วความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารและนอกอาคารมีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันเท่าไรนัก (Dai, Liu, Li, & Zhao, 2018) เนื่องจากภายในอาคารที่ใช้ระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติหรือการเปิดหน้าต่างเพียงอย่างเดียวจะส่งผลให้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร แปรผันตามปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายนอกอาคาร ด้วยอิทธิพลของกระแสลมที่พัดเข้ามาในตัวอาคารโดยที่ไม่มีระบบกรองอากาศและอุปกรณ์ที่ช่วยในการลดปริมาณฝุ่นละอองที่เข้ามาภายในอาคาร (Qu, Wang, Zhu, & Ji, 2017)

### 2.1.5 แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารมีที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกั น เช่น การใช้เชื้อเพลิงในการประกอบอาหารและให้ความร้อน หรือการฟุ้งกระจายกลับของฝุ่นละอองที่อยู่บนพื้นผิววัสดุจากการเคลื่อนที่ของบุคคลหรือวัตถุที่อยู่ภายในอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้ อิทธิพลจากแรงลมที่พัดพาฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจากภายนอกเข้ามาในอาคารเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดหลักเช่นกัน โดยเฉพาะภายในอาคารที่ใช้ระบบระบายอากาศตามธรรมชาติ หรือใช้อุปกรณ์ที่มีอัตราการระบายอากาศต่ำหรือไม่มียระบบกรองอากาศภายในตัว (Martins & Carrilho da Graça, 2018)

#### 2.1.5.1 ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มาจากแหล่งกำเนิดภายในและภายนอกอาคาร

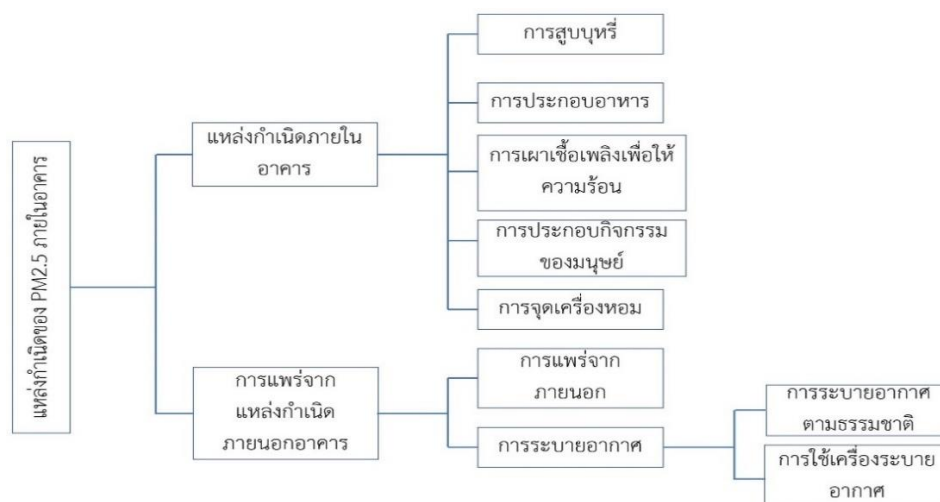
แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ (Li et al., 2017) ได้แก่ แหล่งกำเนิดภายในอาคารและการแพร่จากแหล่งกำเนิดภายนอกอาคารดังภาพที่ 1

- แหล่งกำเนิดภายในอาคาร ได้แก่ การสูบบุหรี่ การใช้เชื้อเพลิงในการประกอบอาหารและให้ความร้อน กิจกรรมของมนุษย์ และการจุดเครื่องหอม เป็นต้น โดยแหล่งกำเนิดภายในอาคารของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่สำคัญคือการประกอบอาหาร โดยเฉพาะการใช้กระทะผัดทอดและการย่าง นอกจากนี้การจุดเครื่องหอมยังเป็นแหล่งกำเนิดของสารเคมีในกลุ่มพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) คาร์บอนมอนอกไซด์ เบนซีน ไอโซพรีน ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน และฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน

- การแพร่จากแหล่งกำเนิดภายนอกอาคาร เช่น ฝุ่นจากพื้นดิน มลพิษจากรถยนต์ (รถยนต์ที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง เบนซีน และดีเซล) การเผาถ่าน กิจกรรมทางอุตสาหกรรม การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของอนุภาคในบรรยากาศภายนอกอาคาร เป็นต้น และเกิดการแลกเปลี่ยนของอากาศจากภายนอกสู่ภายในอาคาร ทำให้ปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารเพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของการแพร่จากแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายนอกอาคาร

โดยแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังภาพที่ 1

จากการศึกษาของ ศิริภัทร อินทร์ตระกูล, ทรรศนีย์ พฤกษาสีสิทธิ์ และ นรุตดม สหนาวิน (2563) พบว่าฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารได้รับอิทธิพลมาจากฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มีแหล่งกำเนิดมาจากภายนอกอาคารเป็นหลัก เนื่องจากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในและภายนอกอาคาร (I/O ratio) มีค่าน้อยกว่า 1



ภาพที่ 1 ประเภทของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร  
ที่มา: (Li et al., 2017)

### 2.1.5.2 ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจากการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในอาคารที่สำคัญ โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มาจากการเผาไหม้ซึ่งอยู่ในรูปของสารที่มีสถานะเป็นของแข็ง และก๊าซ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นต้น (J. Kim, Kim, & Lee, 2020) งานวิจัยที่ผ่านมาได้ระบุไว้ว่าอนุภาคฝุ่นละอองที่มาจากธูปมีลักษณะทางกายภาพ เช่น มุมสัมผัส (Contact angle) และขนาดของอนุภาค รวมถึงลักษณะขององค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกัน (Xia & Chen, 2020) โดยอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มาจากธูปมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 0.3 – 10 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยทั่วไปในบรรยากาศ (Sabirova, Wang, Falca, Hong, & Nunes, 2021) ดังนั้นควันที่มาจากการเผาไหม้จึงเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่สำคัญ ซึ่งเป็นปัญหาที่ผู้คนส่วนมากให้ความสำคัญและตระหนักถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของบุคคลทั่วไปทั้งผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารและภายนอกอาคาร (B. Wang, Lee, & Ho, 2006)



จากงานวิจัยของ See และ Balasubramanian (2011) ที่ได้ศึกษาในเรื่องของปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มาจาก การเผาธูป พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดอื่นแล้ว การเผาธูปสามารถปล่อยมลพิษทางฝุ่นละอองได้มากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือเชื้อเพลิงชีวภาพในปริมาณการเผาที่เท่ากัน นอกจากนี้ปริมาณการปล่อยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจากการเผาธูปยังมีปริมาณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดที่มาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อื่นๆ ในบรรยากาศ เช่น การสูบบุหรี่ หรือการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการประกอบอาหาร อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มาจาก การเผาธูป ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนรวม (Total carbon) ธาตุคาร์บอน (Elemental carbon) อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) โลหะหนักต่างๆ กว่า 13 ชนิด สารอนินทรีย์ไอออน (Inorganic ions) และองค์ประกอบของแร่ธาตุอื่นๆรวมแล้วประมาณ 40 ชนิด โดยผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่มาจาก การเผาธูปแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่มาจาก การเผาธูป

Emission factors of particulate pollutants in incense smoke per unit time.

Pollutant		Brand 1	Brand 2	Brand 3	Brand 4	Brand 5	Brand 6
EC	(mg h <sup>-1</sup> )	0.50 ± 0.07	1.45 ± 0.18	0.93 ± 0.09	1.59 ± 0.34	0.02 ± 0.01	4.36 ± 0.72
OC	(mg h <sup>-1</sup> )	28.3 ± 3.1	25.9 ± 3.0	12.7 ± 1.9	14.2 ± 0.9	0.37 ± 0.05	40.1 ± 5.9
Al	(µg h <sup>-1</sup> )	173.0 ± 59.9	449.4 ± 101.1	65.5 ± 2.7	156.9 ± 28.0	0.98 ± 0.10	31.3 ± 5.7
WS Al	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	0.044 ± 0.010	0.18 ± 0.04
As	(µg h <sup>-1</sup> )	0.005 ± 0.001	0.010 ± 0.006	BDL	0.004 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.10 ± 0.06
WS As	(µg h <sup>-1</sup> )	0.002 ± 0.001	0.005 ± 0.002	BDL	0.001 ± 0.000	BDL	0.006 ± 0.000
Cd	(µg h <sup>-1</sup> )	0.028 ± 0.001	0.11 ± 0.04	0.025 ± 0.002	0.12 ± 0.06	0.007 ± 0.001	0.007 ± 0.000
WS Cd	(µg h <sup>-1</sup> )	0.023 ± 0.008	0.054 ± 0.002	0.005 ± 0.003	0.029 ± 0.005	0.002 ± 0.001	BDL
Co	(µg h <sup>-1</sup> )	0.24 ± 0.05	0.33 ± 0.06	0.079 ± 0.010	0.15 ± 0.03	BDL	0.001 ± 0.001
WS Co	(µg h <sup>-1</sup> )	0.011 ± 0.005	0.014 ± 0.008	0.001 ± 0.001	0.010 ± 0.005	BDL	BDL
Cr	(µg h <sup>-1</sup> )	3.19 ± 0.99	5.47 ± 2.19	1.14 ± 0.46	0.83 ± 0.47	0.078 ± 0.023	0.43 ± 0.08
WS Cr	(µg h <sup>-1</sup> )	0.020 ± 0.011	BDL	0.007 ± 0.003	0.029 ± 0.008	BDL	0.045 ± 0.001
Cu	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	31.8 ± 18.4	4.30 ± 2.49	3.54 ± 2.05	0.68 ± 0.22	5.83 ± 1.26
WS Cu	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Fe	(µg h <sup>-1</sup> )	449.0 ± 59.5	762.5 ± 140.6	207.0 ± 4.7	361.2 ± 68.2	0.49 ± 0.07	121.5 ± 2.6
WS Fe	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Mn	(µg h <sup>-1</sup> )	0.20 ± 0.06	0.57 ± 0.31	0.13 ± 0.06	0.084 ± 0.039	0.003 ± 0.001	0.080 ± 0.023
WS Mn	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	0.017 ± 0.010	0.002 ± 0.001	0.065 ± 0.008
Ni	(µg h <sup>-1</sup> )	1.06 ± 0.33	2.28 ± 0.50	0.27 ± 0.14	0.36 ± 0.11	0.011 ± 0.004	0.084 ± 0.019
WS Ni	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	0.26 ± 0.15	0.056 ± 0.013	0.15 ± 0.05	0.004 ± 0.002	0.038 ± 0.017
Pb	(µg h <sup>-1</sup> )	4.18 ± 1.75	17.6 ± 8.5	0.15 ± 0.05	33.5 ± 19.1	0.096 ± 0.029	0.14 ± 0.04
WS Pb	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	0.13 ± 0.07	0.014 ± 0.006	0.042 ± 0.010
Ti	(µg h <sup>-1</sup> )	0.52 ± 0.30	13.3 ± 7.7	1.62 ± 0.93	BDL	0.47 ± 0.14	24.1 ± 7.2
WS Ti	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.40 ± 0.11
V	(µg h <sup>-1</sup> )	0.21 ± 0.03	0.34 ± 0.05	0.094 ± 0.004	0.13 ± 0.03	0.002 ± 0.001	0.036 ± 0.008
WS V	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.001 ± 0.000
Zn	(µg h <sup>-1</sup> )	5.68 ± 0.51	1.75 ± 0.56	2.48 ± 0.21	7.27 ± 1.78	0.63 ± 0.25	0.74 ± 0.03
WS Zn	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.33 ± 0.10
Li <sup>+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	3.1 ± 1.8	BDL	BDL	3.7 ± 2.2	BDL	BDL
Na <sup>+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	228 ± 15	252 ± 41	183 ± 18	316 ± 76	4.9 ± 2.8	42 ± 12
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	42 ± 24	BDL	BDL	0.4 ± 0.2	1.1 ± 0.3	2.5 ± 1.1
K <sup>+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	236 ± 6	181 ± 22	70 ± 3	405 ± 17	38 ± 3	564 ± 65
Mg <sup>2+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Ca <sup>2+</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
F <sup>-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	BDL	0.2 ± 0.1	BDL	BDL	BDL	BDL
Cl <sup>-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	114 ± 5	61 ± 18	0.6 ± 0.3	276 ± 14	14 ± 0	225 ± 20
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	4.3 ± 2.5	BDL	0.6 ± 0.3	2.0 ± 1.2	BDL	BDL
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	71 ± 10	8.7 ± 2.9	26 ± 1	24 ± 14	2.9 ± 0.0	70 ± 4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	100 ± 38	141 ± 49	8.7 ± 1.9	19 ± 4	1.4 ± 0.1	22 ± 3
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	(µg h <sup>-1</sup> )	157 ± 87	395 ± 228	184 ± 81	80 ± 10	2.1 ± 0.7	59 ± 20

ที่มา: (See & Balasubramanian, 2011)

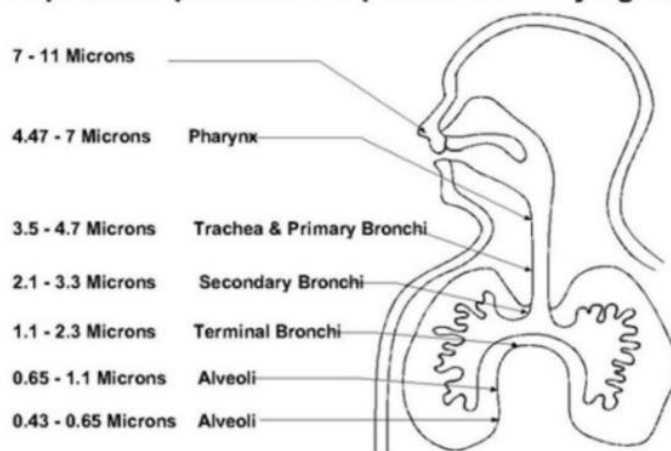
### 2.1.6 การรับสัมผัสและผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน

มนุษย์รับสัมผัสฝุ่นละอองเข้าสู่ร่างกายผ่านการหายใจเป็นส่วนมาก โดยระบบทางเดินหายใจมีกระบวนการที่สามารถป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่ให้เข้าสู่ปอดได้ทั้งหมด จึงมีเพียงฝุ่นละอองบางส่วนเท่านั้นที่ผ่านการกรองของจมูกเข้าไปได้ เมื่อฝุ่นละอองเข้าไปสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนกลางจะมีเมือก (Mucus) และซิเลีย (Cilia) ที่คอยดักจับทำให้อนุภาคฝุ่นละอองถูกขับออกมาในรูปของเสมหะหรือการไอ นอกจากนี้ยังมีฝุ่นละอองบางส่วนที่เข้าถึงถุงลมปอด (Alveoli) ซึ่งเป็นบริเวณหมุนเวียนของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (วิลาวรรณ คำหาญ, 2560)

จากการศึกษาในหลายงานวิจัยพบว่าขนาดของอนุภาคฝุ่นมีผลต่อศักยภาพในการก่อเกิดปัญหาสุขภาพอย่างมากในมนุษย์ โดยฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมครอน ทำให้เกิดโรคหอบหืดได้ และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถแพร่เข้าไปยังกระแสเลือดของมนุษย์ได้ โดยปริมาณของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในบรรยากาศจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเพิ่มของผู้ป่วยโรคหัวใจหรือโรคปอด เช่น โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคหัวใจล้มเหลว และโรคหอบหืดหรือโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (Chronic obstructive pulmonary disease, COPD) โดยเฉพาะเด็กและผู้สูงอายุ ผู้ป่วยโรคหัวใจและโรคหอบหืดจะมีอัตราเสี่ยงสูงกว่าคนทั่วไป จากการศึกษาเชื่อมโยงอาการของผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการรับสัมผัสฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน พบว่าผู้ป่วยมักมีอาการต่างๆ ได้แก่ การระคายเคืองตา จมูก และลำคอ มีอาการรุนแรงของโรคหลอดเลือดหัวใจและระบบทางเดินหายใจ จนถึงขั้นเสียชีวิตจากโรคหัวใจหรือโรคปอด (United States Environmental Protection Agency, 2017)

จากภาพที่ 2 แสดงถึงความสามารถในการแทรกซึมเข้าสู่ร่างกายของฝุ่นละอองแต่ละขนาด โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถเข้าไปได้ถึงปลายสุดของทางเดินหายใจในส่วนถุงลมปอดซึ่งเป็นบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของร่างกายและทำให้เนื้อเยื่อในบริเวณนี้ถูกทำลาย อีกทั้งสามารถทะลุผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของหลอดเลือดเข้าสู่กระแสเลือดได้โดยตรงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของหลอดเลือดที่ทำให้เกิดผลกระทบร้ายแรงต่อระบบไหลเวียนเลือดและหัวใจในมนุษย์ (Alberni-Clayoquot, 2020)

### Deposition potential for particles of varying sizes



ภาพที่ 2 ศักยภาพในการสะสมในร่างกายของอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดแตกต่างกัน  
ที่มา: (Alberni-Clayoquot, 2020)

#### 2.1.7 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

ในปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร ดังนั้นค่ามาตรฐานของไทยที่ยกมาเป็นเพียงแค่มาตรการฉบับร่างของสำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2559 เท่านั้น ซึ่งค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารของสำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร และองค์กรหรือหน่วยงานอื่นในต่างประเทศ มีค่ามาตรฐานมากน้อยแตกต่างกัน เนื่องจากค่าพื้นฐานที่มาจากการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่มีผลต่อสุขภาพ รวมไปถึงวัตถุประสงค์ในการกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นละอองของแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของแต่ละหน่วยงานหรือองค์กรนั้นในการตัดสินใจและพิจารณาความเป็นไปได้ของโอกาสในการเกิดผลกระทบ ความเป็นพิษ และการแพร่กระจายของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนไปจนถึงความเป็นไปได้ที่จะบังคับใช้ค่ามาตรฐานดังกล่าวอีกด้วย โดยตารางที่ 3 แสดงถึงค่ามาตรฐานของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ของไทยและต่างประเทศไว้ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

หน่วยงาน/องค์กร	ค่ามาตรฐานฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน
ประกาศกรมอนามัย (ฉบับร่าง)	35 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (24 ชั่วโมง)
NAAQS/EPA	15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (1 ปี) 15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (24 ชั่วโมง)
OSHA	5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
ACGIH	3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Singapore	35 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
ASHRAE	15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

ที่มา: (สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2559)

## 2.2 การควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

คุณภาพอากาศภายในอาคารที่ดีเป็นหนึ่งในข้อกำหนดเบื้องต้นของการออกแบบอาคารเขียว (Green building) เพื่อให้แน่ใจว่าภายในอาคารสภาพแวดล้อมที่ดีต่อสุขภาพและมีความสะดวกสบาย โดยใช้มาตรการในการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร ซึ่งมาตรการหรือกลยุทธ์ในการควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารตามแหล่งที่มาของฝุ่นละออง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การควบคุมที่แหล่งกำเนิด (Sources control) และการควบคุมระหว่างการแพร่กระจาย (Control during transmission) (Li et al., 2017)

### 2.2.1 การควบคุมที่แหล่งกำเนิด (Sources control)

การควบคุมแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร ควรควบคุมทั้งจากแหล่งกำเนิดภายในและภายนอกอาคารควบคู่กัน เนื่องจากฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ภายในอาคารไม่ได้มาจากแค่แหล่งกำเนิดภายในอาคารเท่านั้น แต่ยังมาจากบรรยากาศที่อยู่ภายนอกอาคารด้วยเช่นกัน

#### 2.2.1.1 วิธีการควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจากแหล่งกำเนิด

ภายนอกอาคาร

1) การควบคุมอัตราการเกิดฝุ่นละอองจากที่ดินและอาคาร โดยรัฐบาลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรมีแนวทางที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือในเรื่องของมาตรการการจัลดสรเมืองสีเขียว (Urban greening) เพื่อลดปริมาณของพื้นที่ที่ถูกปล่อยว่างหรือพื้นที่ที่ถูกทิ้งให้รกร้าง (Land uncovered) และรองรับการขยายตัวรวมไปถึงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานของเมือง การจัลดสรเมืองสีเขียวควรทำควบคู่กับการปรับปรุงพื้นที่ของถนนที่อยู่ระหว่างเมืองให้มีความแข็งแรงทนทานเพื่อลดปริมาณฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายจากพื้นผิวของถนนที่ฝุ่น และพันธุ์ไม้สีเขียวที่นำมาใช้ในพื้นทีควรมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศที่ดีด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ระบบท่อใต้ดิน เช่นท่อระบายน้ำ ควรมีการออกแบบเพื่อป้องกันตะกอนที่มากับฝน และในระหว่างการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ หน่วยงานก่อสร้างที่รับผิดชอบจำเป็นต้องมีการวางระบบหรือมาตรการการป้องกันกรวดหินหรือทรายไม่ให้ออกนอกพื้นที่โครงการก่อสร้าง เพื่อควบคุมปริมาณฝุ่นละอองที่มาจากวัสดุก่อสร้างหรือการขนส่งวัสดุต่างๆ โดยอาจต้องมีการทำความสะอาดรถบรรทุกที่ใช้ขนส่งวัสดุด้วยเช่นกัน

2) การควบคุมการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ โดยประการแรกต้องมีมาตรการในการควบคุมและตรวจสอบเพื่อให้มีการปฏิบัติตามมาตรฐานในการปล่อยมลพิษของยานพาหนะอย่างเข้มงวด ประการที่สองควรเร่งพัฒนาการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อให้มีการปรับปรุงน้ำมันเบนซินและดีเซลที่รถยนต์ใช้ให้มีอัตราการเกิดมลพิษที่น้อยลง ประการที่สามควรส่งเสริมเทคโนโลยีรถยนต์ที่ใช้พลังงานทดแทนอย่างต่อเนื่องร่วมกับการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะให้ดียิ่งขึ้น

3) การควบคุมการปล่อยมลพิษจากอุตสาหกรรม โดยก่อนการไหม้ถ่านหิน ควรทำการกำจัดซัลเฟอร์ออกไซด์ (Desulfurization) จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหิน และควรส่งเสริมเทคโนโลยีการเผาไหม้ถ่านหินบด (Pulverized coal) และถ่านหินอัดก้อน (Briquettes coal) ที่มีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ก๊าซธรรมชาติควรถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับกับพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม และพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

ตามหลักการโดยทั่วไปแล้ว อากาศจะมีการแลกเปลี่ยนระหว่างสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร ซึ่งการควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่แทรกซึมมาจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารทำได้โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายนอกอาคารสูงให้ปิดประตูและหน้าต่าง หากปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารสูงกว่าภายนอกอาคารให้เปิดประตูและหน้าต่าง เพื่อให้มีการเพิ่มการกระจายตัวของอากาศ เพิ่มอัตราการระบายอากาศ เพิ่มปริมาณอากาศบริสุทธิ์ และต้องทำความสะอาดและฆ่าเชื้อระบบปรับอากาศของอาคารเป็นประจำ ซึ่งจะทำให้ปริมาณความ

เข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคารลดลงได้เนื่องจากระบบปรับอากาศภายในอาคารที่ได้รับการปรับปรุงควบคู่กับปริมาณอากาศบริสุทธิ์ที่เพิ่มขึ้น

2.2.1.2 วิธีการควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจากแหล่งกำเนิดภายในอาคาร

1) การควบคุมการสูบบุหรี่ รัฐบาลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรส่งเสริมการห้ามสูบบุหรี่อย่างจริงจังเพื่อสร้างความตระหนักทางด้านสาธารณสุข ควรมีการจัดโซนพื้นที่สูบบุหรี่ และโซนพื้นที่ปลอดบุหรี่ในเขตพื้นที่สาธารณะ เช่น สถานีรถไฟหรือร้านอาหาร ต้องมีการแบ่งพื้นที่อย่างชัดเจนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของฝุ่นละอองที่มาจากควันบุหรี่เข้าสู่ภายในอาคาร

2) การควบคุมการใช้เชื้อเพลิงแข็ง ควรมีการปรับปรุงและพัฒนาระบบระบายอากาศภายในห้องครัว และอาจมีการนำข้อมูลทางอุณหภูมิตามห้องถิ่นมาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อให้การปรับปรุงระบบระบายอากาศภายในบ้านดียิ่งขึ้น ต้องลดการใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ฟาง ไม้ หรือถ่านให้ได้มากที่สุด ร่วมกับการสนับสนุนให้ใช้เชื้อเพลิงสะอาด เช่น ก๊าซธรรมชาติ หรือไฟฟ้าแทน เป็นต้น ควรมีการส่งเสริมการใช้เตาประเภทก๊าซซีไฟเออร์ (Gasifiers) รวมไปถึงเตาอบลมร้อน (Ventilated stove) ต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเตาที่ใช้ในการประกอบอาหารอยู่เป็นระยะ อีกทั้งยังควรสร้างความตระหนักต่อความสำคัญของคุณภาพอากาศภายในอาคารของบุคคลให้มากยิ่งขึ้น โดยมีการศึกษาพบว่า การใช้เชื้อเพลิงจากมวลชีวภาพแบบบดละเอียด สามารถลดการปล่อยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ได้ถึงร้อยละ 54–67 การใช้เตาที่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสม และการใช้เตาประเภทก๊าซซีไฟเออร์สามารถลดการปล่อยฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนได้ถึงร้อยละ 76 และ 95 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาเชื้อเพลิงประกอบอาหารที่มีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำรุงรักษาและการเลือกประเภทของเตาที่จะนำมาใช้งานควรนำมาพิจารณาเพื่อลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร

3) การควบคุมการทำกิจกรรมภายในอาคาร ได้แก่ การหมั่นทำความสะอาดภายในบ้าน หรืออาคารอยู่เป็นประจำ การจัดหรือเลือกสิ่งของตกแต่งให้เหมาะสมทำความสะอาดได้ง่าย การลดการเผา และเพิ่มพื้นที่สีเขียวภายในอาคาร ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะสามารถช่วยลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่จะเกิดขึ้นภายในอาคารได้

## 2.2.2 การควบคุมระหว่างการแพร่กระจาย (Control during transmission)

วิธีการหลักในการควบคุมการแพร่กระจายของฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน คือการใช้เครื่องปรับอากาศที่มีประสิทธิภาพในการกรองอากาศสูง และอุปกรณ์ฟอกอากาศ ซึ่งอุปกรณ์ฟอกอากาศส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะมีหลายประเภท ได้แก่ เครื่องฟอกอากาศ (Air freshener), เครื่องทำหมอกความถี่อัลตราโซนิก (Ultrasonic atomizer), การใช้ประโยชน์จากน้ำภายในอาคาร เช่น ม่านน้ำตก น้ำพุตกแต่งภายใน เป็นต้น และพืช เช่น ต้นเศรษฐีเรือนนอก (Chlorophytum comosum) และต้นพลูด่าง (Scindapsus aureus) ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนได้ดี อีกทั้งยังสามารถดูดซับสารมลพิษจากก๊าซที่เป็นอันตรายบางชนิดได้อีกด้วย นอกจากนี้การฉีดพ่นละอองน้ำยังเป็นวิธีใช้ในการควบคุมฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่กำลังแพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศได้ และมีข้อดีในเรื่องของการบำรุงรักษาที่ง่ายกว่าระบบกรองอากาศทั่วไป เนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนของอุปกรณ์เหมือนระบบกรองอากาศที่ต้องมีการเปลี่ยนแผ่นกรองหรือไส้กรองอากาศอยู่เป็นระยะ เพื่อที่จะทำให้ระบบกรองอากาศทำงานมีประสิทธิภาพได้อย่างสม่ำเสมอ

## 2.3 ทฤษฎีการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละออง (Agglomeration)

### 2.3.1 การรวมตัวของอนุภาค (Particles agglomeration)

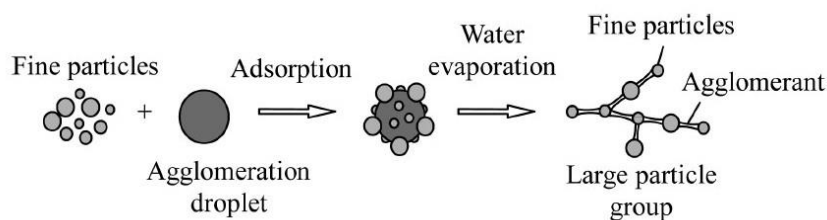
การรวมตัวของอนุภาคหมายถึง การรวมตัวกันของอนุภาคแขวนลอย โดยมีอนุภาคของเหลวทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคกับอนุภาคทำให้เกิดมวลรวมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเรียกอีกอย่างว่า การจับกัน (Coagulation) หรือการเกาะกลุ่มตกตะกอน (Flocculation) (Dassisti & Brunetti, 2020)

การรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองเป็นกระบวนการที่ทำให้ปริมาตรและขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้ปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศลดลง เนื่องจากระยะเวลาการคงอยู่ในบรรยากาศของฝุ่นละอองมีความแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาค ฝุ่นละอองหยาบหรือฝุ่นละอองที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะตกลงจากบรรยากาศอย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมงและสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในระยะทางสั้นๆเท่านั้น ในขณะที่ฝุ่นละอองที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะมีระยะเวลาในการคงอยู่ในบรรยากาศที่นานและสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (United States. Environmental Protection Agency, 2004)

หนึ่งในกระบวนการรวมตัวกันของอนุภาคฝุ่นละอองที่สำคัญในชั้นบรรยากาศคือการก่อตัวของเมฆ และมีอนุภาคไอน้ำหรือละอองน้ำที่เป็นส่วนสำคัญทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กในบรรยากาศ โดยกระบวนการกำจัดฝุ่นละอองในบรรยากาศที่มาจากกระบวนการรวมตัวกับอนุภาคไอน้ำมีอนุภาคฝุ่นละอองเป็นแกนกลางก่อตัวเป็นละอองเมฆฝ่น (Cloud droplets) ซึ่งฝุ่นละอองที่อยู่ในเมฆจะถูกดักจับโดยอนุภาคที่มาจากกระบวนการกลั่นตัวของน้ำและตกลงมา เช่น ฝนและหิมะ เป็นต้น (National Center for Environmental Assessment NC, 1996)

### 2.3.2 การรวมตัวกันทางเคมี (Chemical agglomeration)

การรวมตัวกันทางเคมี คือ กระบวนการรวมตัวของอนุภาคในอากาศที่มีสารเคมีเป็นตัวกลางในการรวมตัว (Agglomerant) โดยสารเคมีที่มีคุณสมบัติความเหนียวจะทำหน้าที่เป็นสะพานของเหลว (Liquid bridge) เชื่อมระหว่างอนุภาคสารแขวนลอยที่อยู่ในบรรยากาศให้มีขนาดและน้ำหนักมากขึ้นดังภาพที่ 3 (Y. Liu, Hu, Zhou, Jiang, & Yang, 2016) โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลที่เกี่ยวข้องได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงพันธะเวเลนซ์ (Valence forces) และแรงที่ไม่ใช่พันธะเวเลนซ์ (Non-valence association) (Lewandowski & Kawatra, 2009)



ภาพที่ 3 กลไกการรวมตัวกันทางเคมี

ที่มา: (Y. Liu et al., 2016)

### 2.3.3 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการรวมตัวของฝุ่นละอองในอากาศ

#### 2.3.3.1 ความชื้นบรรยากาศ (atmospheric humidity)

ความชื้นบรรยากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดและการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองที่อยู่ในชั้นบรรยากาศโดยกระบวนการการดูดความชื้นของอนุภาคฝุ่นละอองเป็นกระบวนการที่ฝุ่นละอองดูดและคายความชื้นออกสู่บรรยากาศ เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศที่ดูดความชื้นเข้าไปจะมีมวลเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ฝุ่นละอองที่คายความชื้นออกสู่บรรยากาศจะมีมวลลดลง (วิลาวรรณ คำหาญ, 2560) โดยมีการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการรวมตัวของอนุภาค



ฝุ่นละอองขนาดเล็กสอดคล้องกับปริมาณความชื้นในอากาศ เนื่องจากความชื้นทำให้เกิดแรงเชื่อมระหว่างอนุภาคฝุ่นจากของเหลวที่อยู่ในอากาศ และความชื้นที่มากขึ้น (มากกว่าร้อยละ 80) จะช่วยเพิ่มการแตกตัวของไอออนบนพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นละออง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตที่สูงขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้อนุภาคฝุ่นจำนวนมากที่อยู่ในอากาศเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นการรวมตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นจึงมีปัจจัยมาจากปริมาณความชื้นในอากาศที่ส่งผลทั้งทางกายภาพและทางเคมีต่ออนุภาคฝุ่นละอองในอากาศ (He et al., 2019) โดยในสภาวะที่ความชื้นในบรรยากาศสูง ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กจะมีปริมาณน้อยกว่าในสภาวะที่ความชื้นในบรรยากาศต่ำประมาณร้อยละ 46 (เปรียบเทียบระหว่างสภาวะความชื้นที่ร้อยละ 70 และร้อยละ 20) (J. J. Kim, Hann, & Lee, 2019)

### 2.3.3.2 อัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate)

อัตราการไหลของอากาศ คือ อัตราส่วนของปริมาตรลมที่ไหลผ่านจุดใดจุดหนึ่งในหนึ่งหน่วยเวลา โดยคำนวณจากการวัดความเร็วเฉลี่ยอากาศจากแหล่งกำเนิดลมที่ต้องการเช่น พัดลม เครื่องเป่าลม (Blower) และเครื่องคอมเพรสเซอร์ กับพื้นที่หน้าตัดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่อากาศเคลื่อนที่ผ่าน (Mills, 2016) ดังสมการ

$$V = C \times A$$

สมการที่ 2.1

เมื่อกำหนดให้

V คือ อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่อากาศเคลื่อนที่ผ่าน (ตารางเมตร)

C คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

กรณีพื้นที่ท่อกลม

$$V = \frac{\pi r^2 C}{4}$$

สมการที่ 2.2

หรือ

$$C = \frac{4V}{\pi r^2}$$

สมการที่ 2.3

เมื่อกำหนดให้

r คือ รัศมีของท่อกลม (เมตร)

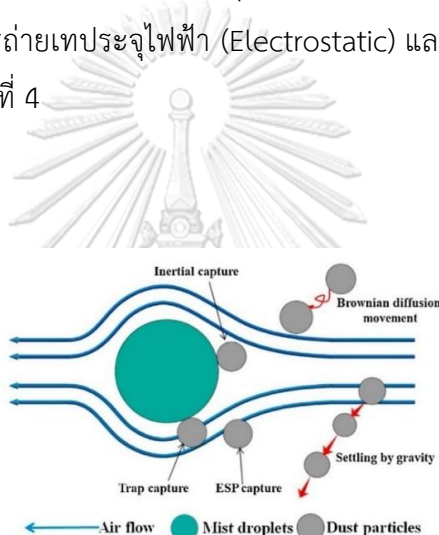
### 2.3.3.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการรวมตัวกันของอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในบรรยากาศ โดยการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของไอเสียนที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดที่ 150 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพในการรวมตัวกันของอนุภาคในอากาศดีขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความชื้นในสสารที่มีสถานะเป็นของเหลวที่กำลังรวมตัวกับอนุภาคแขวนลอยในอากาศลดลง ซึ่งส่งผลให้สะพานของเหลวที่เชื่อมระหว่างอนุภาคสารแขวนลอยเกิดการแข็งตัวได้เร็วขึ้น ทำให้กระบวนการรวมตัวของอนุภาคในบรรยากาศเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคสารแขวนลอยที่มาจากไอเสียนในอากาศลดลง (Y. Liu et al., 2016) การไหลของอากาศมีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร โดยในสถานะที่มีอิทธิพลของความเร็วอากาศแตกต่างกัน ภายในห้องที่มีอัตราการไหลของอากาศต่ำความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนจะต่ำกว่าภายในห้องที่มีการไหลของอากาศสูง เนื่องจากการไหลของอากาศมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนภายในอาคาร (Ma et al., 2015) และในสถานะที่มีความชื้นในอากาศการไหลเวียนของอากาศจะมีส่วนช่วยให้ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองในอากาศลดลง เนื่องจากการไหลเวียนของอากาศทำให้ความชื้นและอนุภาคฝุ่นในอากาศทำปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมีต่อกันได้ง่ายมากขึ้น ส่งผลให้การรวมตัวกันของอนุภาคฝุ่นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วมากขึ้นเช่นกัน (J. J. Kim et al., 2019) การฉีดพ่นละอองน้ำเป็นหนึ่งในวิธีการลดฝุ่นละอองภายในบรรยากาศที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถพบเจอได้บ่อยครั้ง (Kumar & Kumar, 2018) โดยหลักการทำงานของละอองน้ำในการลดฝุ่นคือ เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กเข้าไปใกล้อนุภาคของละอองน้ำ อนุภาคฝุ่นจะถูกสกัดกั้นโดยอนุภาคของละอองน้ำ และเกิดการรวมตัวกันทำให้น้ำหนักของอนุภาคฝุ่นเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถลอยตัวอยู่ในอากาศได้ และตกลงสู่พื้น ทำให้ปริมาณฝุ่นที่อยู่ในอากาศลดลง (S. Wang, Wang, Song, & Wen, 2019) ซึ่งการจับตัวกันของฝุ่นละอองกับน้ำที่เกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การชนกันด้วยความเฉื่อย (Inertial collision) การสกัดกั้น (interception) การแพร่ (Diffusion) ผลจากแรงดึงดูด (Gravity) ไฟฟ้าสถิต หรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrostatic) และการจับตัวกัน (Coagulation) (Peng et al., 2020)

ดั่งภาพที่ 4

## 2.4 การใช้ละอองน้ำในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก

การฉีดพ่นละอองน้ำเป็นหนึ่งในวิธีการลดฝุ่นละอองภายในบรรยากาศที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถพบเจอได้บ่อยครั้ง (Kumar & Kumar, 2018) โดยหลักการทำงานของละอองน้ำในการลดฝุ่นคือ เมื่ออนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กเข้าใกล้อนุภาคของละอองน้ำ อนุภาคฝุ่นจะถูกสกัดกั้นโดยอนุภาคของละอองน้ำและเกิดการรวมตัวกันทำให้น้ำหนักของอนุภาคฝุ่นเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถลอยตัวอยู่ในอากาศได้และตกลงสู่พื้น ทำให้ปริมาณฝุ่นที่อยู่ในอากาศลดลง (S. Wang et al., 2019) ซึ่งการจับตัวกันของฝุ่นละอองกับน้ำที่เกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การชนกันด้วยความเฉื่อย (Inertial collision) การสกัดกั้น (interception) การแพร่ (Diffusion) ผลจากแรงดึงดูด (Gravity) ไฟฟ้าสถิตหรือการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electrostatic) และการจับตัวกัน (Coagulation) (Peng et al., 2020) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังกลไกการจับตัวกันของอนุภาคฝุ่นละอองกับละอองน้ำ

ที่มา: (Peng et al., 2020)

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพและพัฒนาการใช้ละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศอยู่หลายงานวิจัย จากงานวิจัยของ Kim et al. (2020) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ละอองน้ำขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) ภายในอาคาร โดยการทดลองใช้เครื่อง MHz-frequency atomizer สร้างละอองน้ำขนาดเล็กเพื่อลดฝุ่นละอองภายในห้องทดลองแบบปิดขนาดปริมาตร 0.125 ลูกบาศก์เมตร ( $m^3$ ) โดยอุปกรณ์ Portable particle counter (AEROTRAK 9306, TSI, Inc.) ในการวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่น และใช้การเผาธูปเป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นละอองและค่าคงที่ของปริมาณฝุ่นละออง จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่า ละอองน้ำขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ( $PM_{2.5}$ ) อยู่ที่ร้อยละ 24.4 หลังจากเปิดอุปกรณ์สร้างละอองน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที เมื่อ

ระยะเวลาผ่านไป 30 นาที ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 59.2 และมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM<sub>10</sub>) อยู่ที่ร้อยละ 42.3

การศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ 2<sup>nd</sup> Generation Solar Assisted Large Scale Cleaning System (2<sup>nd</sup> Gen SALSCS) ที่ถูกออกแบบ และสร้างไว้ที่ Yancheng Science Park ในมณฑลเจียงซู ประเทศจีน ในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน โดยเปลี่ยนจากระบบกรองอากาศ (Air filtration) เป็นระบบดักจับฝุ่นโดยใช้ม่านน้ำ (falling air drops) โดยการติดตั้งหัวพ่นสเปรย์ขนาดใหญ่ มีการคำนวณทางทฤษฎีในการกำหนดความเร็วในการตกของหยดน้ำ และประสิทธิภาพของการชนกันระหว่างหยดน้ำกับอนุภาค เพื่อให้กระบวนการรวมตัวกันของละอองน้ำและอนุภาคฝุ่นมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการทดลองในห้องทดสอบภายในอาคารแบบปิดที่ออกแบบมาให้สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นการกระจายของอนุภาคฝุ่นและอัตราการแลกเปลี่ยนของอากาศภายในห้องทดสอบได้ ผลการศึกษาพบว่าความเร็วของหยดน้ำที่ 0.2 เมตรต่อวินาที และหัวพ่นสเปรย์จำนวน 752 หัว สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนได้ร้อยละ 35 นอกจากนี้ได้มีการทดลองใช้ตาข่าย 2 ชั้นเพื่อสร้างแผงม่านน้ำ พบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นได้ดีขึ้นถึงร้อยละ 50 อีกทั้งยังมีข้อสันนิษฐานว่าหากมีการเพิ่มจำนวนหัวพ่นสเปรย์และเพิ่มพื้นที่ในการฉีดพ่น อาจมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนให้สูงมากยิ่งขึ้น (Chen et al., 2020)

Peng et al. (2020) ศึกษาการใช้อุปกรณ์สร้างม่านน้ำเพื่อป้องกันฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนด้วยหัวพ่นสเปรย์ให้ครอบคลุมพื้นที่ถนนหน้าเหมืองถ่านหิน Bailu โดยการทดลองในห้องจำลองการพ่นสเปรย์ที่มีการติดตั้งหัวฉีดทั้งหมด 6 หัวที่มีขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ถนนหน้าเหมืองที่จะนำไปใช้จริง มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แรงดันน้ำ และมุมมองของการติดตั้งหัวฉีดต่อการตกของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ผลการศึกษาพบว่า ระดับความดันน้ำที่ 7 เมกะปาสคาล (MPa) และหันหัวพ่นสเปรย์ไป 15 องศาเหนือทิศทางลม การพ่นละอองน้ำกระจายที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรครอบคลุมได้ถึงร้อยละ 93.1 ของพื้นที่ถนนทั้งหมด และสามารถเพิ่มอัตราการตกของฝุ่นละออง จากบริเวณหน้าเหมืองถ่านหินได้ถึงร้อยละ 95.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ม่านน้ำแบบเต็มพื้นที่ถนน สามารถควบคุมและทำให้ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนตกลงสู่พื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

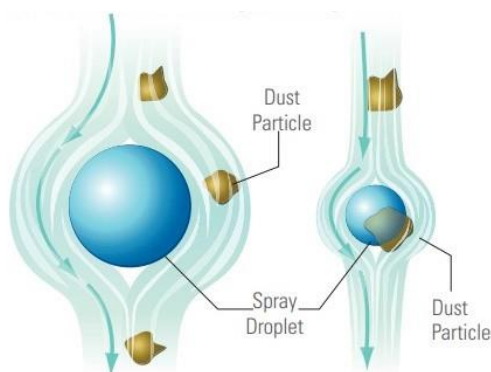
Wang et al. (2019) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคฝุ่นละอองจากการฉีดพ่นละอองน้ำภายในเหมืองถ่านหินในด้านของคุณสมบัติระดับจุลภาค ความสามารถในการดูดซับความชื้น และ

การลดปริมาณของฝุ่นละอองในขณะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ โดยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันจากถ่านหิน 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) ถ่านโค้ก (Coking coal) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติในการจับตัวกับออกซิเจนของอนุภาคฝุ่นละอองในส่วนที่ชอบน้ำจะลดลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่นละออง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของอนุภาคฝุ่นละอองลดลงเช่นกัน และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองด้วยการฉีดพ่นละอองน้ำ ซึ่งพิจารณาจากความสามารถในการดูดซับความชื้นของฝุ่นละออง และค่า D50 (ค่าเฉลี่ยความแตกต่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองน้ำและฝุ่นละออง) พบว่าประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองด้วยการฉีดพ่นละอองน้ำจะลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่นลดลง โดยผลการศึกษาพบว่าการฉีดพ่นละอองน้ำมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 85.02 ในขณะที่การฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 51.66

#### 2.4.1 ปัจจัยด้านการฉีดพ่นละอองน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่น

##### 2.4.1.1 ขนาดอนุภาคของละอองน้ำ (Water droplet size)

ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นของละอองน้ำจะมากที่สุดเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำที่สัมผัสกับฝุ่นละอองควรมีขนาด 1 – 5 เท่าของอนุภาคฝุ่นละอองที่ต้องการควบคุมหรือกำจัด หากหยดน้ำมีขนาดเล็กเกินไปจะไม่สามารถรวมตัวกับอนุภาคของฝุ่นละอองได้ ในทางกลับกันหากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินไปจะเกิดกำแพงอากาศรอบอนุภาคของหยดน้ำและป้องกันไม่ให้อนุภาคฝุ่นสัมผัส หรือรวมตัวกับหยดน้ำได้โดยตรง (Spraying System Co, 2016) ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคละอองน้ำคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูฉีดพ่นของหัวฉีดพ่นละอองน้ำที่ใช้ โดยการเลือกใช้หัวฉีดพ่นละอองน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูฉีดพ่นขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของอนุภาคละอองน้ำจากการฉีดพ่นใหญ่ขึ้น ในทางตรงข้ามการเลือกใช้หัวฉีดพ่นละอองน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูฉีดพ่นขนาดเล็กลงจะทำให้ขนาดของอนุภาคละอองน้ำจากการฉีดพ่นเล็กลงด้วยเช่นกัน (Peng et al., 2019)



ภาพที่ 5 การรวมตัวของอนุภาคฝุ่นกับหยดน้ำที่มีขนาดแตกต่างกัน  
ที่มา: (Spraying System Co, 2016)

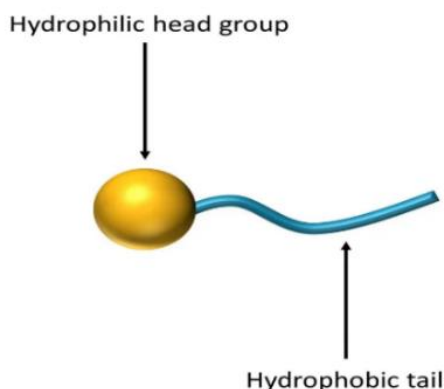
#### 2.4.1.2 ความดันน้ำ (Water pressure)

ระดับความดันน้ำของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของการฉีดพ่นละอองน้ำ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการลดฝุ่นของการฉีดพ่นละอองน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นตามความหนาแน่นของการฉีดพ่นละอองน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มระดับความดันน้ำทำให้อัตราการไหลของการฉีดพ่นละอองน้ำที่สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ปริมาณของละอองน้ำจากการฉีดพ่นเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ของละอองน้ำเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (S. Wang et al., 2019)

### 2.5 การใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก

#### 2.5.1 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว คือ สารที่สร้างกลุ่มโมเลกุลที่เรียกว่า ไมเซลล์ (Micell) ในสารละลาย (น้ำและน้ำมัน) ซึ่งมีคุณสมบัติในการลดความตึงผิวของสารละลายทำให้เกิดการดูดซับกันระหว่างสารละลายกับสสารต่างสถานะ (ของแข็งและก๊าซ) สารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่มีขั้ว (Ionic surfactants) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (Nonionic surfactants) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) (Nakama, 2017) แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โมเลกุลส่วนหัวและหางของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

ที่มา: (SciByDegrees, 2018)

#### 2.5.1.1 สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic)

สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในกลุ่มที่ชอบน้ำ แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant) และสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเป็นได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactant) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารลดแรงตึงผิวนั้น

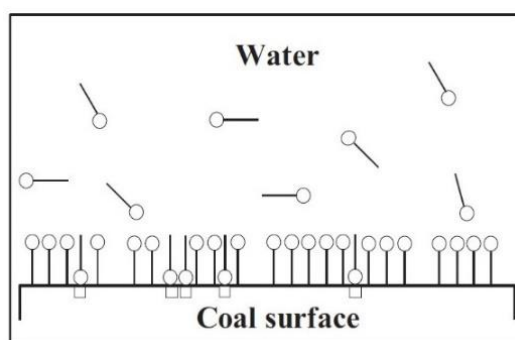
โดยทั่วไปแล้วสารลดแรงส่วนที่อยู่ในกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะ ได้แก่ คาร์บอกซิเลต ( $-\text{COO}^-$ ) ซัลเฟต ( $-\text{OSO}_3^-$ ) ซัลโฟเนต ( $\text{SO}_3^-$ ) คาร์บอกซีเบทาอีน ( $-\text{NR}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$ ) ซัลโฟเบทาอีน ( $-\text{N}(\text{CH}_3)_2\text{C}_3\text{H}_6\text{SO}_3^-$ ) และควอเทอร์นารีแอมโมเนียม ( $-\text{R}_4\text{N}^+$ )

#### 2.5.1.2 สารลดแรงตึงผิวส่วนที่อยู่ในกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

สารลดแรงตึงผิวส่วนที่อยู่ในกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ เป็นสารกลุ่มที่ไม่แยกตัวออกเป็นไอออนในสารละลาย โดยการแบ่งกลุ่มจะขึ้นอยู่กับประเภทของสารลดแรงตึงผิวในส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ

ความตึงผิว (surface tension) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางกายภาพบางอย่างและปฏิกิริยาการดูดซับของพื้นผิวของสารละลาย ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ค่าความตึงผิวของสารละลายลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไปจนถึงจุดที่ค่าความตึงผิวคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าลง ซึ่งเราจะเรียกจุดนี้ว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) และที่ระดับความเข้มข้นนี้ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ที่มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวจนถึงในระดับที่

ทำให้สารละลายกับสารต่างสถานะ (ของแข็งและก๊าซ) เกิดการดูดซับกันได้ จากการศึกษาการดูดซับของสารละลายที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวกับอนุภาคฝุ่นจากถ่านหิน พบว่าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนหางหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะจับกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของอนุภาคถ่านหินด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole forces) โดยหันโมเลกุลส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวไปทางบริเวณที่มีน้ำโดยรอบดังภาพที่ 7 โดยกระบวนการนี้จะเปลี่ยนส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของถ่านหินเป็นส่วนที่ชอบน้ำซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเปียกหรือการรวมตัวกับน้ำของอนุภาคถ่านหิน (Xu et al., 2018)



ภาพที่ 7 การจับตัวของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอนุภาคฝุ่นถ่านหิน

ที่มา: (Xu et al., 2018)

การศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็กจากงานวิจัยของ Bin et al. (2018) ได้ศึกษาการใช้สารเคมีในการรวมอนุภาคของฝุ่นละออง เพื่อเสริมประสิทธิภาพของระบบ Electrostatic precipitator (ESP) ในการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ที่มาจากเตาเผาไหม้ถ่านหิน ทำการทดลองโดยใช้ น้ำ สาร Pectin และสารละลาย Sodium alginate เป็นตัวกลางในการรวมอนุภาคของฝุ่นขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยใช้หัวพ่นละอองน้ำในการฉีดพ่นสาร ผลการศึกษาพบว่าสารละลาย Sodium alginate มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถจับกับฝุ่นเพื่อช่วยเพิ่มขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจาก 0.1 ไมครอนเป็น 1 ไมครอน เนื่องจาก สารละลาย Sodium alginate มีค่าความตึงผิวต่ำที่สุดซึ่งทำให้เกิดฟิล์มของเหลวในการจับกับพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นได้ง่าย และช่วยเสริมโครงสร้างการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคฝุ่นได้ดี โดยมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการรวมตัวละอองที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Respirable dust) และฝุ่นละอองโดยรวม (Total dust) ได้ร้อยละ 43.52 และร้อยละ 30.22 ตามลำดับ อีกทั้งการใช้สารเคมีในการรวมอนุภาคของฝุ่นละอองนี้ร่วมกับระบบ Electrostatic precipitator (ESP) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ขึ้นร้อยละ 20 อีกทั้งจากการศึกษาคำนวณทางทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น (Density functional theory: DFT) เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ของสารเคมีกับฝุ่นละอองภายในระบบ electrostatic precipitator (ESP) ที่



ระดับโมเลกุลพบว่า น้ำ, สาร Pectin และสารละลาย Sodium alginate ทำปฏิกิริยารวมตัวกับฝุ่นละอองได้โดยพันธะไฮโดรเจนทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น

การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคละอองน้ำของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำแบบหมุนที่ใช้โดยทั่วไปในการฉีดพ่นเพื่อลดฝุ่นละอองในเหมืองถ่านหิน และศึกษาอิทธิพลของความดันและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองด้วยการฉีดพ่น โดยการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่มีส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิว และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดปริมาณฝุ่นละออง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายเพิ่มขึ้นค่าความตึงผิวของสารละลายจะลดลง และเมื่อค่าความตึงผิวลดลงจนถึงจุดค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ ค่าความตึงผิวจะอยู่ในจุดที่คงที่และไม่ลดลงอีก จากการศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อขนาดอนุภาคละอองน้ำจากการฉีดพ่นด้วยอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำแบบหมุนพบว่า สารลดแรงตึงผิวทำให้ขนาดอนุภาคของสารละลายที่ฉีดพ่นออกมามีขนาดเล็กลงในสภาวะที่มีความดันต่ำ และ การศึกษาประสิทธิภาพในการลดฝุ่นพบว่า การฉีดพ่นสารละลายที่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองมากกว่าการฉีดพ่นด้วยน้ำอย่างมีนัยสำคัญ (P. Wang, Tan, Zhang, Li, & Liu, 2019)

## 2.5.2 ปัจจัยด้านคุณสมบัติของสารที่ใช้ในการฉีดพ่นต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่น

### 2.5.2.1 คุณสมบัติความเป็นประจุไฟฟ้า (ion)

คุณสมบัติความเป็นประจุของสารลดแรงตึงผิวขึ้นอยู่กับประเภทของสารลดแรงตึงผิวส่วนหัว หรือส่วนที่ชอบน้ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกและสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเป็นได้ทั้งประจุบวก และประจุลบ

คุณสมบัติความเป็นประจุของฝุ่นละอองในบรรยากาศมีความแตกต่างกันตามอัตราส่วนของค่าความเป็นประจุบวกต่อประจุลบ (Cation:Anion) ขององค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละออง ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาคุณสมบัติความเป็นประจุไฟฟ้าของ PM<sub>2.5</sub> ไว้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติความเป็นประจุของ PM<sub>2.5</sub>

พื้นที่เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง	สารประกอบ ประจุบวก (Cation)	สารประกอบประจุลบ (Anion)	ประจุบวก:ประจุลบ (Cation : Anion)	อ้างอิง
เขตเมือง บริเวณอ่าว Baía de Todos os Santos Bay (BTS) ประเทศบราซิล	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> และ Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ประจุบวก > ประจุลบ (A/C = 0.19)	(Mkoma et al., 2014)
พื้นที่ศูนย์กลางเขตอุตสาหกรรม เมืองไฟซาลาบัด ประเทศปากีสถาน	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> และ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ประจุบวก > ประจุลบ (A/C = 0.373)	(Javed, Wexler, Murtaza, Ahmad, & Basra, 2015)
พื้นที่เขตพัฒนา บริเวณตาดฟ้า สถาบันวิจัยสิ่งแวดล้อมบรรยากาศ (the Institute of Atmospheric Environment) ใน China University of Geosciences เมืองอู่ฮั่น ประเทศจีน	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> และ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ประจุบวก > ประจุลบ (A/C = 0.9)	(T. Huang, Chen, Zhao, Cheng, & Cheng, 2016)
ตารางที่ 2 (ต่อ) องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติความเป็นประจุของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน				
พื้นที่เก็บตัวอย่างฝุ่นละออง	สารประกอบ ประจุบวก (Cation)	สารประกอบประจุ ลบ (Anion)	ประจุบวก:ประจุลบ (Cation : Anion)	อ้างอิง
เขตชานเมือง เขตบริหารพิเศษฮ่องกง ประเทศจีน	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> และ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> และ C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ประจุบวก > ประจุลบ (A/C = 0.98)	(X. H. H. Huang, Bian, Ng, Louie, & Yu, 2014)
ใจกลางเมืองกว่างโจว บริเวณตาดฟ้าอาคารสูง 50 เมตรเหนือพื้นที่เขตการจราจร	Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> และ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ประจุลบ > ประจุบวก (C/A = 0.93)	(Chang, Chou, Liu, & Zhang,

				2013)
ชั้นดาดฟ้าของสถานีเรดาร์ทาง ตอนใต้ของเกาะ Changdao ประเทศจีน	$K^+$ และ $NH_4^+$	$NO_3^-$ และ $SO_4^{2-}$	ประจุลบ > ประจุบวก (A/C > 1)	(Feng et al., 2012)
ดาดฟ้าอาคารสูง 15 เมตร ใน Fudan University ประเทศจีน	$Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ , $K^+$ และ $NH_4^+$	$SO_4^{2-}$ , $NO_3^-$ , $Cl^-$ , $F^-$ , $PO_4^{3-}$ , $HCOO^-$ , $CH_3COO^-$ , $NO_2^-$ และ $C_2O_4^{2-}$	ประจุลบ > ประจุบวก (C/A = 0.88)	(Y. Wang et al., 2006)
พื้นที่ 5 จุด ในเมืองปักกิ่ง ประเทศ จีน 1) เขตการจราจรใน Beijing Normal University (BNU) 2) พื้นที่เขตถนนวงแหวน 3) แหล่งอุตสาหกรรม 4) พื้นที่เขตที่พักอาศัยติดเส้นทาง การจราจร 5) พื้นที่ชนบทเขตชานเมือง	$Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ , $K^+$ และ $NH_4^+$	$SO_4^{2-}$ , $NO_3^-$ , $Cl^-$ , $F^-$ , $PO_4^{3-}$ , $HCOO^-$ , $CH_3COO^-$ , $NO_2^-$ และ $C_2O_4^{2-}$	ประจุบวก > ประจุลบ (C/A = 1.09)	(Y. Wang et al., 2005)
ฝุ่นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ชีวภาพ	$Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ , $K^+$ และ $NH_4^+$	$SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ และ $NO_3^-$	ประจุบวก > ประจุลบ (C>A)	(Tian et al., 2017)

ซึ่งคุณสมบัติความเป็นประจุของอนุภาคฝุ่นละอองและสารลดแรงตึงผิวเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจับตัวกันด้วยพันธะไอออนิก (ionic bond) โดยได้มีการศึกษาการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีคุณสมบัติทางประจุต่างกัน (ประจุลบ ประจุบวก และไม่มีประจุ) พบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุมีผลต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองที่มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้าเพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากฝุ่นละอองโดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันทำให้สารลดแรงตึงผิวประเภทที่มีประจุสามารถจับกับอนุภาคฝุ่นบางส่วนที่มีประจุต่างชนิดกันได้ แต่จะไม่สามารถจับกับฝุ่นที่มีค่าความเป็นประจุเหมือนกันได้ เนื่องจากการผลักกันของประจุขั้วเดียวกันที่อยู่บนพื้นผิวอนุภาคฝุ่นและอนุภาคของสารลดแรงตึงผิว ดังนั้นการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) จึงมีประสิทธิภาพในการเพิ่มคุณสมบัติในการดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กในบรรยากาศได้ดีที่สุด (Z. Liu et al., 2019; Tang et al., 2016; Tessum & Raynor, 2017; P. Wang et al., 2020)

### 2.5.2.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Positive potential of the hydrogen ions)

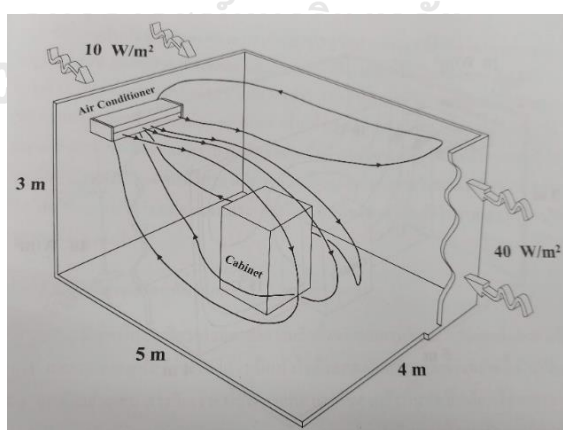
ค่าความเป็นกรดต่างเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อความเสถียรของประจุไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นละอองหรือสารแขวนลอยในอากาศ โดยอนุภาคไอออนบวกและไอออนลบจะรวมตัวกันอยู่เป็นชั้นติดบนพื้นผิวของอนุภาคแขวนลอย การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง จะส่งผลต่อค่าความเสถียรของประจุไอออนบนพื้นผิวอนุภาค ซึ่งค่าความเสถียรของประจุบนพื้นผิวอนุภาคสามารถใช้บ่งบอกค่าศักย์ซีตา (Zeta potential) หรือค่าความต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบอนุภาค โดยในสถานะที่ค่าประจุบนพื้นผิวของอนุภาคมีความเสถียรค่าศักย์ซีตาจะมีค่าเป็นบวกหรือลบ แต่ในสถานะที่ค่าประจุบนพื้นผิวของอนุภาคมีความไม่มีความเสถียรค่าศักย์ซีตาจะเป็นศูนย์ และเมื่อประจุบนพื้นผิวของอนุภาคขาดความเสถียรจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวของอนุภาคสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพื้นฐานความเป็นกรดต่างของอนุภาคแขวนลอยว่าต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างให้น้อยลงหรือเพิ่มขึ้นเท่าใดจึงจะทำให้ค่าศักย์ซีตาเป็นศูนย์และทำให้ประจุบนพื้นผิวอนุภาคแขวนลอยสูญเสียความเสถียร ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้ดีที่สุดอยู่ที่ 6 (pH เท่ากับ 6) (Al-Gebory & Mengüç, 2018)

#### 2.5.2.3. ความหนืดของสาร (Substance viscosity)

ความหนืดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่สำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะการเป็นละอองของสารในการฉีดพ่น การเพิ่มความหนืดให้กับสารละลายที่ใช้ในการฉีดพ่นสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้น (Mass concentration) ของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ซึ่งการเพิ่มความหนืดสามารถลดค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number) ซึ่งช่วยลดอัตราการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ของอนุภาคละอองสารลดแรงตึงผิวทำให้อนุภาคละอองน้ำที่ออกมาในขณะฉีดพ่นไม่เกิดการฟุ้งกระจายมากเกินไป ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคที่เกิดจากการเกาะรวมของอนุภาคฝุ่นละอองและอนุภาคของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ดียิ่งขึ้น (P. Wang et al., 2020) นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสร้างสะพานของเหลวระหว่างอนุภาคฝุ่นของสารลดแรงตึงผิวซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเกาะรวมเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากความเข้มข้นของสารที่ใช้สูงมากเกินไปจะทำให้จำนวนตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) บนพื้นผิวของอนุภาคฝุ่นลดลงโดยจะถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลโพลีเมอร์ (Polymer) ส่งผลให้แรงเชื่อมของสะพานของเหลวที่เกิดขึ้นอ่อนลง (Liquid bridge force) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคฝุ่นละอองลดลงไปด้วย (Zhou et al., 2019)

## 2.6 เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ สำหรับใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรมหรือการศึกษางานทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งผสมผสานกับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการเชิงย่อย (Partial differential equations) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสมดุลของการไหลนั้น ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟิกสี (Color graphics) ทำให้นักวิเคราะห์สามารถเข้าใจปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถปรับปรุง ดัดแปลงรูปแบบของการออกแบบ จนได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปสร้างจริงหรือทำการทดลองอีกต่อหนึ่งเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการออกแบบนั้น ซึ่งเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถนำมาประยุกต์เข้ากับงานทางด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก ทั้งในระดับวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานในทางปฏิบัติ เช่น การทำนายสภาวะอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาบนพื้นที่กว้างหลายหมื่นกิโลเมตร หรือการทำนายสภาวะอากาศเพียงแคในห้องปรับอากาศเล็กๆในที่ทำงาน ดังตัวอย่างในภาพที่ 8 ซึ่งแสดงลักษณะการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณในห้องปรับอากาศยาว 5 เมตร กว้าง 4 เมตร และสูง 3 เมตร มีตู้สูง 1.5 เมตร วางวางอยู่กลางห้อง ผนังของห้องได้รับปริมาณความร้อนที่ต่างกัน โดยใต้เพดานมุมหนึ่งของห้องได้ติดตั้งเครื่องปรับอากาศซึ่งจ่ายอากาศที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส โดยกำหนดให้ผนังได้รับความร้อน (Heat flux) 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) และ 40 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ )



ภาพที่ 8 เส้นทางเดินของอนุภาค (Particle tracing) ในห้องปรับอากาศที่มีตู้วางของอยู่กลางห้อง

จากตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อให้เกิดประโยชน์ในการวิเคราะห์งานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลอย่างมาก รวมทั้งสามารถวิเคราะห์หลังไปในรายละเอียดของ

การไหลในบางบริเวณเพื่อหาผลลัพธ์และข้อมูลที่ต้องการความสมบูรณ์ และที่สำคัญที่สุด ยังเปิดโอกาสเพื่อการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบอื่นๆ ได้อีกเป็นจำนวนมากทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้หรือทางด้านการวิจัยและพัฒนา (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2559)

เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใช้หลักการของการอนุรักษ์พลังงานเพื่อวิเคราะห์การไหลของของไหลภายในพื้นที่ที่ต้องการศึกษาโดยการคำนวณโดยใช้สมการอนุรักษ์ (Conservation law governing equations) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงวิศวกรรมเข้ามาเกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation equations) (ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์, 2562)



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้อุปกรณ์ฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในโรงเรือนจำลองห้องทดสอบแบบกึ่งปิด (Semi-closed chamber) ขนาดความกว้าง 2 เมตร ความยาว 3 เมตร และความสูง 2 เมตร คิดเป็นปริมาตรอยู่ที่ 10.71 ลูกบาศก์เมตร ลักษณะเป็นโครงเหล็กประกอบคลุมด้วยวัสดุพอลิเมอร์ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โรงเรือนทดลอง (Chamber test)

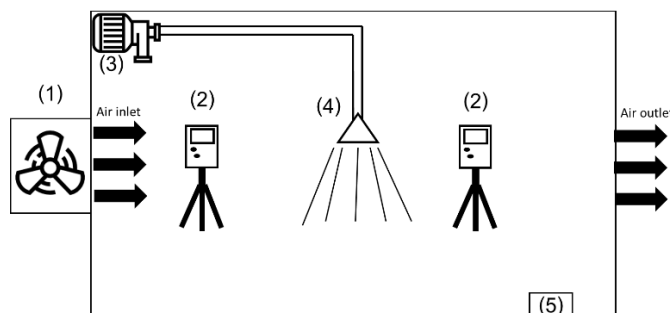
โดยติดตั้งอุปกรณ์การทดลองภายในโรงเรือนทดลองดังนี้

- 1) ติดตั้งชุดอุปกรณ์กำเนิดอนุภาค (Dust generator) ที่บริเวณช่องเปิดด้านหน้าโรงเรือนทดลอง (Chamber test) เป็นแหล่งกำเนิด  $PM_{2.5}$  และเปิดช่องหน้าต่างฝั่งตรงข้ามให้เป็นจุดระบายอากาศ เพื่อให้เกิดเส้นทางการไหลของฝุ่นละอองเป็นแนวตรงทะลุผ่านโรงเรือนทดลอง
- 2) ติดตั้งอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองโดยให้ตำแหน่งของหัวฉีดพ่นละอองน้ำอยู่ที่บริเวณตรงกลางของเรือนทดลองเพื่อเป็นจุดดักจับ  $PM_{2.5}$  ที่มาจากเครื่องกำเนิดอนุภาค
- 3) ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันทีไว้ที่บริเวณด้านหน้าอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคและบริเวณด้านหลังจุดพ่นละออง เพื่อวัดปริมาณฝุ่นละอองตั้งต้นจากแหล่งกำเนิดและปริมาณฝุ่นละอองภายหลังจากผ่านจุดดักจับฝุ่นละอองด้วยอุปกรณ์ฉีดพ่นละออง

4) ติดตั้งเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิในอากาศเพื่อเก็บข้อมูลในระหว่างการ

ทดลอง

แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในโรงเรือนทดลองแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในโรงเรือนทดลอง

- 1) อุปกรณ์กำเนิดอนุภาค 2) เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที 3) ป้อนน้ำอัดโนมิตี 4) หัวฉีดพ่นละอองน้ำ 5) เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิในบรรยากาศ

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

เก็บข้อมูลปริมาณ  $PM_{2.5}$  ก่อนและหลังผ่านม่านละอองสาร โดยใช้เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที ซึ่งสามารถตรวจวัดปริมาณโดยเฉลี่ย  $PM_{2.5}$  และ  $PM_{10}$  ไมครอนในอากาศเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยแสดงข้อมูลเป็นแบบรายนาที่ และเก็บตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  ที่ผ่านม่านละอองน้ำและสารสารลดแรงตึงผิวด้วยอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor) เพื่อนำตัวอย่างไปดูลักษณะการจับตัวทางกายภาพของ  $PM_{2.5}$  กับน้ำและสารลดแรงตึงผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

#### 3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ฐูป ขนาดความยาว 8 นิ้ว (20.32 เซนติเมตร)
2. เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที ยี่ห้อ Aeroqual รุ่น series 500
3. อุปกรณ์ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ ยี่ห้อ SKC รุ่น QuickTake 30
4. อุปกรณ์ คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor)



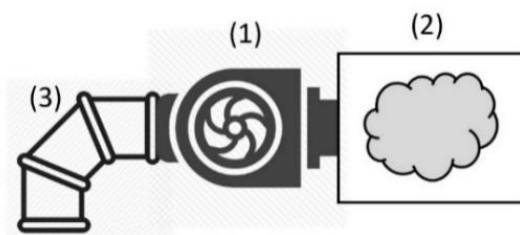
5. กระจาดยกรองชนิดใยแก้ว (Glass fiber) ขนาด 81 มิลลิเมตร
6. ตู้ดูดความชื้น
7. เครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิในอากาศแบบ Data logger
8. เครื่องดูดความชื้นในอากาศ ยี่ห้อ Xiaomi รุ่น Zhibai Smart Control Dehumidifier
9. ปืนน้ำอัดโนมิติ แรงดัน 1.2 MPa (12 บาร์) 0.8 MPa (8 บาร์) และ 0.48 MPa (4.8 บาร์)
10. พัดลมดูดอากาศแบบท่อขนาด 6 นิ้ว
11. หัวฉีดพ่นละอองน้ำ (Nozzle) ขนาด 0.1 มิลลิเมตร 0.3 มิลลิเมตร และ 0.6 มิลลิเมตร
12. มาตรวัดระดับแรงดันน้ำ
13. วาล์วปรับระดับแรงดันน้ำ
14. ตู้ประกอบติดตั้งสำหรับใส่เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
16. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่
  - 15.1 Tween-80 เจือจางที่ความเข้มข้น 1 % w/v
  - 15.2 Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1 % w/v
  - 15.3 Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1 % w/v
  - 15.4 Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1 % w/v

### 3.2.2 ช่วงเวลาดำเนินการศึกษาทดลอง

ดำเนินการทดลองการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อลด PM<sub>2.5</sub> ด้วยอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองในโรงเรือนทดลอง ช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 จนถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 โดยเก็บข้อมูลปริมาณ PM<sub>2.5</sub> เป็นระยะเวลา 15 นาทีต่อการทดลองแต่ละครั้ง

### 3.2.3 การเตรียมอุปกรณ์กำเนิดอนุภาค (dust generator)

การศึกษารั้งนี้ใช้อุปกรณ์กำเนิดอนุภาคแบบประยุกต์ โดยใช้พัดลมดูดอากาศ ประกอบเข้ากับกล่องสำหรับบรรจุควีนและท่อลมระบายอากาศแสดงดังภาพที่ 11 – 12 โดยต่อเข้ากับช่องระบายอากาศของโรงเรือนทดลอง (chamber test) โดยใช้ในการจัดรูปเป็นตัวแทนของอนุภาค  $PM_{2.5}$  ในโรงเรือนทดลอง เนื่องจากฝุ่นละอองที่มาจาก การเผาธูปมีขนาดอยู่ที่ 0.3 – 10 ไมครอนซึ่งกว่าร้อยละ 80 เป็นฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (Sabirova et al., 2021) อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นที่มาจาก การเผาธูปยังใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยทั่วไปในบรรยากาศ ดังนั้นการเผาธูปจึงเป็นหนึ่งในตัวแทนของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดเล็กโดยเฉพาะ  $PM_{2.5}$  ที่มักถูกนำไปใช้ในการศึกษาหรือทดลองในงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดและควบคุม  $PM_{2.5}$  ในบรรยากาศที่ผ่านมา (Y. Bian, Wang, Zhang, & Chen, 2020; Hernandez-Diaz et al., 2021; Niu, Bian, Xia, Zhang, & Chen, 2021; Woo, Yoo, & Jhung, 2021; Yang et al., 2020)



ภาพที่ 11 แบบจำลองอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคแบบประยุกต์

(1) พัดลมดูดอากาศ (2) กล่องบรรจุควีน (3) ท่อลมระบายอากาศ

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 12 อุปกรณ์กำเนิดอนุภาคแบบประยุกต์

### 3.2.4 การวัดอัตราการไหลของอากาศจากเครื่องกำเนิดอนุภาค

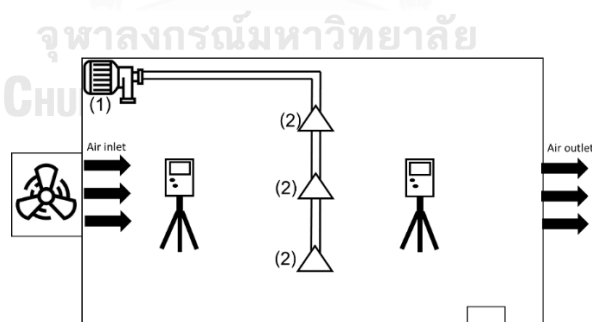
อัตราการไหลของอากาศคำนวณได้จากค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศจากอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคหรือพัดลมดูดอากาศ และพื้นที่หน้าตัดของช่องนำเข้าอากาศหน้าพัดลม ดังสมการ 2.1

### 3.2.5 การเตรียมอุปกรณ์ฉีดพ่นละออง

ชุดอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำที่ใช้ประกอบไปด้วยเครื่องปั้มน้ำอัตโนมัติแรงดันต่ำและหัวฉีดพ่นละอองน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ทั่วไปในท้องตลาด เพื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการนำไปฉีดพ่นในบริเวณพื้นที่อยู่อาศัย สำนักงาน หรือพื้นที่อื่นๆ ที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ภายในอาคาร (Indoor area) หรือพื้นที่กึ่งปิด ทำการเตรียมอุปกรณ์ดังกล่าวโดยนำปั้มน้ำอัตโนมัติต่อเข้ากับชุดท่อและหัวฉีดพ่นละอองน้ำ โดยติดตั้งหัวฉีดพ่นละอองน้ำในตำแหน่งกึ่งกลางตามแนวกว้างของโรงเรือนทดลองดังภาพที่ 12 – 13



ภาพที่ 13 อุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำ



ภาพที่ 14 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ฉีดพ่นละออง

1) ปั้มน้ำอัตโนมัติ 2) หัวฉีดพ่นละอองน้ำ

### 3.2.6 การวัดความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนทดลอง

บันทึกข้อมูลค่าความชื้นและอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ทำกรทดลอง ด้วยเครื่องวัดความชื้นและอุณหภูมิในอากาศแบบ Data logger ยี่ห้อ TENMARS รุ่น TM-305U ที่สามารถ

แสดงผลและบันทึกค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นและอุณหภูมิในบรรยากาศแบบอ่านค่าทันทีได้ โดยตั้งค่าเครื่องให้บันทึกข้อมูลโดยเฉลี่ยแบบรายนาทิต

### 3.2.7 การเตรียมเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที

ตั้งค่าเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที ให้บันทึกข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองแบบรายนาทิต จากนั้นนำเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันทีไปใส่ตู้ที่ได้ทำการดัดแปลงเพื่อป้องกันละอองน้ำเข้าสู่ตัวเครื่องเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อตัวเครื่องในขณะทำการทดลอง ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ตู้ดัดแปลงสำหรับใส่เครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก

### 3.2.8 การเตรียมกระดาษกรอง

นำกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตรที่ใช้สำหรับเก็บตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  เข้าไปอบในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบอย่างน้อย 3 ชั่งก่อนนำมาใช้ในการทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Mettler-Toledo มีค่าความละเอียดของการชั่งน้ำหนักที่สามารถอ่านได้อยู่ที่ 0.0001 มิลลิกรัม ซึ่งมีการสอบเทียบเพื่อควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการชั่งน้ำหนัก โดยใช้ลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 100 และ 200 มิลลิกรัมมาชั่งก่อนการชั่งกระดาษกรองทุกครั้ง

### 3.2.9 การเตรียมอุปกรณ์ปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ

ปรับอัตราการไหลของอากาศในเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศให้อยู่ที่ 28.3 ลิตรต่อนาที ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter)

### 3.2.10 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดสอบจะใช้รูปหอมขนาดความยาวรูป 20.32 เซนติเมตร ส่วนที่มีเนื้อรูปยาว 13.8 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้าน เริ่มต้นการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์กำเนิดอนุภาคเป่าอนุภาค

ฝุ่นละอองจากการจุ่มผ่านช่องระบายอากาศเข้าสู่โรงเรือนทดลอง เพื่อให้อนุภาคฝุ่นละอองเดินทางผ่านมาน้ำที่มาจากอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองที่ติดตั้งไว้ในโรงเรือนทดลอง โดยทำการฉีดพ่นน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที และติดตั้งเครื่องวัดฝุ่นละอองแบบอ่านค่าทันทีไว้บริเวณหน้าอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคและบริเวณหลังมาน้ำ เพื่อบันทึกค่าปริมาณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ก่อนผ่านและหลังผ่านมาน้ำ โดยแสดงขั้นตอนการทดสอบดังภาพที่ 16

โดยทดลองปรับเปลี่ยนลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกันดังนี้

- (1) ทดลองฉีดพ่นด้วยระดับความดันน้ำของอุปกรณ์ฉีดพ่นที่ต่างกัน ได้แก่ ความดันน้ำที่ 0.48 0.80 และ 1.20 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งเป็นระดับความดันน้ำของปั้มน้ำอัตโนมัติขนาดเล็กที่สามารถหาได้โดยทั่วไป
- (2) ทดลองฉีดพ่นด้วยหัวฉีดพ่นที่มีขนาดรูฉีดพ่นที่ต่างกัน ได้แก่ 0.1 0.3 และ 0.6 มิลลิเมตร
- (3) ทดลองฉีดพ่นด้วยจำนวนหัวฉีดพ่นที่ต่างกันจำนวน 1 หัว 2 หัว และ 3 หัว

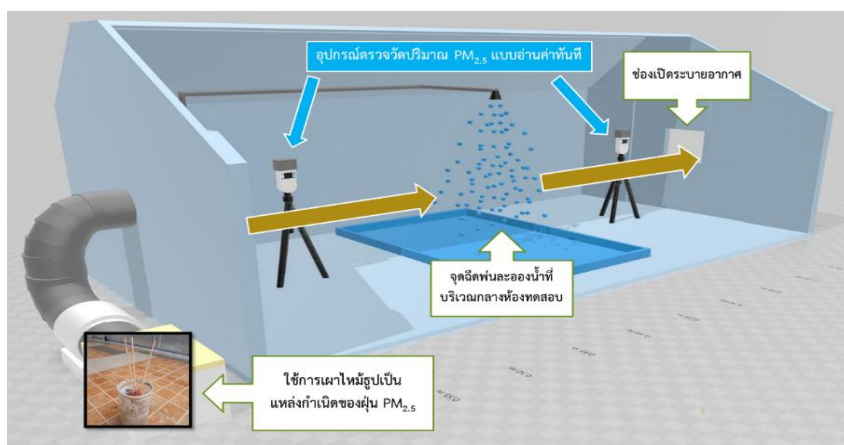
รูปแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 5

ทำการเลือกวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลด  $PM_{2.5}$  เพื่อนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของสารลดแรงตึงผิวที่นำมาใช้ในการทดสอบทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบด้วย

- Tween-80 เจือจางที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)
- Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)
- Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)
- Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric surfactant)

จากนั้นทำการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดด้วยลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดอีกครั้ง โดยครั้งนี้ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยชุดอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor) ที่ได้เตรียมเอาไว้สำหรับเก็บตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  โดยตั้งไว้บริเวณจุดด้านหลังมาน้ำฉีดพ่นละอองน้ำหรือบริเวณช่องเปิดขาออกของ

ห้องทดสอบดังภาพที่ 17 เพื่อนำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาการกระจายตัวตามขนาด และลักษณะการจับตัวกันทางกายภาพของ  $PM_{2.5}$  กับน้ำและสารลดแรงตึงผิวต่อไป

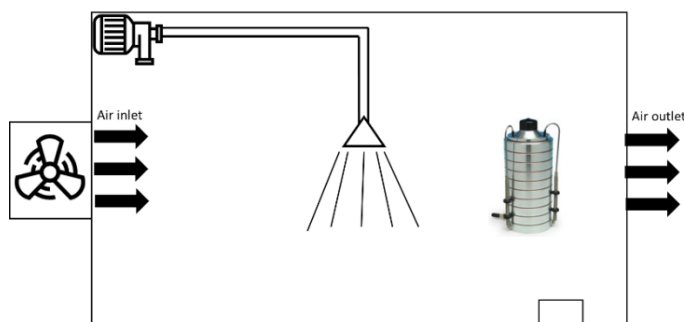


ภาพที่ 16 การดำเนินการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิด

ตารางที่ 5 รูปแบบการทดลอง

ขนาดหัวฉีดพ่น	ความดันน้ำที่ 0.48 MPa	ความดันน้ำที่ 0.8 MPa	ความดันน้ำที่ 1.2 MPa
0.1 มิลลิเมตร (มม.)	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*
0.3 มิลลิเมตร (มม.)	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*
0.6 มิลลิเมตร (มม.)	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*	หัวฉีด 1 หัว หัวฉีด 2 หัว หัวฉีด 3 หัว (N = 9)*

\*แต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ



ภาพที่ 17 แผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor)

โดยก่อนการเริ่มทำการทดสอบในแต่ละวันจะมีทดสอบชุดควบคุมเพื่อดูปริมาณการแพร่กระจายของฝุ่นละอองภายในห้องทดสอบ โดยการวัดค่าความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  บริเวณด้านหน้าอุปกรณ์กำเนิดอนุภาคและบริเวณด้านหลังจุดพ่นละอองน้ำ ในสภาวะที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองสารใดๆ โดยค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในนาที่ที่ 11-15 ของ  $PM_{2.5}$  ทั้ง 2 จุดต้องมีค่าความเข้มข้นต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 เพื่อให้แน่ใจว่า  $PM_{2.5}$  ไมครอนที่ถูกลอยออกมาจากเครื่องกำเนิดอนุภาคสามารถแพร่กระจายได้เท่ากันในพื้นที่ทั้งหมดของห้องทดสอบ นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศภายนอกห้องทดสอบ โดยใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการดำเนินการทดลอง เพื่อกำหนดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ปล่อยจากเครื่องกำเนิดอนุภาคเข้าสู่ภายในห้องทดสอบให้มีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าภายนอกห้องทดสอบและทำให้แน่ใจว่าปริมาณฝุ่นที่ใช้ในการทดสอบมาจากการเผาธูปที่ถูกกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดหลักและไม่ถูกรบกวนจากฝุ่นละอองที่จากภายนอกห้องทดสอบ

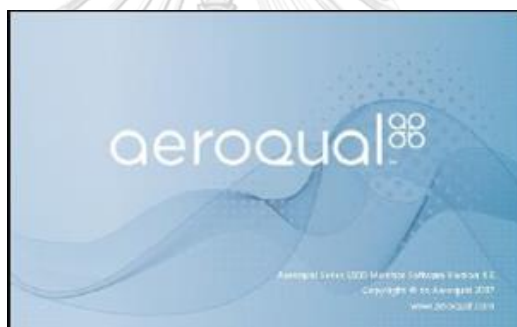
### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ ( $3^k$  Factorial Design) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย ( $k = 3$  ได้แก่ ความดันน้ำ ขนาดหัวฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีด) และกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยออกเป็น 3 ระดับ คือระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูงตามลำดับ ซึ่งการทดลองแบบ 3 ระดับนี้จะทำให้ผลการทดลองที่ได้จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง และมีข้อดี คือ จะไม่มีการเกิด Alias (Alias มีความหมายว่า ปนกันหรือติดกันจนแยกไม่ออก ซึ่งจะมีผลให้ปัจจัยที่ได้มีค่าปนกัน หรือเรียกว่ามีโครงสร้างคู่แฝดแฝง) และสามารถวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main effect) และ ความสัมพันธ์ (Interaction) ในการทดลองได้ทั้งหมด (โสภิตา ท่วมมี, 2550)

### 3.3 การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ไมครอน (PM<sub>2.5</sub>)

#### 3.3.1 การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> แบบอ่านค่าทันที

หลังจากเก็บข้อมูลความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวด้วยเครื่องวัดฝุ่นละอองแบบอ่านค่าทันทีที่บริเวณช่องเปิดขาเข้า และขาออกของห้องทดสอบรวมทั้งหมด 2 เครื่อง ซึ่งสามารถอ่านค่าความเข้มข้นได้ตั้งแต่ 0.001-1.000 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการบันทึกข้อมูลค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ได้จากการทดลองจากเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันที ด้วยโปรแกรม Aeroqual series s500 monitor Software version 6.5 แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยโปรแกรมจะแสดงค่าปริมาณฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยต่อนาทีเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นทำการปรับค่าความเข้มข้นฝุ่นให้เป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการทดสอบต่อไป



ภาพที่ 18 โปรแกรม Aeroqual series s500 monitor Software version 6.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.3.2 การศึกษาการกระจายตัวตามน้ำหนักของ PM<sub>2.5</sub>

1) การเก็บตัวอย่าง PM<sub>2.5</sub> แบบชั่งน้ำหนัก (Gravimetric method) เก็บตัวอย่าง PM<sub>2.5</sub> ที่ผ่านมันฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวโดยใช้เครื่องปั๊มเก็บตัวอย่างอากาศ (Air sample pump) ต่อเข้ากับอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาคที่ใส่กระดาษกรองชนิดใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตรทั้งหมด 8 ชั้น และปรับอัตราการไหลของอากาศให้อยู่ที่ 28.3 ลิตรต่อนาที ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ โดยนำกระดาษกรองที่ผ่านการเก็บตัวอย่างแล้วไปคำนวณความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก และดูลักษณะการจับตัวทางกายภาพตามการกระจายตัวตามขนาดของ PM<sub>2.5</sub> กับน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนในสภาวะปกติที่ไม่มีการฉีดพ่นสาร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



2) การคำนวณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก นำกระดาศกรองที่เก็บตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  หลังการทดสอบมาชั่งน้ำหนักอย่างน้อย 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของหนักกระดาศกรองทั้งก่อนและหลังการทดสอบมาคำนวณความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ความเข้มข้นของ } PM_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{W_{\text{post}} - W_{\text{pre}}}{V} \quad \text{สมการ 3.2}$$

โดย  $W_{\text{pre}}$  = น้ำหนักเฉลี่ยของกระดาศกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (ไมโครกรัม)

$W_{\text{post}}$  = น้ำหนักเฉลี่ยของกระดาศกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (ไมโครกรัม)

$V$  = ปริมาตรของอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

$$V (\text{m}^3) = \text{อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)} \times \text{เวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง (นาที)} \quad \text{สมการ 3.3}$$

3) การวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดของ  $PM_{2.5}$  นำค่าปริมาณความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  ที่ได้จากการคำนวณน้ำหนัก  $PM_{2.5}$  ด้วยวิธีเก็บตัวอย่างแบบชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) มาคำนวณค่าการกระจายตัวตามขนาดของ  $PM_{2.5}$  ดังสมการที่ 3.5

$$\frac{dC}{d \log D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,u} - \log D_{p,l}} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

โดย  $dN$  = ค่าความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$

$D_{p,u}$  = ค่าสูงสุดของขนาดอนุภาคในชั้นนั้น

$D_{p,l}$  = ค่าต่ำสุดของขนาดอนุภาคในชั้นนั้น

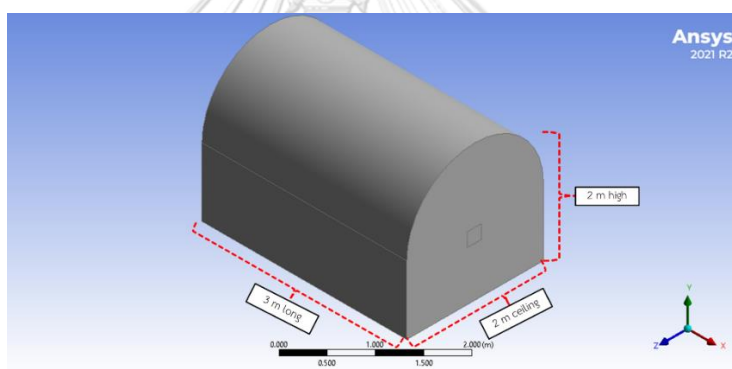
### 3.3.3 การสร้างแบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การสร้างแบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ช่วยในการคำนวณ (ฮันยบูร์น ภาววรรณ, 2560) โดยใช้วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเอาหลักการและวิธีการสร้างแบบจำลอง CFD 3 มิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 2021 R2 เพื่อใช้ในทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองของโรงเรือนทดลองในการศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของ  $PM_{2.5}$  จากอุปกรณ์ให้กำเนิดอนุภาค และศึกษาพฤติกรรมการดักจับ  $PM_{2.5}$  ของมันละอองน้ำจากอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำ

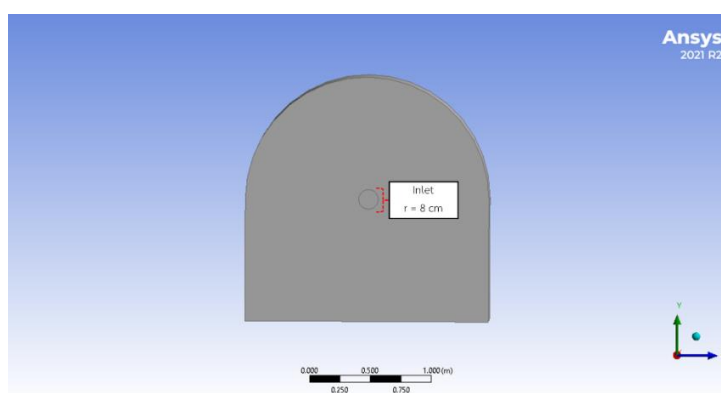
ด้วยลักษณะปัจจัยการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบแบบกึ่งปิด และสมการหลักของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีดังนี้

### 3.3.3.1 การสร้างแบบจำลองห้องทดสอบและสมการหลักที่ใช้

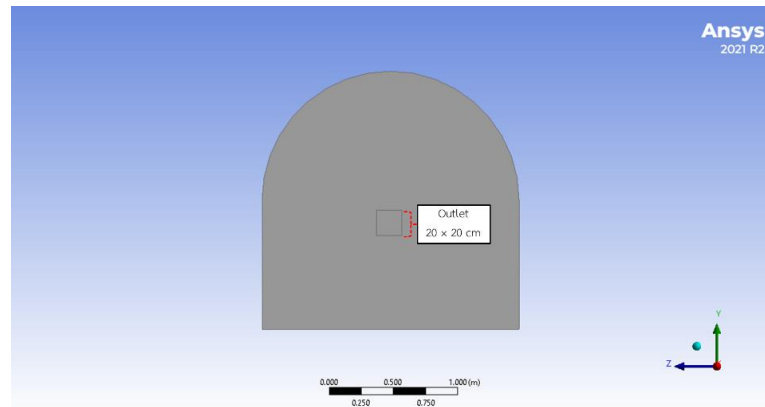
การสร้างแบบจำลองของห้องทดสอบแบบกึ่งปิดโดยใช้โปรแกรม ANSYS 2021 R2 โดยใช้โปรแกรม ANSYS Design modeler ในการสร้างโครงสร้างแบบจำลองห้องจำลองแบบกึ่งปิดมีขนาดความกว้าง 2 เมตร ความยาว 3 เมตร และความสูง 2 เมตร คิดเป็นปริมาตรของตัวห้องจำลองอยู่ที่ 10.71 ลูกบาศก์เมตร มีช่องเปิดขาเข้าเป็นรูวงกลมรัศมี 8 เซนติเมตร และช่องเปิดขาออกเป็นรูสี่เหลี่ยมขนาด 20 × 20 เซนติเมตร และใช้โปรแกรม CFD-Post ในการวิเคราะห์ผลแบบจำลองดังภาพที่ 19-21 และการวางตำแหน่งโดยฉีดพ่นละอองน้ำอยู่บริเวณกึ่งกลางของห้องทดสอบที่ระยะความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ดังภาพที่ 22 อ้างอิงจากห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้



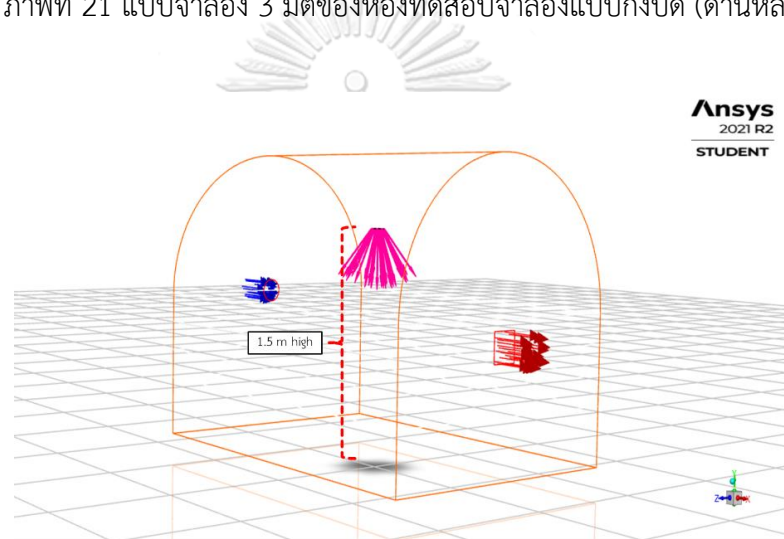
ภาพที่ 19 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด



ภาพที่ 20 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ด้านหน้า)



ภาพที่ 21 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ด้านหลัง)



ภาพที่ 22 แบบจำลอง 3 มิติของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด (ตำแหน่งหัวฉีดพ่นละอองน้ำ)

การคำนวณการไหลของอากาศและน้ำในแบบจำลองใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ในการคำนวณด้วยสมการควบคุมการไหลด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method) คำนวณลักษณะการไหลของอากาศในสภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteady State) โดยใช้ผลลัพธ์เฉลี่ยจากการคำนวณในช่วงระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวเสมือน (Quasi-steady State) (วินาทีที่ 100) และมีเงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า  $10^{-4}$  โดยกำหนดให้มวลอากาศที่เข้าสู่ระบบเป็นของไหลหลักที่มีความหนาแน่น ความหนืด และความดันคงที่ โดยสมการดังกล่าวมีดังนี้ (Piemjaiswang, 2018)

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

สมการที่ 3.5

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

$$\vec{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I}] \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )

$\vec{u}$  คือ เวกเตอร์ความเร็ว ( $\text{m/s}$ )

$\vec{g}$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก ( $\text{m/s}^2$ )

$p$  คือ ความดัน ( $\text{kg/m-s}^2$ )

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคละอองน้ำใช้วิธีตัวคุณลากรานจ์ (Lagrangian method) โดยอนุภาคละอองน้ำแต่ละตัวจะถูกจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ด้วยการสร้างชุดสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation) ซึ่งเป็นสมการสำหรับกำหนดตำแหน่ง ความเร็ว อุณหภูมิ และมวลของแต่ละอนุภาคที่จะนำมารวมเข้าด้วยกันเพื่อคำนวณพฤติกรรมมวลของอนุภาคละอองน้ำที่จำลองขึ้นในระบบ โดยทำการจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค ตั้งแต่จุดปล่อยอนุภาคเข้าสู่ระบบ (ช่องเปิดขาเข้า) จนกว่าจะออกจากระบบ (ช่องเปิดขาออก) หรือชนกับผนังจำลองของห้องทดสอบ และทุกครั้งที่มีการจำลองการปล่อยอนุภาคละอองน้ำเข้าสู่ระบบ สมการข้างต้นจะถูกคำนวณควบคู่กับมวลของไหล และสมการอนุรักษ์โมเมนตัมเพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ร่วมกับการไหลของของไหลหลักในระบบ (มวลอากาศ) ที่อยู่ในระบบต่อไป โดยสมการการกระจัดของอนุภาคมีดังนี้

$$x_p^n = x_p^o + U_p^o \delta t \quad \text{สมการที่ 3.8}$$

$$\left(\frac{dx_p}{dt}\right) = U_p \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

เมื่อ  $U_p^o$  คือความเร็วต้นของอนุภาค ( $\text{m/s}$ ) และเมื่อการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปถึงช่วงระยะเวลาที่กำหนด ความเร็วปลายของอนุภาคจะถูกคำนวณโดยใช้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของอนุภาคดังต่อไปนี้

$$m_p \left(\frac{dU_p}{dt}\right) = \Sigma F \quad \text{สมการที่ 3.10}$$

เมื่อ  $\Sigma F$  คือผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค (N) ซึ่งอนุภาคจะเคลื่อนที่ไม่ต่อเนื่องภายในตัวกลางของไหลต่อเนื่อง ด้วยอัตราเร่งของความเร็วจากแรงต่างๆ เช่น ความต่างของความเร็วอนุภาคและของไหล การกระจัดของของไหล เป็นต้น ดังสมการที่ 3.11

$$\left(\frac{dU_p}{dt}\right) = F_D(U - U_p) + F_g \quad \text{สมการที่ 3.11}$$

สมการแรงกดต่อหน่วยมวลอนุภาค (Drag force)

$$F_D = \frac{18u}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_r}{24} \quad \text{สมการที่ 3.12}$$

เมื่อ  $u$  คือ ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของของเหลว ( $m^2/s$ )

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค ( $kg/m^3$ )

$d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

สมการค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)

$$Re_r = \frac{\rho d_p |U_p - U|}{u} \quad \text{สมการที่ 3.13}$$

สมการแบบจำลอง Schiller Naumann Drag model แสดงดังสมการที่ 3.14

$$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.15 Re_r^{0.687}) \quad \text{สมการที่ 3.14}$$

### 3.3.3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการไหล

1) ของไหลที่ใช้ในแบบจำลองประกอบด้วย อากาศ และน้ำ โดยกำหนดคุณสมบัติของของไหลดังกล่าวในแบบจำลองดังนี้

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการจำลองการไหล

ชนิดของของไหล	ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )	ความหนืด ( $kg/m-s$ )
อากาศ	1.225	0.000018
น้ำ	998.2	0.001003

2) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) โดยการจำลองการไหลในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดจะมีการป้อนอากาศและน้ำเข้าไปในระบบ โดยมีรายละเอียดของแต่ละเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7 รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขต	รายละเอียด
ผนังของห้องทดสอบ	กำแพงหยุดนิ่ง (Stationary Wall) ไม่มีการลื่นไถล (No Slip) ผนังรูปแบบเกาะติด (trap)
ความเร็วของอากาศขาเข้า	0.8 m/s
ความเร็วของน้ำขาเข้า	
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	16.98 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	19.11 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	21.23 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	5.43 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	6.84 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	8.02 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	1.59 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	2.36 m/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	3.07 m/s
อัตราการไหลทั้งหมดของน้ำขาเข้า	
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	1.33E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	1.50E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	1.67E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	3.83E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	4.83E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	5.67E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.2 MPa	4.50E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.3 MPa	6.67E-04 kg/s
- หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มม. ที่แรงดัน 0.4 MPa	8.67E-04 kg/s
ขนาดอนุภาคละอองน้ำ	45 ไมครอน (Yu et al., 2021)

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละออง (Removal efficiency)

นำค่าความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  ที่ได้จากการบันทึกโดยเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบอ่านค่าทันทีมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองดังสมการ 3.3

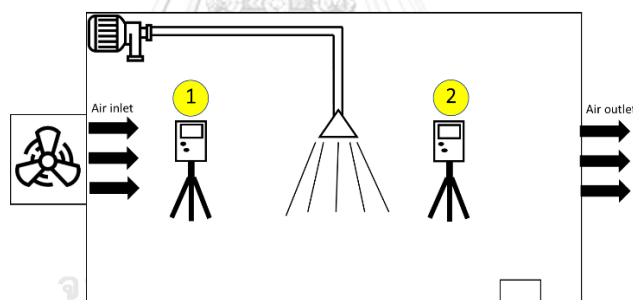
$$\text{Removal efficiency} = \frac{PM_{2.5(\text{pre})} - PM_{2.5(\text{post})}{PM_{2.5(\text{pre})}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.15}$$

เมื่อกำหนดให้

$PM_{2.5(\text{pre})}$  คือ ค่าความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ก่อนผ่านม่านละอองน้ำ

$PM_{2.5(\text{post})}$  คือ ค่าความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  หลังผ่านม่านละอองน้ำ

โดยจุดตรวจวัดค่าความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ก่อน และหลังผ่านม่านละอองน้ำด้วยเครื่องตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองแบบอ่านค่าทันที แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 23 จุดตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$

1) ก่อนผ่านม่านละอองน้ำ 2) หลังผ่านม่านละอองน้ำ

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

##### 3.4.2.1 การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics)

การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของข้อมูลทั่วไปที่ได้จากการทดลอง เช่น ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละออง ค่าร้อยละของประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละออง ในรูปแบบของ ตาราง กราฟ หรือแผนภาพ เป็นต้น

##### 3.4.2.2 การวิเคราะห์สถิติเชิงวิเคราะห์ (Analytical statistics)

1) การวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ทั้ง 4 ชนิด กับการฉีดพ่นด้วยน้ำธรรมดา และเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  ในวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน โดยใช้สถิติอนุमान Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95

2) การวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  และลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน (ขนาดหัวฉีด แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีด) โดยใช้สถิติสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation)

3) วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลใน ส่วนของปัจจัยร่วมระหว่างลักษณะวิธีการฉีดพ่นทั้ง 3 ปัจจัย (ขนาดหัวฉีด แรงดันฉีดพ่น และจำนวน หัวฉีด) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบ จำลองแบบกึ่งปิด โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ ( $3^k$  Factorial Design) โดย ตารางที่ 8 แสดงการจำแนกปัจจัยและระดับที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ซึ่งในการกำหนด ระดับปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบนั้นอ้างอิงจากขนาดของหัวฉีดพ่นละอองน้ำ ระดับแรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีดที่ใช้ในการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ของการศึกษาในครั้งนี้

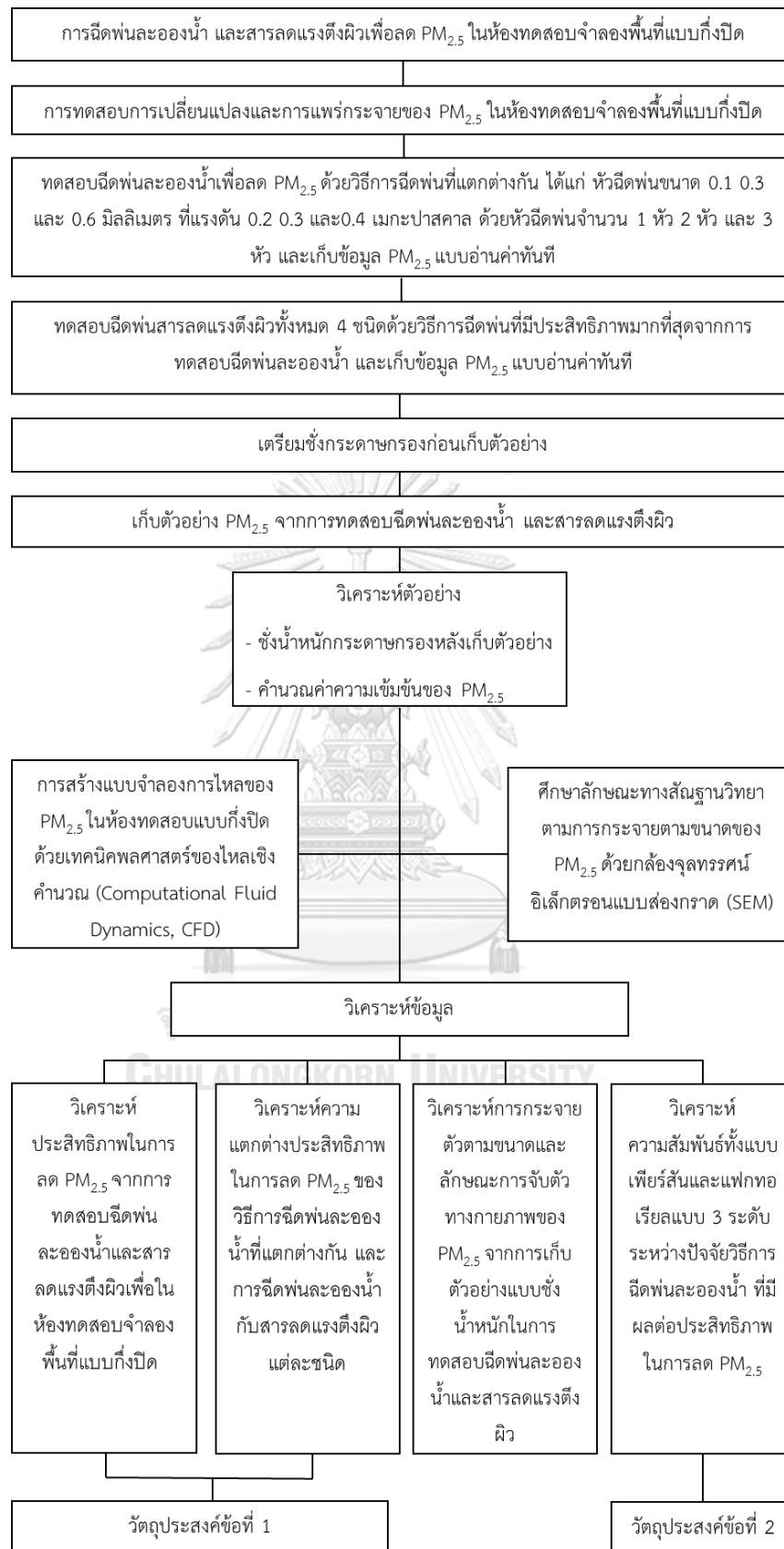
ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัย ที่ใช้ในการทดลองแบบแฟกทอเรียล

ปัจจัย	ระดับ	รหัส
ขนาดหัวฉีดพ่น	0.1 มิลลิเมตร	-1
	0.3 มิลลิเมตร	0
	0.6 มิลลิเมตร	1
ระดับแรงดันฉีดพ่น	0.2 เมกะปาสคาล	-1
	0.3 เมกะปาสคาล	0
	0.4 เมกะปาสคาล	1
จำนวนหัวฉีดพ่น	1 หัว	-1
	2 หัว	0
	3 หัว	1

จากการรายละเอียดการดำเนินการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนการศึกษาได้

ดังภาพที่ 24





ภาพที่ 24 รายละเอียดลำดับขั้นตอนการศึกษา

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

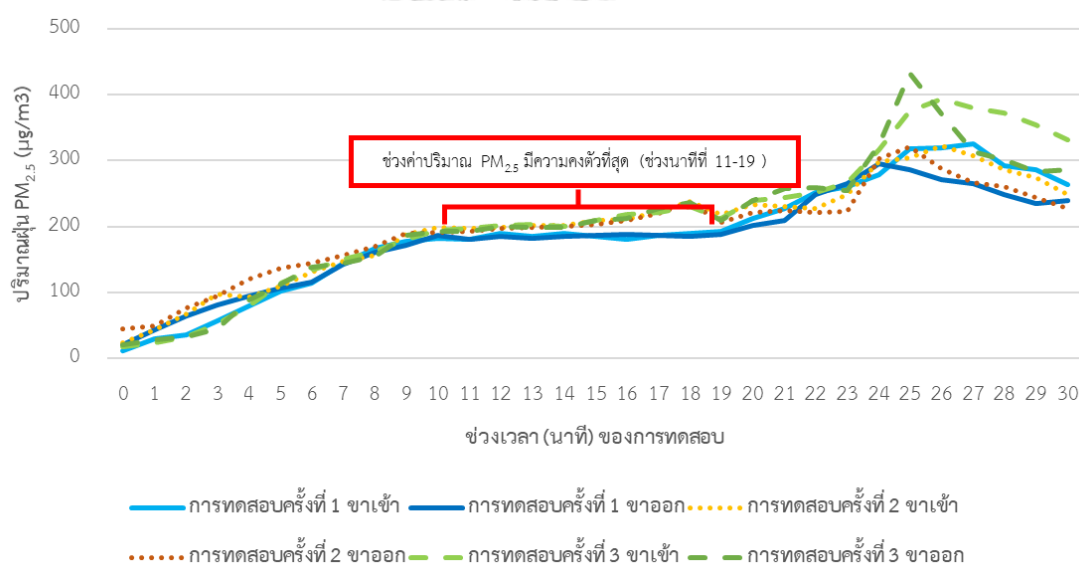
#### 4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> ก่อนการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

##### 4.1.1 ช่วงระยะเวลาการแพร่กระจายของ PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

ทำการศึกษาระยะเวลาการกระจายตัวของ PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด เพื่อหาช่วงระยะเวลาที่ PM<sub>2.5</sub> มีค่าปริมาณความเข้มข้นคงที่มากที่สุดหลังจากทำการปล่อยฝุ่นควันจากการเผาธูปเข้าสู่ระบบทดสอบห้องจำลองแบบกึ่งปิดที่ได้ออกแบบไว้ โดยทำการทดสอบปล่อยควันธูปจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ห้องทดสอบเป็นระยะเวลา 30 นาที และทำการเก็บข้อมูล PM<sub>2.5</sub> ในระบบที่บริเวณหน้าช่องเปิดขาเข้าของอุปกรณ์ปล่อยอนุภาคฝุ่นละออง (Inlet) และบริเวณช่องเปิดขาออก (Outlet) บริเวณด้านหลังห้องจำลองพื้นที่การทดสอบแบบกึ่งด้วยเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบเรียลไทม์ ยี่ห้อ Aeroqual รุ่น series 500 โดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ชั่วโมง (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ก)

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 25 พบว่าในช่วงนาที่ที่ 9 – 19 ของการทดสอบมีความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> ที่บริเวณหน้าช่องเปิดขาเข้าของอุปกรณ์ปล่อยอนุภาคฝุ่นละออง (Inlet) และบริเวณช่องเปิดขาออก (Outlet) น้อยที่สุด โดยจากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง พบว่าช่วงเริ่มต้นการทดลองในนาที่ที่ 1 - 8 ปริมาณความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ระหว่างจุดตรวจวัดบริเวณช่องเปิดขาเข้า (Inlet) และช่องเปิดขาออก (Outlet) มีความแตกต่างกัน เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มปล่อยควันจากการเผาธูปเข้าสู่ระบบทำให้ลักษณะการแพร่กระจายของ PM<sub>2.5</sub> ในระบบยังไม่คงที่ และยังไม่สามารถแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึงทั้งระบบ โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างอยู่ที่  $7.8 \pm 6.2$ ,  $15.7 \pm 13.6$  และ  $19.2 \pm 18$  ตามลำดับ ในขณะที่นาที่ที่ 9 – 19 มีค่าร้อยละความแตกต่างอยู่ที่  $1.9 \pm 1.2$ ,  $1.9 \pm 1.5$  และ  $2 \pm 1.1$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าวลักษณะการแพร่กระจายจากการเคลื่อนที่ของ PM<sub>2.5</sub> จากช่องเปิดขาเข้า (Inlet) ไปยังช่องเปิดขาออก (Outlet) มีความต่อเนื่องและแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึง สังเกตได้จากค่าปริมาณความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่มีความคงที่ และมีค่าความแตกต่างกันน้อย ในขณะที่ และในนาที่ที่ 20 – 30 มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ PM<sub>2.5</sub> อย่างรวดเร็ว โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างอยู่ที่  $9.5 \pm 7.4$ ,  $7.2 \pm 4.1$  และ  $9.8 \pm 6.2$  ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าในช่วงเวลานาที่ที่ 20 – 30 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ PM<sub>2.5</sub> ที่มาจากธูปเกิดการเปลี่ยนแปลงไป สังเกตได้จากปริมาณฝุ่นละอองที่วัดได้บริเวณหน้าช่องเปิดขาเข้าของอุปกรณ์ปล่อย

อนุภาคฝุ่นละออง (Inlet) และบริเวณช่องเปิดขาออก (Outlet) ที่มีปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เนื้อรูปถูกเผาไหม้จนหมด แต่ยังคงมีการเผาไหม้ต่อไปยังบริเวณก้านรูปซึ่งมีลักษณะขององค์ประกอบมวลสารต่างๆ แตกต่างจากส่วนที่เป็นเนื้อรูป ส่งผลให้ลักษณะความเป็นเนื้อเดียวกันของมวลฝุ่นละอองเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของ  $PM_{2.5}$  จากบริเวณช่องเปิดขาเข้า (Inlet) และช่องเปิดขาออก (Outlet) ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกระยะเวลาในการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในนาที่ที่ 11 - 15 นำมาวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ต่อไปเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  มีความคงตัวที่สุด

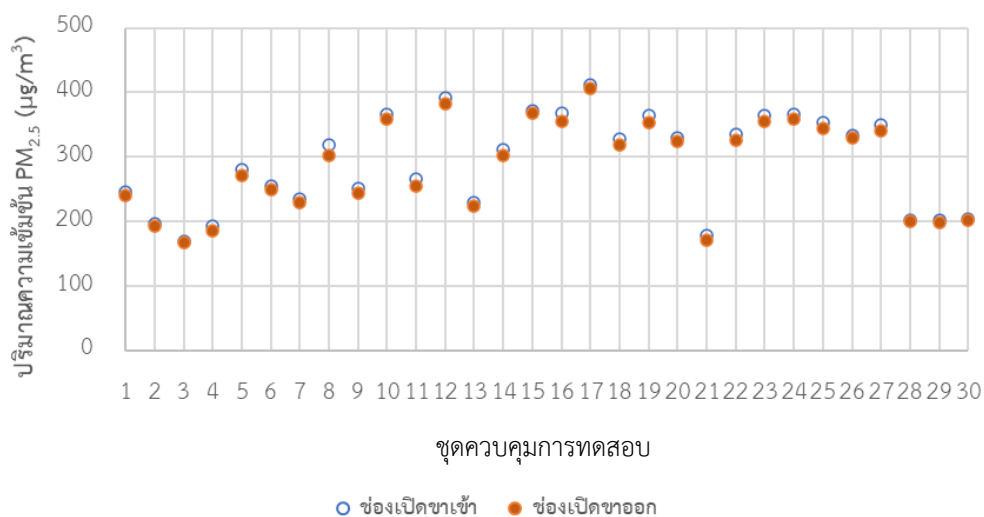


ภาพที่ 25 ปริมาณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  จากการทดสอบการแพร่กระจายของ  $PM_{2.5}$  ระยะยาว (30 นาที) ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

#### 4.1.2 การทดสอบการแพร่กระจายของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

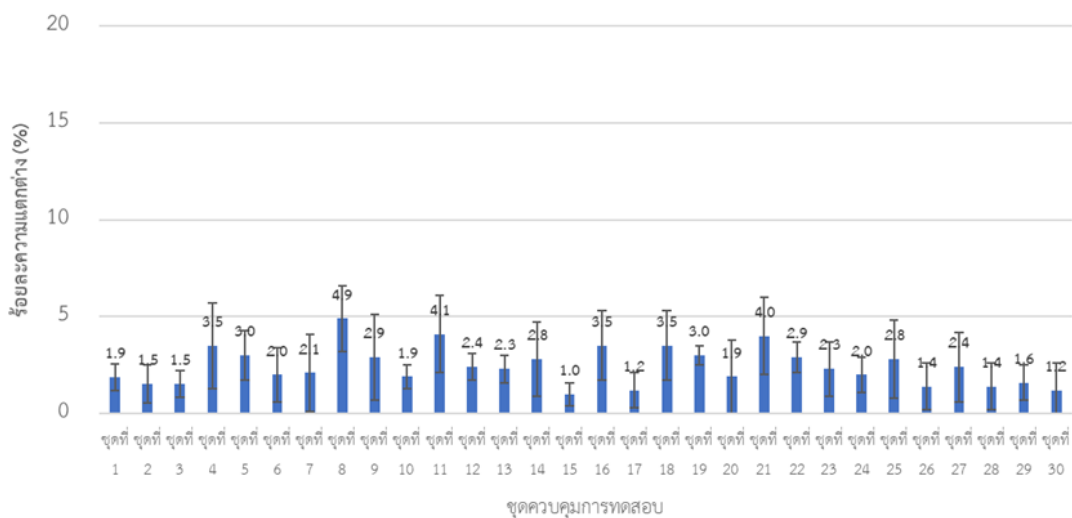
ทำการทดสอบการแพร่กระจายของ  $PM_{2.5}$  ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากควันรูป โดยใช้วิธีการวัดปริมาณ  $PM_{2.5}$  แบบอ่านค่าทันที (รายนาที่) ด้วยเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบเรียลไทม์ ยี่ห้อ Aeroqual รุ่น series 500 จากควันรูปที่มาจากเครื่องกำเนิดอนุภาคฝุ่นละอองที่บริเวณหน้าช่องเปิดขาเข้าของอุปกรณ์ปล่อยอนุภาคฝุ่นละออง (Inlet) และบริเวณช่องเปิดขาออก (Outlet) บริเวณด้านหลังห้องจำลองพื้นที่การทดสอบแบบกึ่งปิดเป็นเวลา 15 นาทีโดยไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำหรือสารลดแรงตึงผิว ซึ่งการทดสอบชุดควบคุมนี้จะดำเนินการก่อนเริ่มทำการทดลองฉีดพ่น

น้ำและสารลดแรงตึงผิวในทุกวัน ทั้งหมด 30 ชุดควบคุมการทดสอบ โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 26 (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดรวบรวมในภาคผนวก ข)



ภาพที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  บริเวณช่องเปิดขาเข้าและขาออกของห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดจากชุดควบคุมการทดสอบทั้งหมด

จากผลการทดสอบการแพร่กระจายของ  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดพบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ในช่วงเวลาที่ 11 – 15 ของการทดสอบบริเวณหน้าช่องเปิดขาเข้าของอุปกรณ์ปล่อยอนุภาคฝุ่นละออง (Inlet) และบริเวณช่องเปิดขาออก (Outlet) ของชุดควบคุมการทดสอบที่ 1 - 30 มีค่าความแตกต่างมากที่สุดและน้อยที่สุดอยู่ที่  $4.9 \pm 1.7$  และ  $1 \pm 0.6$  ตามลำดับ โดยคิดเป็นค่าความแตกต่างในทุกชุดการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $2.4 \pm 0.97$  ซึ่งผลการทดสอบนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นของ  $PM_{2.5}$  ที่มาจากการจัดรูปเป็นแหล่งกำเนิดสามารถแพร่กระจายภายในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิดได้อย่างทั่วถึงในปริมาณที่เท่าๆ กันของทุกจุดการตรวจวัด โดยการเปรียบเทียบค่าร้อยละความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  จากทุกการทดสอบของชุดควบคุมแสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ค่าร้อยละความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> จากชุดควบคุมการทดสอบทั้งหมด

## 4.2 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

### 4.2.1 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยลักษณะวิธีการฉีดพ่นต่างๆ

ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการฉีดพ่นน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดด้วยการปรับเปลี่ยนรูปแบบวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน ได้แก่

- 1) หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 0.3 และ 0.6 มิลลิเมตร
- 2) ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 0.3 และ 0.4 เมกะปาสกาล
- 3) จำนวนหัวฉีดพ่น จำนวน 1 2 และ 3 หัวฉีด

โดยใช้การเผาไหม้ของธูปเป็นแหล่งกำเนิด PM<sub>2.5</sub> ปล่องเข้าสู่ระบบทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดอนุภาคและใช้วิธีการวัดปริมาณ PM<sub>2.5</sub> แบบอ่านค่าทันที (รายนาที) ด้วยเครื่องวัดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กแบบเรียลไทม์ ยี่ห้อ Aeroqual รุ่น series 500 ที่บริเวณช่องเปิดป้อนอากาศขาเข้า (Inlet) ซึ่งอยู่บริเวณหน้าม่านละอองน้ำ และช่องระบายอากาศขาออก (Outlet) ซึ่งอยู่บริเวณหน้าม่านละอองน้ำของห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิดเป็นเวลา 15 นาที โดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ และมีการเก็บข้อมูลความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนทดสอบและระหว่างทดสอบพบว่าความชื้นในทุกการทดสอบมีความแตกต่างกันโดยระหว่างการทดสอบค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากช่วงก่อนเริ่มการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $8.75 \pm 3.44$  และอุณหภูมิช่วงระหว่างการทดสอบลดลง

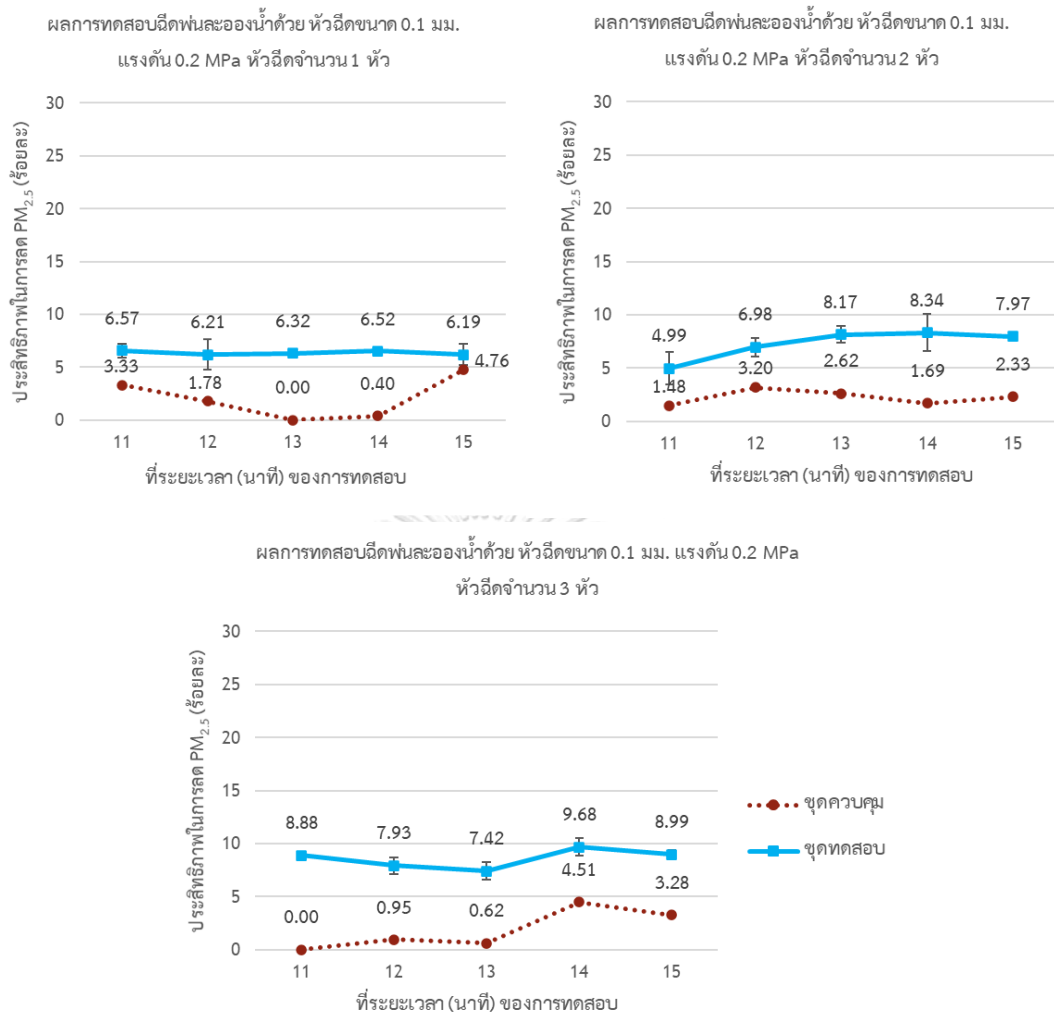
จากช่วงก่อนการทดสอบเฉลี่ยอยู่ที่  $0.44 \pm 0.31$  องศาเซลเซียส (ข้อมูลผลการตรวจวัดปรากฏดังภาคผนวก ค)

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฉีดพ่นน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดทุกสภาวะการทดสอบ (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ง) พบว่าชุดการทดสอบที่ฉีดพ่นน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ด้วยระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.2 เมกะปาสคาล โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนหัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  โดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $6.4 \pm 0.4$ ,  $7.3 \pm 0.3$  และ  $8.6 \pm 0.3$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 9 และภาพที่ 28) ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล และจำนวนหัวฉีด 1 2 และ 3 หัว มีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ  $10.6 \pm 0.1$ ,  $10.1 \pm 0.1$  และ  $10.2 \pm 0.1$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 10 และภาพที่ 29) และที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล และจำนวนหัวฉีด 1 2 และ 3 หัว มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $11.6 \pm 0.8$ ,  $10.1 \pm 0.1$  และ  $10.4 \pm 0.1$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 30)

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ( $\mu g/m^3$ )		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ $PM_{2.5}$ (ร้อยละ)
		เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	248.6 ± 28.8	231.8 ± 27.2	6.8 ± 0.7
	ครั้งที่ 2	242.8 ± 28.2	227.8 ± 27.1	6.2 ± 1.0
	ครั้งที่ 3	263.4 ± 31.2	247.2 ± 28.6	6.1 ± 0.3
				เฉลี่ย 6.4 ± 0.4
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	212.8 ± 18.2	197.4 ± 13.7	7.1 ± 2.0
	ครั้งที่ 2	253.4 ± 23.6	233.8 ± 18.5	7.6 ± 2.1
	ครั้งที่ 3	209.4 ± 21.4	194.4 ± 19.0	7.1 ± 0.8
				เฉลี่ย 7.3 ± 0.3
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	256.4 ± 26.9	234 ± 23.6	8.7 ± 1.3
	ครั้งที่ 2	229.2 ± 24.3	210.2 ± 21.7	8.3 ± 1.1
	ครั้งที่ 3	239.0 ± 21.4	218.0 ± 19.0	8.8 ± 0.7
				เฉลี่ย 8.6 ± 0.3

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75



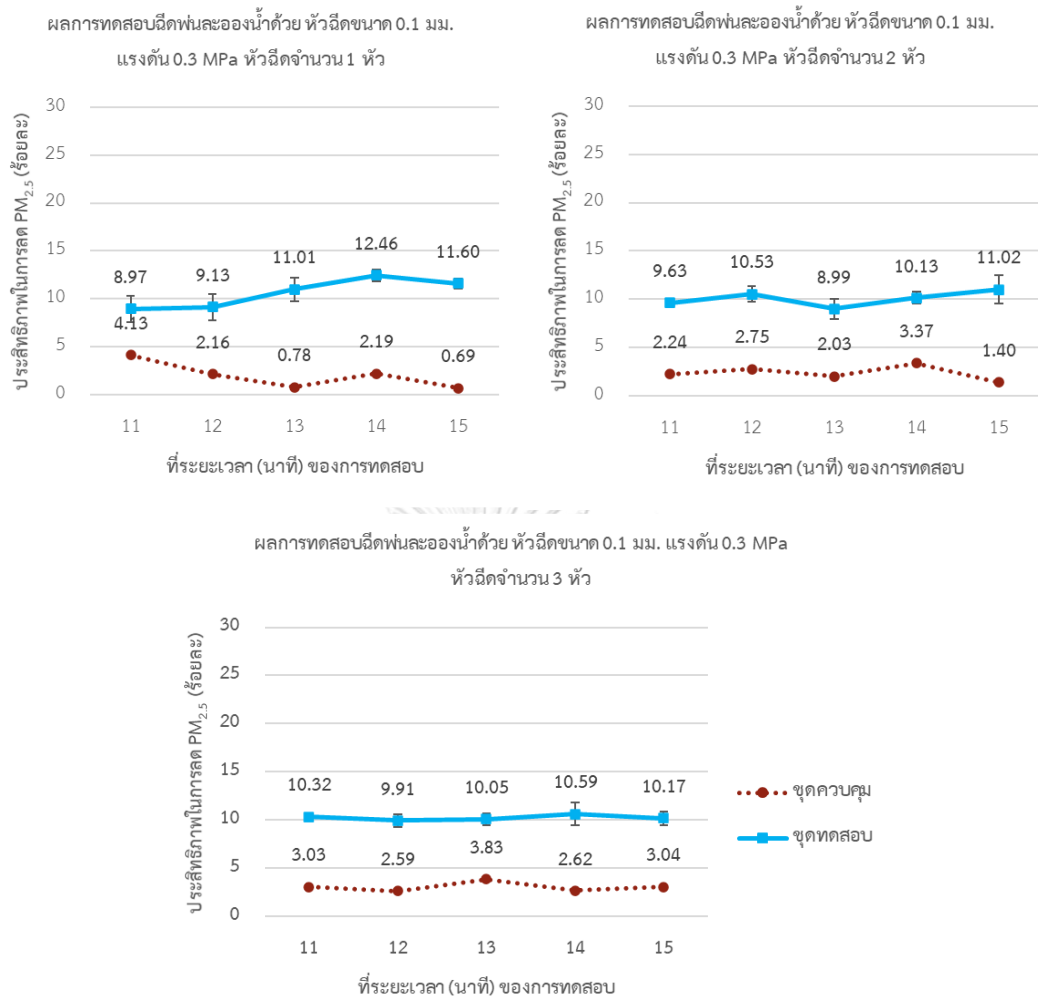
ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	258.2 ± 20.3	230.6 ± 17.2	10.7 ± 0.8
	ครั้งที่ 2	239.8 ± 22.8	214.2 ± 15.2	10.5 ± 2.7
	ครั้งที่ 3	234.0 ± 22.9	208.6 ± 17.2	10.7 ± 1.5
				<b>เฉลี่ย 10.6 ± 0.1</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	234.4 ± 14.3	210.8 ± 10.9	10 ± 1.6
	ครั้งที่ 2	233.2 ± 19.0	209.8 ± 16.7	10 ± 0.8
	ครั้งที่ 3	226.6 ± 15.3	203.6 ± 13.6	10.1 ± 0.8
				<b>เฉลี่ย 10.1 ± 0.1</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	358 ± 21.3	321.6 ± 20.4	10.2 ± 0.5
	ครั้งที่ 2	406 ± 18.3	364.8 ± 16.0	10.1 ± 0.6
	ครั้งที่ 3	360.6 ± 17.4	323.4 ± 14.0	10.3 ± 1.0
				<b>เฉลี่ย 10.2 ± 0.1</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75



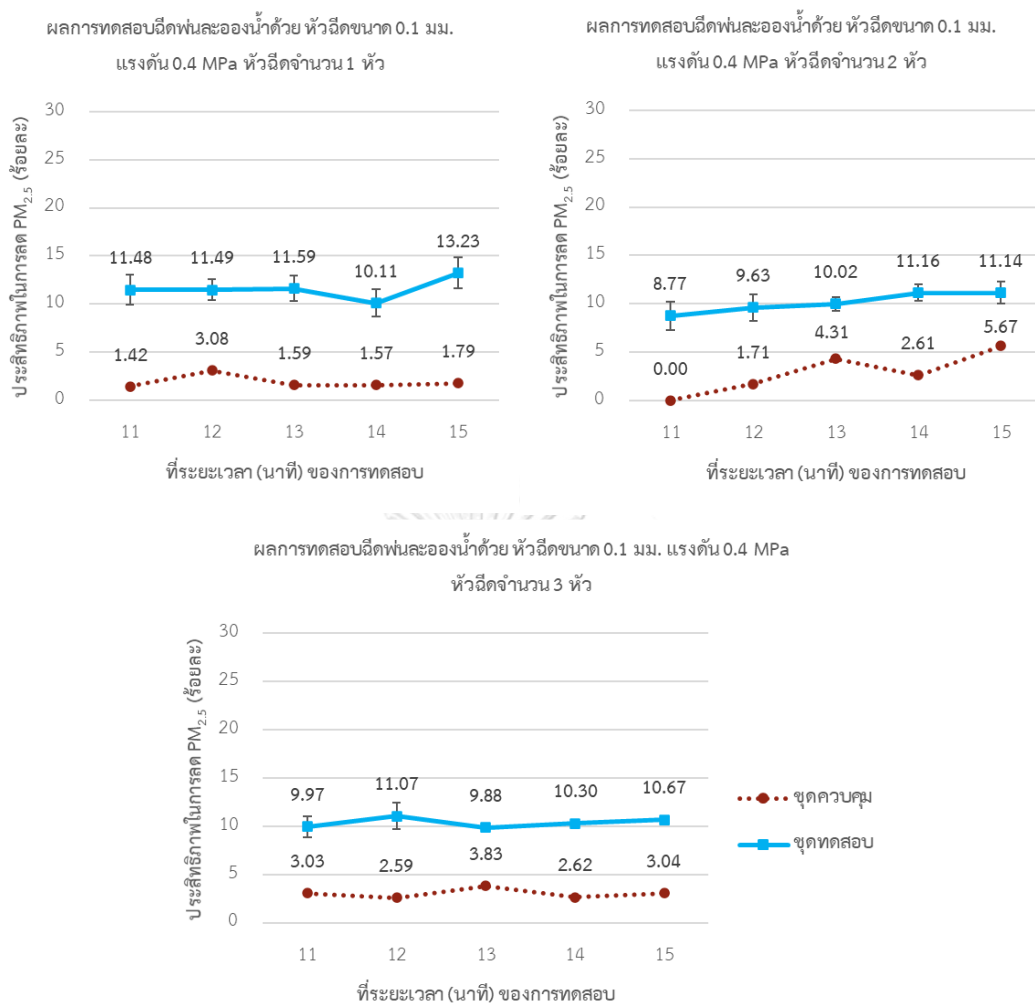


ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการ ลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	298.6 ± 20.1	264.2 ± 16.4	11.5 ± 2.0
	ครั้งที่ 2	281.4 ± 16.4	251.0 ± 14.5	10.8 ± 1.2
	ครั้งที่ 3	314.0 ± 13.8	274.8 ± 10.8	12.5 ± 1.1
				<b>เฉลี่ย 11.6 ± 0.8</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	413.0 ± 19.7	371.0 ± 10.4	10.1 ± 1.8
	ครั้งที่ 2	453.6 ± 18.2	407.8 ± 10.3	10.1 ± 1.6
	ครั้งที่ 3	449.4 ± 10.3	403.2 ± 10.5	10.3 ± 0.6
				<b>เฉลี่ย 10.1 ± 0.1</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	396.6 ± 22.7	355.2 ± 19.9	10.4 ± 1.2
	ครั้งที่ 2	385.4 ± 29.0	345.8 ± 25.2	10.3 ± 0.7
	ครั้งที่ 3	400.2 ± 22.2	358.4 ± 20.0	10.5 ± 0.6
				<b>เฉลี่ย 10.4 ± 0.3</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75



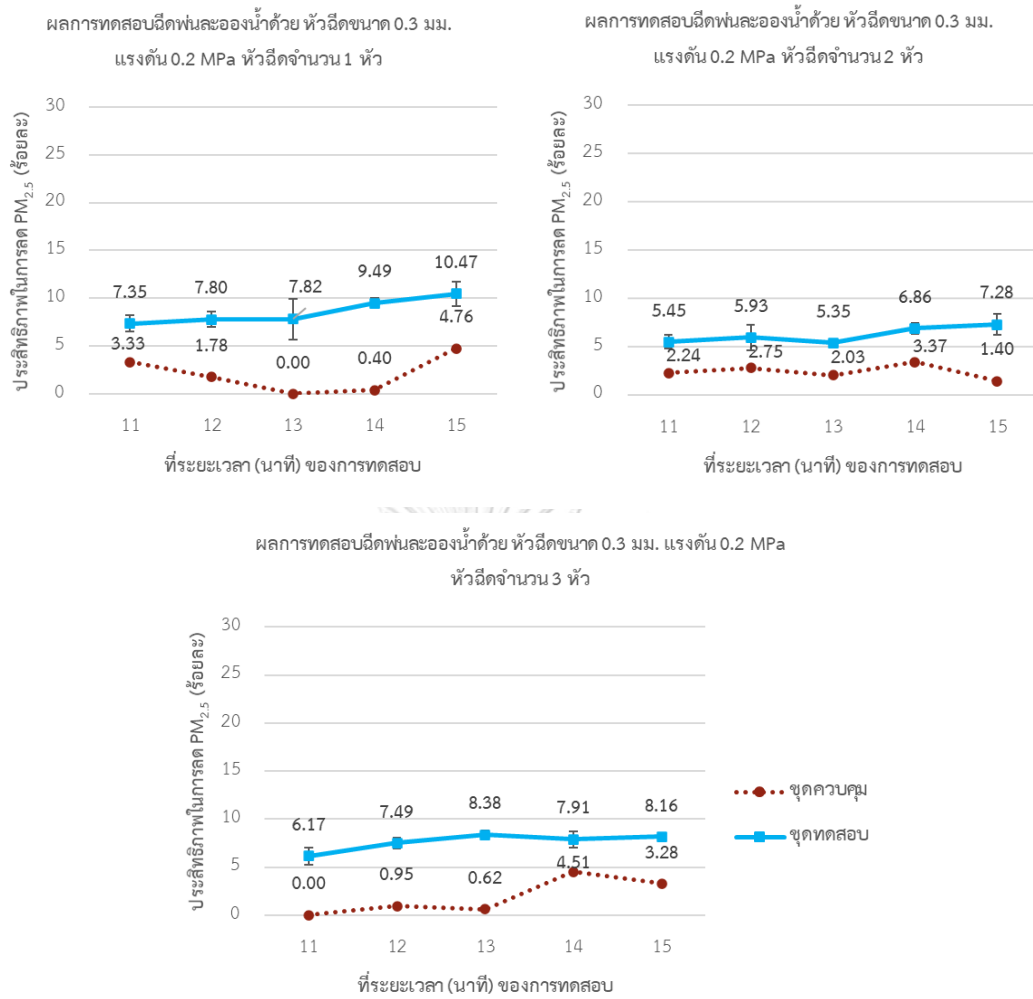
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ในกรณีที่ทดสอบด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ง) พบว่าด้วยระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.2 เมกะปาสคาล มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  เฉลี่ยร้อยละ  $8.6 \pm 0.2$ ,  $6.2 \pm 0.1$  และ  $7.6 \pm 0.1$  เมื่อใช้จำนวนหัวฉีด 1 2 และ 3 หัว ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 12 และภาพที่ 31) ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล มีประสิทธิภาพเมื่อใช้จำนวนหัวฉีด 1 2 และ 3 หัว โดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $14.1 \pm 0.1$ ,  $11.5 \pm 1.4$  และ  $14.4 \pm 0.2$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 13 และภาพที่ 32) และที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $16.6 \pm 0.8$ ,  $17.4 \pm 0.7$  และ  $16.8 \pm 0.5$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 14 และภาพที่ 33)

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	221.4 ± 28.7	201.8 ± 24.1	8.7 ± 1.4
	ครั้งที่ 2	291.8 ± 26.7	266.0 ± 18.9	8.7 ± 2.3
	ครั้งที่ 3	226.0 ± 26.4	207.0 ± 22.2	8.3 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 8.6 ± 0.2</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	310.0 ± 16.6	291.0 ± 14.2	6.1 ± 1.0
	ครั้งที่ 2	187.4 ± 18.2	175.6 ± 16.5	6.3 ± 1.0
	ครั้งที่ 3	234.6 ± 18.9	220.0 ± 15.5	6.2 ± 1.5
				<b>เฉลี่ย 6.2±0.1</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	237.8 ± 24.3	219.6 ± 20.9	7.6 ± 0.8
	ครั้งที่ 2	223.6 ± 23.8	206.2 ± 19.6	7.7 ± 1.4
	ครั้งที่ 3	247.2 ± 23.3	228.4 ± 20.9	7.6 ± 0.8
				<b>เฉลี่ย 7.6 ± 0.1</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75

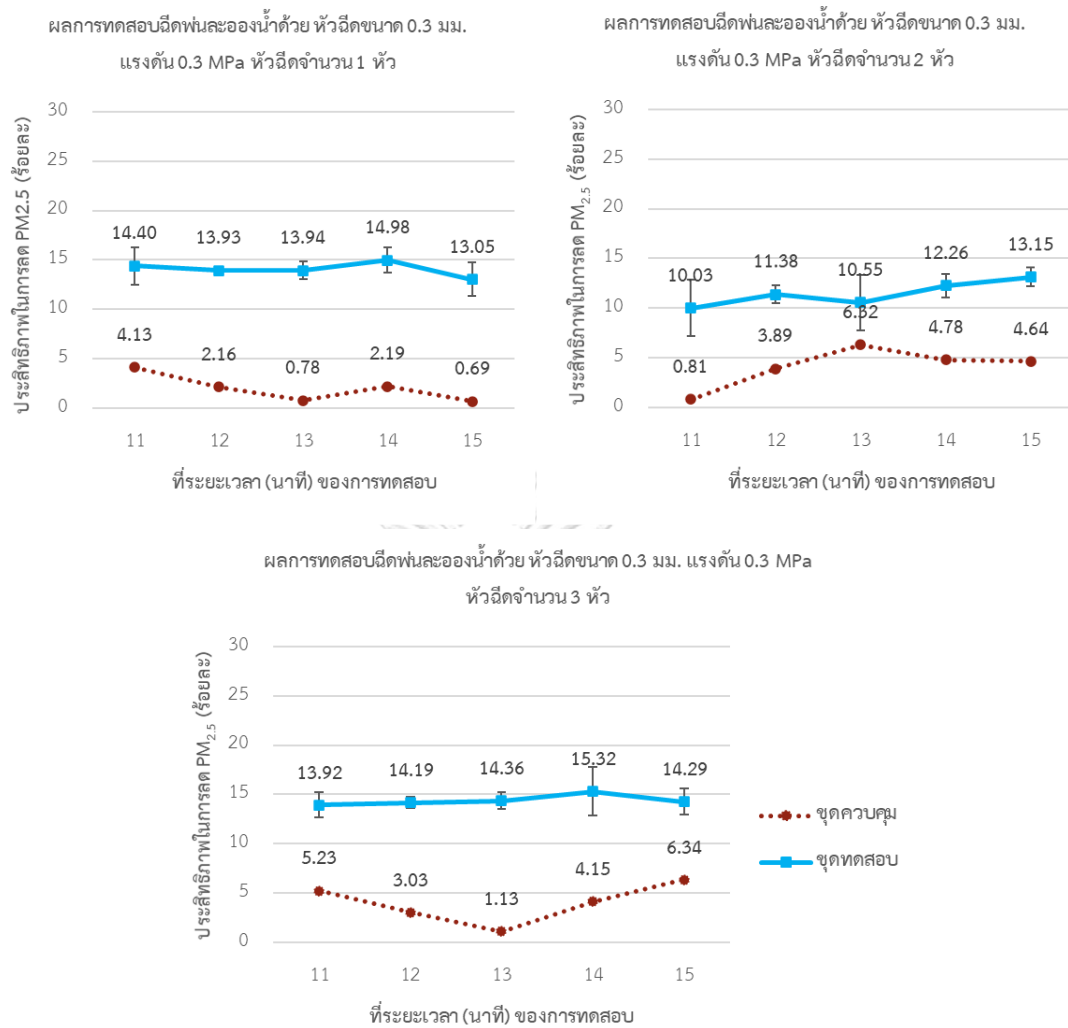


ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	275.4 ± 20.3	236.8 ± 17.2	14.1 ± 1.3
	ครั้งที่ 2	283.4 ± 14.8	243.8 ± 16.3	14.0 ± 1.9
	ครั้งที่ 3	288.8 ± 26.4	247.8 ± 21.6	14.2 ± 0.7
				<b>เฉลี่ย 14.1 ± 0.1</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	324.2 ± 21.7	291.0 ± 12.5	10.1 ± 2.6
	ครั้งที่ 2	408.4 ± 12.5	355.6 ± 8.1	12.9 ± 0.8
	ครั้งที่ 3	415.6 ± 11.9	368.2 ± 9.0	11.4 ± 1.4
				<b>เฉลี่ย 11.5 ± 1.4</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	291.8 ± 19.4	250.2 ± 16.8	14.3 ± 1.1
	ครั้งที่ 2	295.4 ± 21.5	252.8 ± 19.6	14.4 ± 1.7
	ครั้งที่ 3	316.0 ± 21.3	269.8 ± 15.2	14.6 ± 1.4
				<b>เฉลี่ย 14.4 ± 0.2</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75



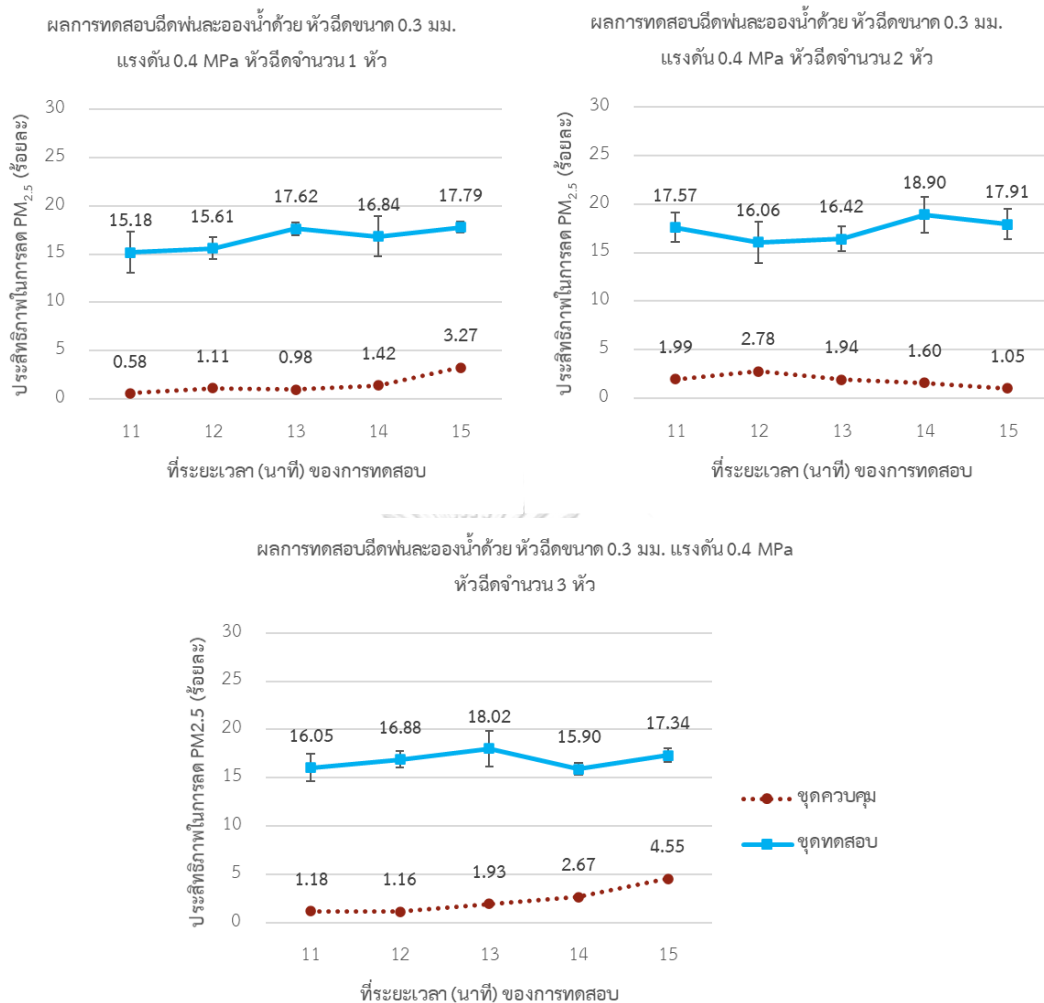
ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	421.6 ± 28.5	347.4 ± 20.5	17.6 ± 0.8
	ครั้งที่ 2	343.8 ± 17.2	288.4 ± 9.8	16.0 ± 2.3
	ครั้งที่ 3	360.6 ± 20.6	302.0 ± 15.0	16.2 ± 1.4
				<b>เฉลี่ย 16.6 ± 0.8</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	432.6 ± 18.7	360.4 ± 12.6	16.6 ± 1.9
	ครั้งที่ 2	433.8 ± 21.5	358.2 ± 12.1	17.3 ± 2.2
	ครั้งที่ 3	433.0 ± 16.7	354.6 ± 17.4	18.1 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 17.4 ± 0.7</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	456.0 ± 27.8	379.6 ± 21.9	16.7 ± 0.9
	ครั้งที่ 2	451.2 ± 28.8	376.8 ± 19.5	16.4 ± 1.3
	ครั้งที่ 3	485.8 ± 23.2	401.6 ± 22.1	17.3 ± 1.7
				<b>เฉลี่ย 16.8 ± 0.5</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75





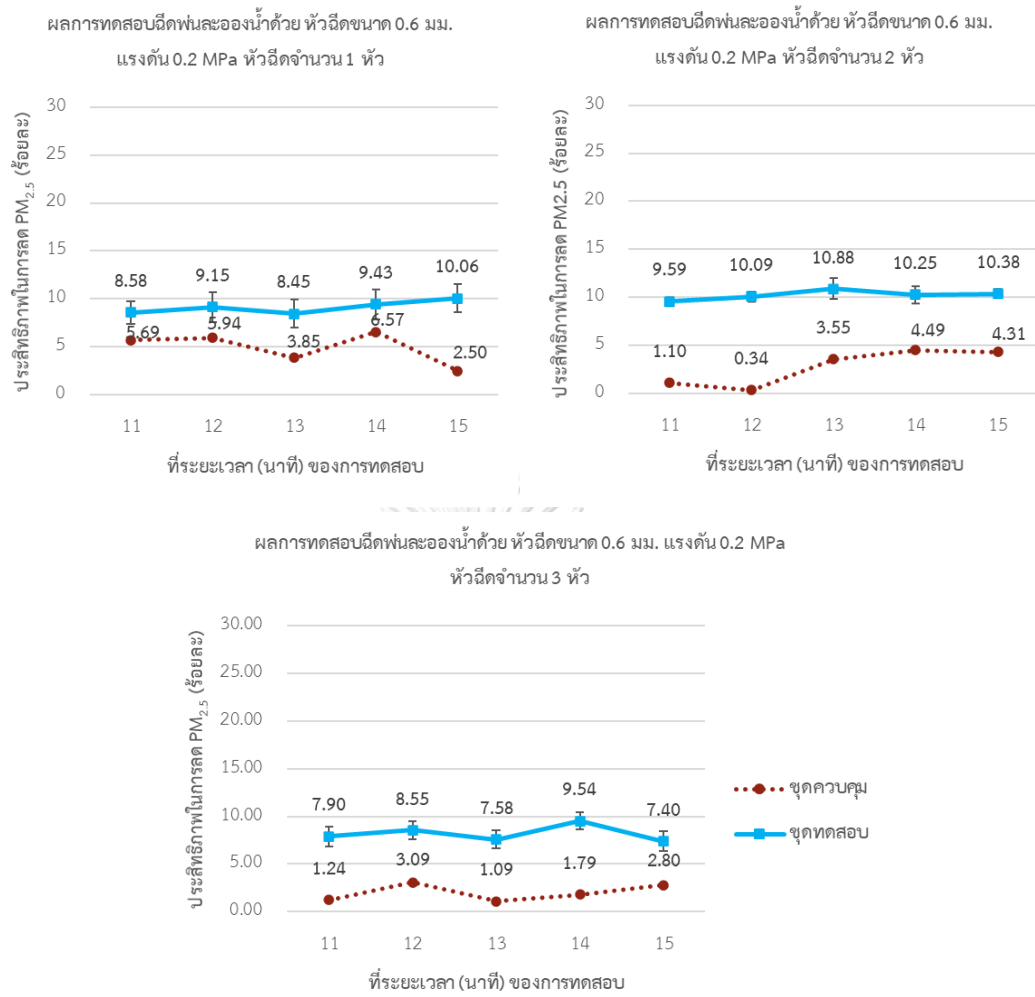
ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

สำหรับการทดสอบด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนหัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ง) พบว่าที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  โดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $9.1 \pm 0.2$ ,  $10.2 \pm 0.2$  และ  $8.2 \pm 0.4$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 15 และภาพที่ 34) สำหรับที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $10.4 \pm 0.2$ ,  $11.3 \pm 0.4$  และ  $11 \pm 0.6$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 16 และภาพที่ 35) ขณะที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $22 \pm 1.4$ ,  $19.5 \pm 0.2$  และ  $19.8 \pm 0.5$  ตามลำดับ (ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 17 และภาพที่ 36)

ตารางที่ 15 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	271.4 ± 25.9	247.0 ± 21.4	8.9 ± 1.4
	ครั้งที่ 2	262.8 ± 24.9	238.0 ± 20.9	9.4 ± 1.7
	ครั้งที่ 3	244.0 ± 26.3	221.8 ± 24.3	9.1 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 9.1 ± 0.2</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	386.4 ± 28.4	347.6 ± 24.8	10.0 ± 1.2
	ครั้งที่ 2	346.8 ± 25.4	311.2 ± 22.1	10.3 ± 0.4
	ครั้งที่ 3	363.4 ± 25.4	325.4 ± 21.5	10.4 ± 0.4
				<b>เฉลี่ย 10.2 ± 0.2</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	350.2 ± 29.9	323.0 ± 29.0	7.8 ± 1.8
	ครั้งที่ 2	334.4 ± 26.4	307.0 ± 24.9	8.2 ± 0.4
	ครั้งที่ 3	343.4 ± 22.5	313.8 ± 19.6	8.6 ± 1.0
				<b>เฉลี่ย 8.2 ± 0.4</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75

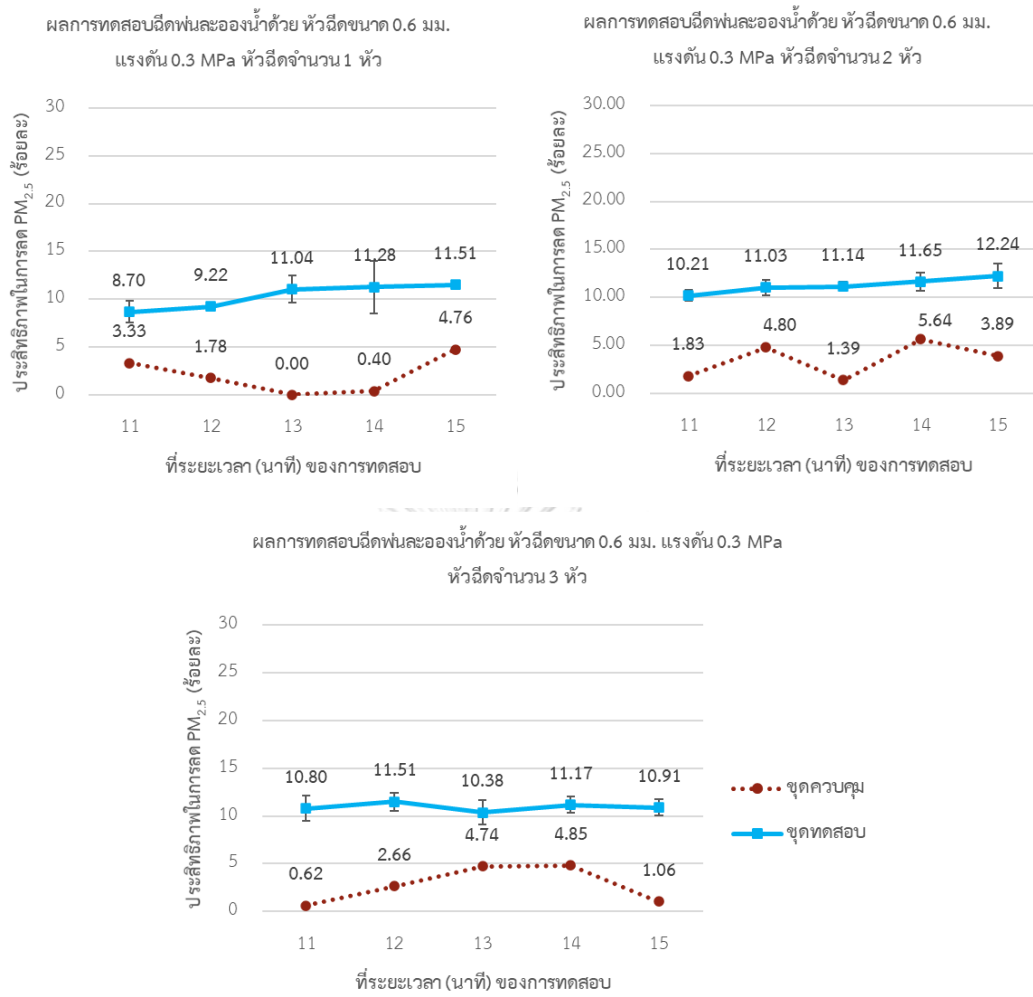


ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.2 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	256.6 ± 25.3	230.0 ± 20.2	10.3 ± 1.0
	ครั้งที่ 2	245.0 ± 22.6	218.8 ± 15.9	10.6 ± 2.5
	ครั้งที่ 3	356.2 ± 25.5	319.6 ± 20.2	10.2 ± 1.8
				<b>เฉลี่ย 10.4±0.2</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	400.4 ± 33.9	356.4 ± 27.6	10.9 ± 0.9
	ครั้งที่ 2	454.2 ± 31.2	403.4 ± 25.8	11.2 ± 0.9
	ครั้งที่ 3	315.8 ± 23.6	278.8 ± 17.8	11.7 ± 1.2
				<b>เฉลี่ย 11.3 ± 0.4</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	391.8 ± 28.8	348.8 ± 24.4	11.0 ± 0.7
	ครั้งที่ 2	360.6 ± 22.2	319 ± 20.3	11.6 ± 0.5
	ครั้งที่ 3	390.2 ± 29.6	349.8 ± 27.6	10.4 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 11.0 ± 0.6</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75

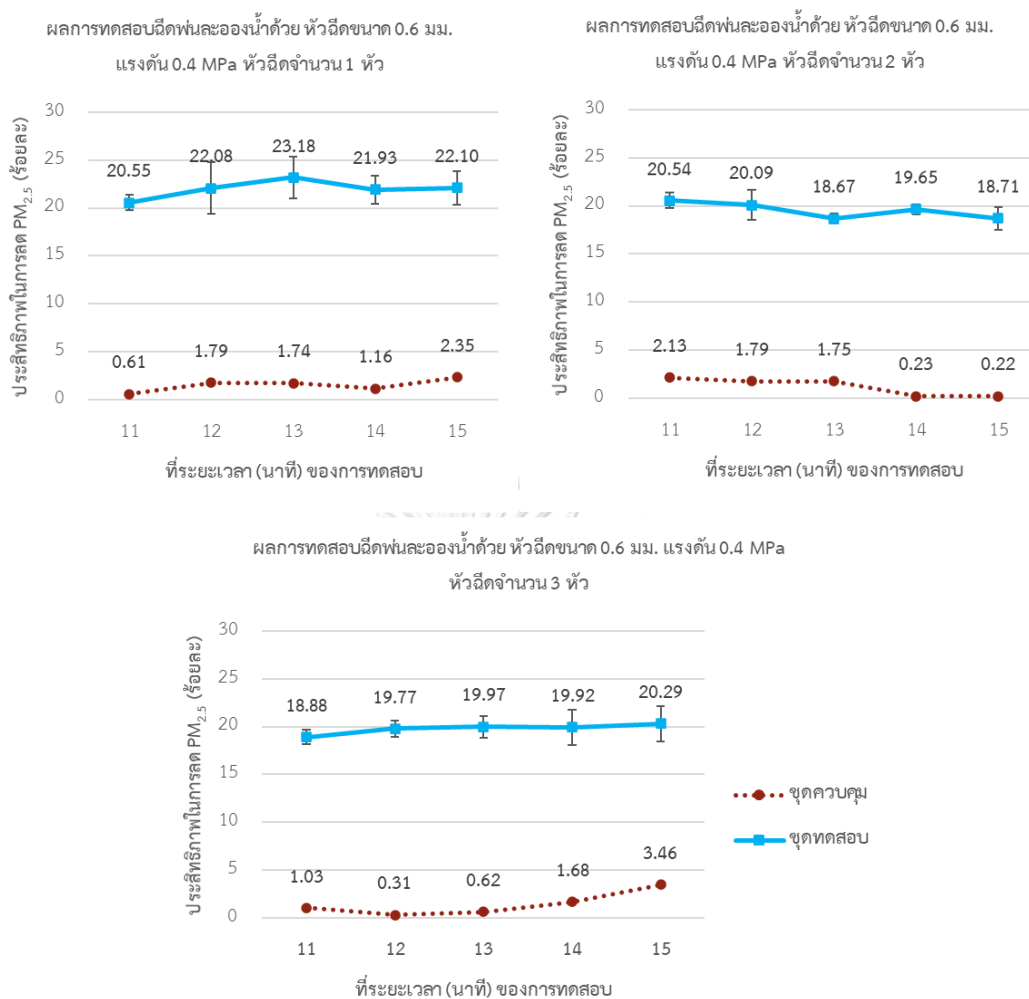


ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.3 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว, 2 หัว และ 3 หัว

จำนวนหัวฉีด	การทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)
		ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น	หลังผ่านจุดฉีดพ่น	
จำนวน 1 หัว	ครั้งที่ 1	493.4 ± 31.2	376.6 ± 18.5	23.6 ± 2.1
	ครั้งที่ 2	520.2 ± 33.3	409.4 ± 27.4	21.3 ± 0.5
	ครั้งที่ 3	530.6 ± 35.2	419.0 ± 25.9	21.0 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 22.0 ± 1.4</b>
จำนวน 2 หัว	ครั้งที่ 1	450.0 ± 19.5	362.0 ± 22.8	19.6 ± 1.9
	ครั้งที่ 2	453.2 ± 21.0	364.0 ± 18.7	19.7 ± 0.9
	ครั้งที่ 3	451.0 ± 21.2	364.0 ± 17.5	19.3 ± 0.6
				<b>เฉลี่ย 19.5 ± 0.2</b>
จำนวน 3 หัว	ครั้งที่ 1	446.2 ± 23.8	358.8 ± 16.6	19.6 ± 1.1
	ครั้งที่ 2	440.6 ± 37.1	350.8 ± 24.6	20.3 ± 1.4
	ครั้งที่ 3	438.6 ± 25.5	353.4 ± 22.4	19.4 ± 1.3
				<b>เฉลี่ย 19.8 ± 0.5</b>

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75



ภาพที่ 36 ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสกาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 2 และ 3 หัว

จากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นโดยสามารถสรุปรวมได้ดังตารางที่ 18 พบว่าลักษณะวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำที่มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  มากที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้ คือ การฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ด้วยระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.4 เมกะปาสกาล โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  อยู่ที่  $22 \pm 1.4$  จากสภาวะที่ทดสอบดังกล่าวเพื่อให้สามารถประยุกต์ผลการทดสอบไปใช้ในพื้นที่จริงหรือการขยายพื้นที่ทดสอบในลักษณะอื่น จึงได้พิจารณาค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลว (Gas-Liquid Ratio, GLR) จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ซึ่งค่า GLR ของสภาวะการทดสอบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.86 \times 10^4$  (ข้อมูลการคำนวณทั้งหมดปรากฏดังภาคผนวก ข)

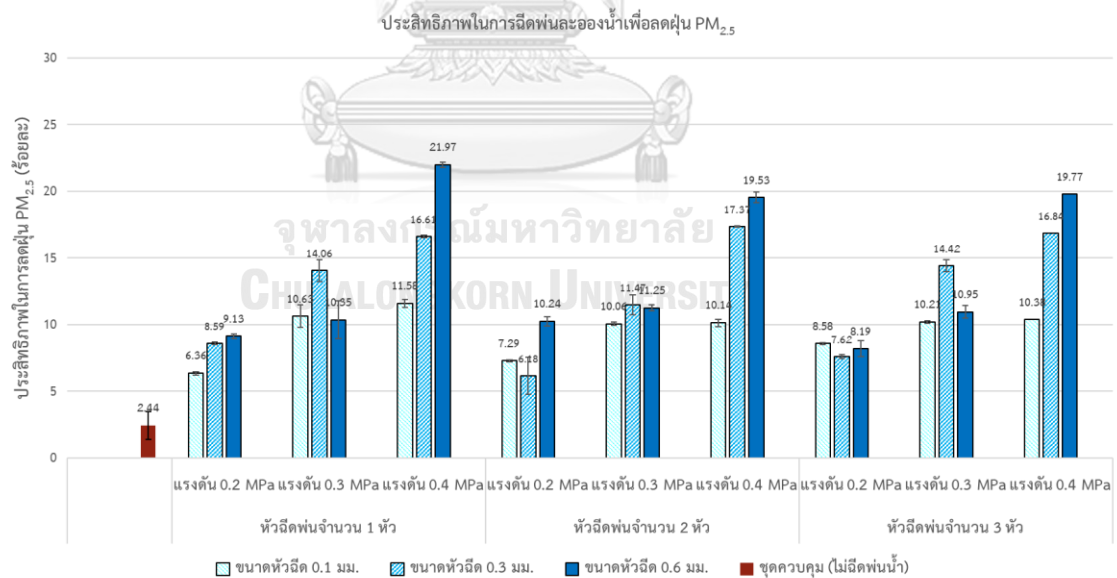
$$\text{Gas-Liquid Ratio} = \frac{\text{อัตราการไหลของอากาศในระบบ (m}^3/\text{s)}}{\text{อัตราการไหลของของเหลวในระบบ (m}^3/\text{s)}}$$

สมการที่ 4.1

ตารางที่ 18 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ในรูปแบบและลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน

ขนาดหัวฉีดพ่น	ระดับความดันน้ำ	ประสิทธิภาพในการลด PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)		
		0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa
0.1 มิลลิเมตร	หัวฉีดจำนวน 1 หัว	6.4 ± 0.4	10.6 ± 0.1	11.6 ± 0.8
	หัวฉีดจำนวน 2 หัว	7.3 ± 0.3	10.1 ± 0.1	10.1 ± 0.1
	หัวฉีดจำนวน 3 หัว	8.6 ± 0.3	10.2 ± 0.1	10.4 ± 0.3
0.3 มิลลิเมตร	หัวฉีดจำนวน 1 หัว	8.6 ± 0.2	14.1 ± 0.1	16.6 ± 0.8
	หัวฉีดจำนวน 2 หัว	6.2 ± 0.1	11.5 ± 1.4	17.4 ± 0.7
	หัวฉีดจำนวน 3 หัว	7.6 ± 0.1	14.4 ± 0.2	16.8 ± 0.5
0.6 มิลลิเมตร	หัวฉีดจำนวน 1 หัว	9.1 ± 0.2	10.4 ± 0.2	22 ± 1.4
	หัวฉีดจำนวน 2 หัว	10.2 ± 0.2	11.3 ± 0.4	19.5 ± 0.2
	หัวฉีดจำนวน 3 หัว	8.2 ± 0.4	11 ± 0.6	19.8 ± 0.5

\*ทดสอบในสภาวะอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส ที่ระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75

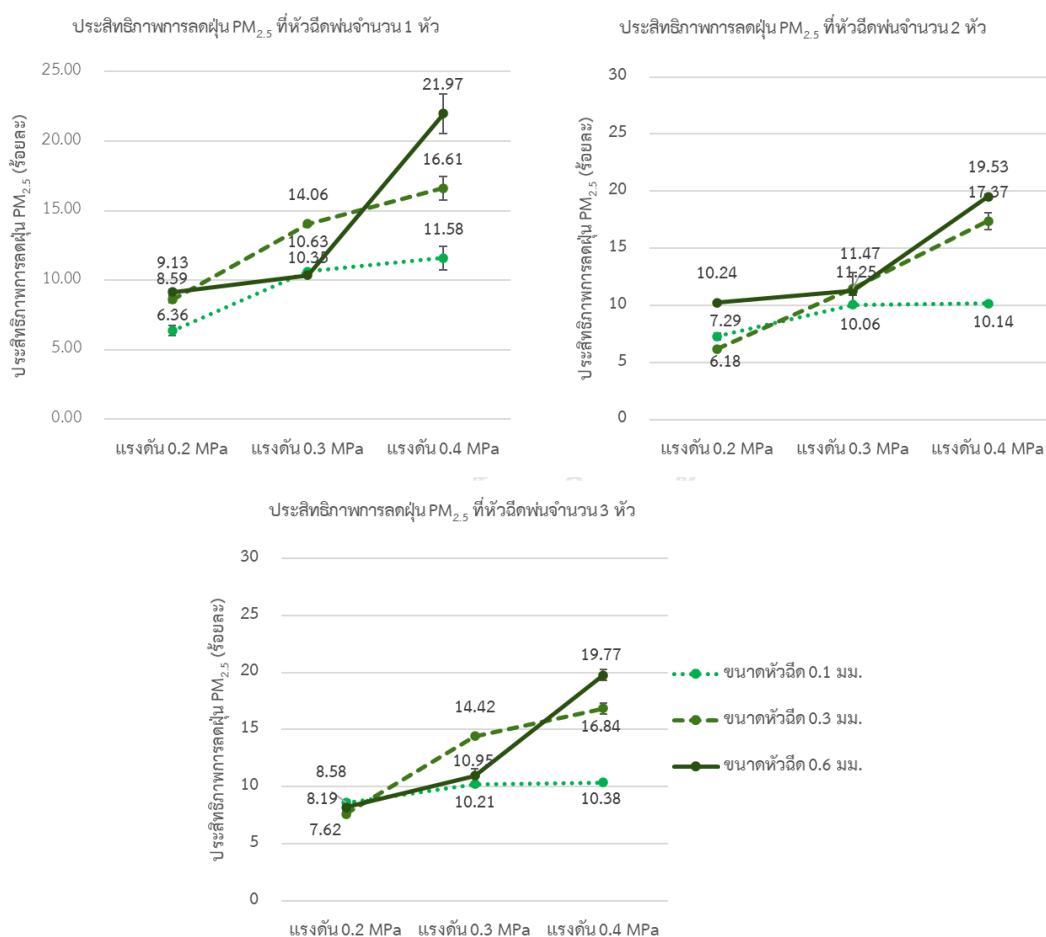


ภาพที่ 37 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการปรับเปลี่ยนรูปแบบและลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน



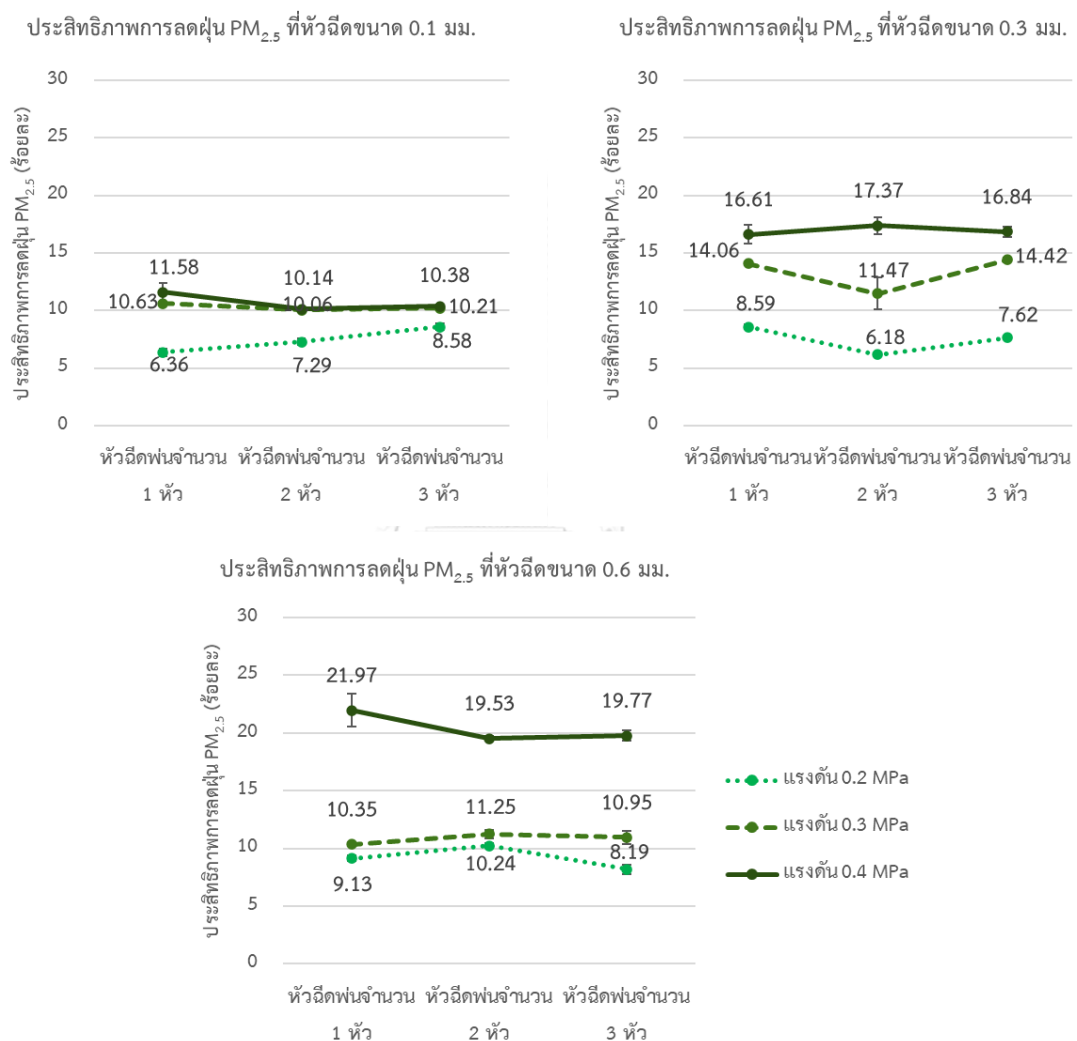
#### 4.2.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ระหว่างการปรับเปลี่ยนขนาดหัวฉีดพ่น แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีดพ่นที่ใช้

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  กับแรงดันฉีดพ่น ของหัวฉีดพ่นขนาดต่างๆ ในภาพที่ 38 โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มแรงดันฉีดพ่นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  เพิ่มสูงขึ้น และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ยกตัวอย่างผลการทดสอบฉีดพ่นที่จำนวนหัวฉีด 1 หัว ที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล ด้วยขนาดหัวฉีด 0.6 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  มากกว่าการฉีดพ่นที่แรงดัน 0.2 และ 0.3 เมกะปาสคาลที่ 2.12 และ 2.41 เท่า ตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  กับแรงดันฉีดพ่น ของหัวฉีดขนาดต่างๆ

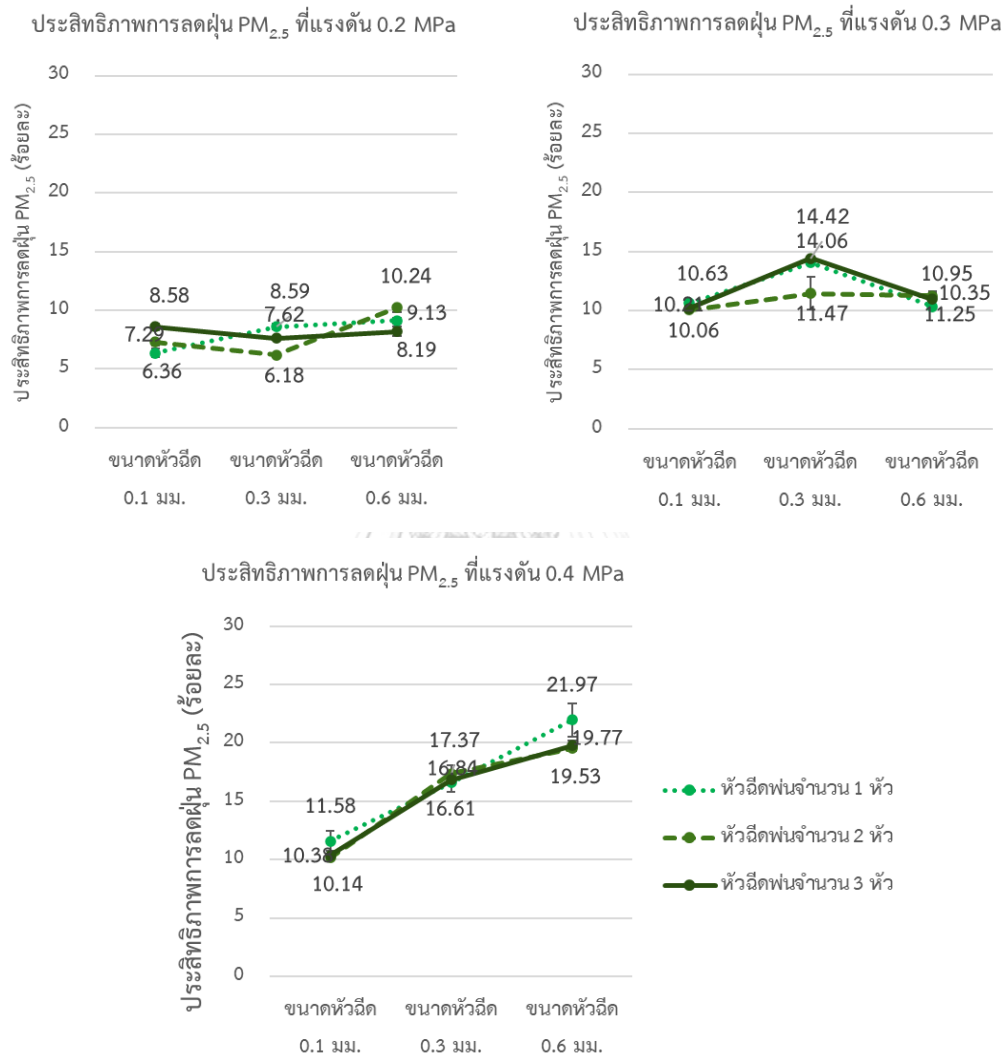
จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  กับการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีด ของแรงดันฉีดพ่นในระดับต่างๆ ในภาพที่ 39 โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีดพ่นไม่มีผลต่อการเพิ่ม-ลดประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} > 0.05$ ) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  กับการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีด ของแรงดันฉีดพ่นในระดับต่างๆ

และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  กับขนาดหัวฉีดพ่น โดยใช้สถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขนาดหัวฉีดส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฉีดพ่นน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  เพิ่มสูงขึ้น และมี

ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) โดยเฉพาะในการทดสอบชนิดพ่นที่แรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล ยกตัวอย่างการทดสอบที่จำนวนหัวฉีด 1 หัว การฉีดพ่นด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  มากกว่าขนาดหัวฉีด 0.1 และ 0.3 มิลลิเมตรที่ 1.32 และ 1.9 เท่าตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ประสิทธิภาพการลด  $PM_{2.5}$  กับขนาดหัวฉีดพ่น ของการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีด

#### 4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดหัวฉีด จำนวนหัวฉีด และแรงดันฉีดพ่น ต่อ ประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$

- 1) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation)

ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) เพื่อวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านขนาดห้วงอากาศ แรงดันอากาศ จำนวนห้วงอากาศและประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> พบว่า ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับขนาดห้วงอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.388 ซึ่งถือว่ามีความสัมพันธ์น้อย (ค่า r มีค่าต่ำกว่า 0.4) เมื่อพิจารณาผลของแรงดันอากาศ พบว่า การเพิ่มแรงดันอากาศส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.775 ซึ่งมีระดับความสัมพันธ์มาก (ค่า r มีค่า 0.6 ขึ้นไป) ส่วนจำนวนห้วงอากาศ ไม่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ( $r = -0.027$ ) จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การปรับแรงดันการฉีดพ่นส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> อย่างมาก เมื่อเทียบกับการปรับขนาดห้วงอากาศ เนื่องจากระดับความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในระดับความสัมพันธ์ต่ำกว่าแรงดันฉีดพ่นถึงร้อยละ 51.4 ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบที่แสดงข้างต้นที่พบว่า ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> จากการปรับเปลี่ยนขนาดห้วงอากาศไม่แตกต่างกันระหว่างการฉีดพ่นที่แรงดันต่ำ (0.2 และ 0.3 เมกะปาสกาล) แต่จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อฉีดพ่นในระดับแรงดันน้ำที่สูงที่สุด (0.4 เมกะปาสกาล) ส่วนการเพิ่มขนาดห้วงอากาศส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพอย่างชัดเจน ยกตัวอย่างผลการทดสอบที่จำนวนห้วงอากาศ 1 ห้วง ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ที่ห้วงอากาศขนาด 0.1 0.3 และ 0.6 มิลลิเมตร เท่ากับ  $11.58 \pm 0.84$ ,  $16.61 \pm 0.83$  และ  $21.97 \pm 1.42$  ตามลำดับ

ตารางที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub>

ปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่น	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	ระดับความสัมพันธ์	p-value
ขนาดห้วงอากาศ	0.388*	ระดับความสัมพันธ์น้อย (r มีค่าต่ำกว่า 0.4)	0.000
แรงดันฉีดพ่น	0.775*	ระดับความสัมพันธ์มาก (r มีค่า 0.6 ขึ้นไป)	0.000
จำนวนห้วงอากาศ	-0.027	ไม่มีความสัมพันธ์ (r มีค่าเป็นลบ)	0.814

หมายเหตุ: \*มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

## 2) การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง ด้วย Factorial ANOVA เพื่อศึกษาความแตกต่างของปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นทั้งหมด 3 ปัจจัยได้แก่ ขนาดห้วงอากาศ แรงดันฉีดพ่น และ

จำนวนหัวฉีด ซึ่งมีระดับของแต่ละปัจจัยตามการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 3 ระดับ (3k Factorial Design) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub>

ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 20 พบว่าการปรับเปลี่ยนขนาดหัวฉีดพ่น และระดับแรงดันฉีดพ่น เป็นปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99.95 ( $p\text{-value} < 0.05$ ) โดยค่า  $p\text{-value}$  ของระดับแรงดันฉีดพ่นมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ  $5.83\text{E}-29$  แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันฉีดพ่นของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำมีแนวโน้มที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละของประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> มากที่สุด อ้างอิงจากข้อมูลการทดสอบก่อนหน้าพบว่า เมื่อเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่นละอองน้ำประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของปัจจัยขนาดหัวฉีดพ่นละอองน้ำ (A<sup>2</sup>) มีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง (nonlinear relationship) โดยมีผลขัดแย้งกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ซึ่งมีค่า  $p\text{-value}$  อยู่ที่ 0.0042 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดหัวฉีดไม่ได้ส่งเสริมประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> อย่างชัดเจน และจากผลการวิเคราะห์ปัจจัยควบคู่กันระหว่างขนาดหัวฉีดพ่น (A) และระดับแรงดันฉีดพ่น (B) มีผลส่งเสริมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า  $p\text{-value}$  อยู่ที่  $1.33\text{E}-10$  แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขนาดหัวฉีดพ่นควบคู่กับการเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่น ช่วยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรของขนาดหัวฉีด แรงดันฉีดพ่น และจำนวนหัวฉีด

Source of Variation	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value
A-ขนาดหัวฉีด	218	1	218	86.66	6.32E-14
B-แรงดันฉีดพ่น	867.28	1	867.28	344.75	5.83E-29
C-จำนวนหัวฉีด	1.02	1	1.02	0.4064	0.5259
AB	142.01	1	142.01	56.45	1.33E-10
AC	2.45	1	2.45	0.9736	0.3271
BC	3.27	1	3.27	1.30	0.2581
A <sup>2</sup>	22.06	1	22.06	8.77	0.0042
B <sup>2</sup>	5.19	1	5.19	2.06	0.1554
C <sup>2</sup>	4.79	1	4.79	1.90	0.1721
Total	1266.07	9			

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดข้างต้นของการวิจัยในครั้งนี้พบว่า การเพิ่มขนาดและแรงดันหัวฉีดพ่นควบคู่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมในการลด PM<sub>2.5</sub> ในขณะที่การเพิ่มจำนวนหัวฉีดไม่ได้ส่งผลแตกต่างกันมากนัก และการเพิ่มขนาดหัวฉีดพ่นเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลอง

แบบกึ่งปิดได้ โดยลักษณะและวิธีการฉีดพ่นที่พบว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลด  $PM_{2.5}$  จากการศึกษาครั้งนี้คือ ดำเนินการฉีดพ่นน้ำเปล่าด้วยขนาดหัวฉีดที่ 0.6 มิลลิเมตร ด้วยระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.4 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  อยู่ที่ร้อยละ 19.53 - 21.97 ในขณะที่การปรับเปลี่ยนลักษณะการฉีดพ่นต่างๆให้อยู่ในระดับต่ำสุดที่ ขนาดหัวฉีดที่ 0.1 มิลลิเมตร ด้วยระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.2 เมกะปาสคาล (MPa) มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  อยู่ที่ร้อยละ 6.36 - 8.58 ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดจากทุกวิธีการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2019) และ Bin et al. (2018) ที่ได้ระบุผลการทดลองไว้ว่าการเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่น และขนาดหัวฉีด ของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 และ 10 ไมครอน ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองทำได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขนาดหัวฉีด ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคละอองน้ำใหญ่ขึ้นซึ่งส่งผลให้ละอองน้ำมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับฝุ่นละอองในอากาศมากขึ้น แต่การเพิ่มขนาดหัวฉีดพ่นมากขึ้นจนอนุภาคละอองน้ำที่ฉีดพ่นออกมามีขนาดใหญ่เกินไปจะเกิดกำแพงอากาศรอบอนุภาคของหยดน้ำและป้องกันไม่ให้อนุภาคฝุ่นสัมผัสหรือรวมตัวกับหยดน้ำได้ โดยตรงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองลดลงเช่นกัน (Spraying System Co, 2016) และการเพิ่มแรงดันฉีดพ่นมีส่วนช่วยในการเพิ่มความเร็วในการตกของละอองน้ำซึ่งช่วยให้น้ำสามารถจับกับฝุ่นละอองได้อย่างรวดเร็วและลดระยะเวลาในการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองในอากาศได้ นอกจากนี้ การเพิ่มขนาดหัวฉีดพ่น และแรงดันฉีดพ่นยังส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการดักจับและสกัดกั้นฝุ่นละอองภายในห้องทดสอบเพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

#### 4.3 ประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ของการฉีดพ่นละอองสารลดแรงตึงผิว

จากการทดสอบประสิทธิภาพของการลด  $PM_{2.5}$  ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิว โดยใช้ลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  มากที่สุดจากการทดสอบฉีดพ่นด้วยน้ำเปล่าในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิดของการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ หัวฉีดขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล โดยใช้หัวฉีดพ่นจำนวน 1 หัว ทำการฉีดพ่นด้วยสารลดแรงตึงผิว ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่

1. Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant)
2. Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ (anionic surfactant)

3. Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวก (cationic surfactant)
4. Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (amphoteric surfactant)

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการฉีดพ่นสารที่มีส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดดังตารางที่ 21 (ข้อมูลผลการทดสอบโดยละเอียดปรากฏดังภาคผนวก จ) พบว่า Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride และ Cocamidopropyl betaine มีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> โดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 23.6 ± 1.4, 8.5 ± 0.3, 9.1 ± 0.4 และ 12.2 ± 0.2 ตามลำดับ โดยสารที่มีส่วนประกอบของ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1 % w/v มีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> มากที่สุด โดยเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 23.6 ± 1.4 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เฉลี่ยตลอดช่วงเวลากการฉีดพ่น 5 นาทีสุดท้ายของ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เทียบกับสารที่เหลือทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) ในขณะที่ Linear alkyl benzene sulfonate และ Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1 % w/v ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value > 0.05) และเมื่อเปรียบเทียบกับ การฉีดพ่นด้วยน้ำเปล่าด้วยลักษณะวิธีการฉีดพ่นเดียวกันพบว่า ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของ Tween-80 มีประสิทธิภาพมากกว่าน้ำอยู่ที่ร้อยละ 1.6 หรือคิดเป็น 0.07 เท่าซึ่งมีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) (ผลการทดสอบและเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 41 และ 42) โดยกลไกส่วนใหญ่ในการจับฝุ่นของสารลดแรงตึงผิวกับอนุภาคฝุ่นละอองที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นในรูปของไอออน (การจับกันระหว่างประจุ) ด้วยพันธะไอออนิก (Ionic bond) มากกว่าในรูปโมเลกุล (การจับกันระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ) (จันทรา ทองคำเภา, 2562) ทำให้การจับตัวกับ PM<sub>2.5</sub> ของสารลดแรงตึงผิวโดยอาศัยหลักการเกาะรวมกันทางเคมี (Chemical agglomeration) ด้วยรูปแบบของโมเลกุลมีประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างกับการฉีดพ่นด้วยน้ำเปล่า แต่เนื่องจากฝุ่นละอองโดยทั่วไปรวมถึงฝุ่นละอองที่มาจาก การเผาไหม้ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีประจุไฟฟ้าที่หลากหลาย (ประจุลบ ประจุบวก และไม่มีประจุ) ทำให้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุนั้นสามารถจับกับอนุภาค PM<sub>2.5</sub> ที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุหลักของสารลดแรงตึงผิวชนิดนั้นๆ เท่านั้น (Z. Liu et al., 2019; Tang et al., 2016; Tessum & Raynor, 2017; P. Wang et al., 2020) ทำให้ Tween-80 ที่เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุสามารถจับตัวกับอนุภาค PM<sub>2.5</sub> ได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติความเป็นประจุในตัว โดยมีกลไกหลักในการจับกับอนุภาค

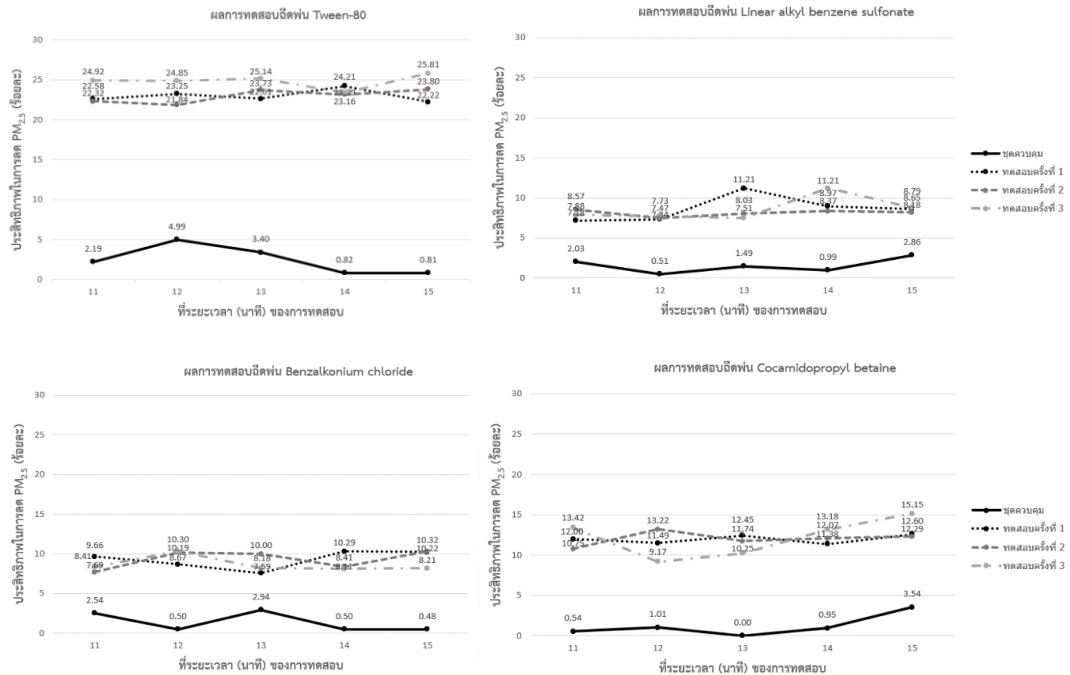
PM<sub>2.5</sub> ด้วยไมเซลล์ที่มีคุณสมบัติในการลดความตึงผิวของสารละลายและสสารต่างสถานะหรืออนุภาค PM<sub>2.5</sub> ทำให้เกิดการดูดซับกันระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนหางหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จับกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค PM<sub>2.5</sub> (Xu et al., 2018) และ Tween-80 มีความสามารถในการจับกับธาตุที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของฝุ่นที่มาจากควันธูปหรือการเผาไหม้ได้ดี อ้างอิงจากการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า ในแต่ละโมเลกุลของ Tween-80 สามารถจับกับแกรไฟต์ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของนาโนไบโอชาร์ได้ดี เนื่องจาก Tween-80 มีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำหลายกลุ่มและมีหางที่ไม่ชอบน้ำ 1 ตัวซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) กับแกรไฟต์ได้ (Naghdi et al., 2017) นอกจากนี้โครงสร้างส่วนหางของ Tween-80 มีไฮดรอกซิลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบในหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) (ดังภาพที่ 43) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพันธะคูในการจับกับคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุคาร์บอนในบรรยากาศได้ (Z. Bian et al., 2021; Sen, Goepfert, Kar, & Prakash, 2020) ทำให้ Tween-80 มีคุณสมบัติในการจับตัวกับอนุภาคฝุ่นที่มาจากควันธูปได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น

ตารางที่ 21 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิว

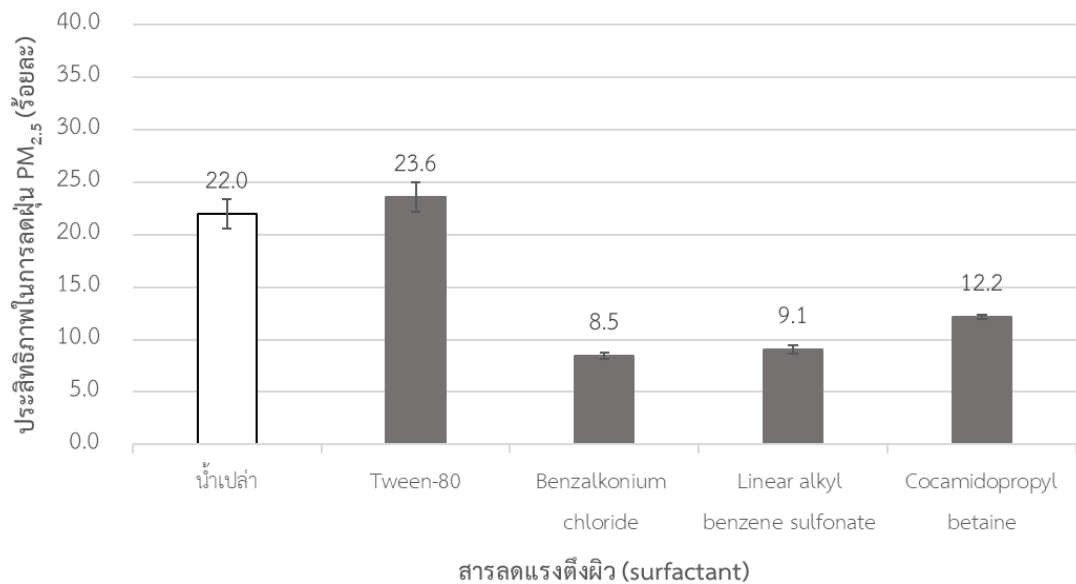
สารทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้นของ PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ PM <sub>2.5</sub> (ร้อยละ)	
	เฉลี่ยที่ 5 นาทีสุดท้ายของการทดสอบ			
	การทดสอบ	ก่อนผ่านจุดฉีดพ่น		หลังผ่านจุดฉีดพ่น
Tween-80 1% w/v	ครั้งที่ 1	316 ± 5.3	243.4 ± 4.9	23 ± 0.8
	ครั้งที่ 2	349 ± 7.7	268.8 ± 4.5	23 ± 0.9
	ครั้งที่ 3	340.8 ± 4.8	256.2 ± 4.8	24.8 ± 0.9
				เฉลี่ย 23.6 ± 1.4
Linear alkyl benzene sulfonate 1 % w/v	ครั้งที่ 1	216.8 ± 6.6	198 ± 4.5	8.6 ± 1.6
	ครั้งที่ 2	244.4 ± 6.1	224.4 ± 5.6	8.2 ± 0.4
	ครั้งที่ 3	207 ± 6.7	188.8 ± 6.6	8.8 ± 1.6
				เฉลี่ย 8.5 ± 0.3
Benzalkonium chloride 1 % w/v	ครั้งที่ 1	303.4 ± 9.2	275.2 ± 7.9	9.3 ± 1.1
	ครั้งที่ 2	327.6 ± 10.3	297 ± 7.6	9.3 ± 1.2
	ครั้งที่ 3	328.6 ± 4.5	300.2 ± 5	8.6 ± 0.9
				เฉลี่ย 9.1±0.4
Cocamidopropyl betaine 1 % w/v	ครั้งที่ 1	240.2 ± 11	211.4 ± 9.3	12 ± 0.5
	ครั้งที่ 2	224.4 ± 7.6	196.8 ± 6.8	12.3 ± 1.2
	ครั้งที่ 3	245.2 ± 15.7	215 ± 10.66	12.2 ± 2.5
				เฉลี่ย 12.2 ± 0.2

\*ทดสอบในสภาวะที่มีอุณหภูมิในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส และระดับความชื้นในบรรยากาศร้อยละ 60-75

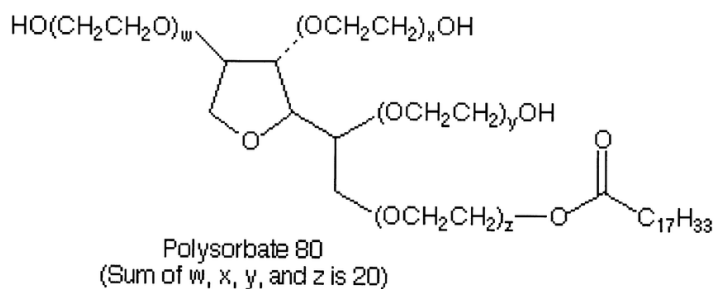




ภาพที่ 41 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่น Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride และ Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v



ภาพที่ 42 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด



**Molecular Mass = 1310**

ภาพที่ 43 โครงสร้างทางเคมีของ Tween-80 (Polysorbate 80)

ที่มา: (Nair, Stephens, Vincent, Raghavan, & Sand, 2003)

#### 4.4 การกระจายตัวตามขนาดของ PM<sub>2.5</sub> หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

ทำการศึกษาความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ตามการกระจายตัวตามขนาดโดยวิเคราะห์ด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก (Gravimetric analysis) โดยทำการเก็บตัวอย่าง PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด ได้แก่ Tween-80, Linear alkyl benzene sulfonate, Benzalkonium chloride และ Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1 % w/v และชุดควบคุม (ไม่มีการฉีดพ่นสาร) ซึ่งเก็บตัวอย่างโดยใช้ อุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor) ประกอบไปด้วยชั้นที่ 1 คัดแยกอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอน, ชั้นที่ 2 คัดแยกอนุภาคขนาด 3.3 - 4.7 ไมครอน, ชั้นที่ 3 คัดแยกอนุภาคขนาด 2.1 - 3.3 ไมครอน, ชั้นที่ 4 คัดแยกอนุภาคขนาด 1.1 - 2.1 ไมครอน, ชั้นที่ 5 คัดแยกอนุภาคขนาด 0.7 - 1.1 ไมครอน, ชั้นที่ 6 คัดแยกอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน และชั้นที่ 7 (ชั้น back-up) คัดแยกอนุภาคขนาด 0.0 - 0.4 ไมครอน โดยทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 15 นาทีตามระยะเวลาของการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด หลักการเก็บตัวอย่างได้นำตัวอย่างไปทำการชั่งน้ำหนัก ทำการควบคุมคุณภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักในการชั่งน้ำหนักกระตาชกรอง โดยการชั่งลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 100 และ 200 มิลลิกรัม ก่อนการชั่งกระตาชกรองทุกครั้ง จากนั้นนำค่าน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐานทั้งหมดมาทดสอบความแม่นยำของเครื่องชั่งน้ำหนักด้วยการสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ต (shewhart control chart) โดยพิจารณาค่าน้ำหนักของลูกตุ้มมาตรฐานในช่วง Warning line ( $\mu \pm 2SD$ ) และ Action line ( $\mu \pm 3SD$ ) เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐานที่ชั่งได้ และ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐานที่ชั่งได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนจากช่วง Warning line และ Action line มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 แสดงให้เห็นว่า

คุณภาพการซังน้ำหนักระดาษกรองที่นำไปใช้ในการเก็บตัวอย่าง PM<sub>2.5</sub> ในครั้งนี้มีความแม่นยำ (ข้อมูลโดยละเอียดรวบรวมในภาคผนวก ฉ)

ผลการศึกษาความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> ตามการกระจายตัวตามขนาดโดยคำนวณจากการซังน้ำหนัตัวอย่าง PM<sub>2.5</sub> ดังภาพที่ 4.3 และ 4.20 พบว่าจากชุดการทดสอบปล่อย PM<sub>2.5</sub> โดยใช้ควันจากธูปและไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำมีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาค 6 ช่วงขนาด ได้แก่ ขนาด 0.4 - 0.7, 0.7 - 1.1, 1.1 - 2.1, 2.1 - 3.3, 3.3 - 4.7 และ 4.7 - 5.8 ไมครอนอยู่ที่ 399, 97.4, 28, 117.9, 141.3 และ 33.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่ช่วงอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 49.2 ของค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> รวมจากทุกระดับชั้น

การคำนวณค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub> พบว่ามีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาคทั้ง 6 ช่วงขนาด อยู่ที่ 1008.2, 176.6, 157.9, 58.5, 137.1 และ 55.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่ช่วงอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 63.3 ของค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> รวมจากทุกระดับชั้น

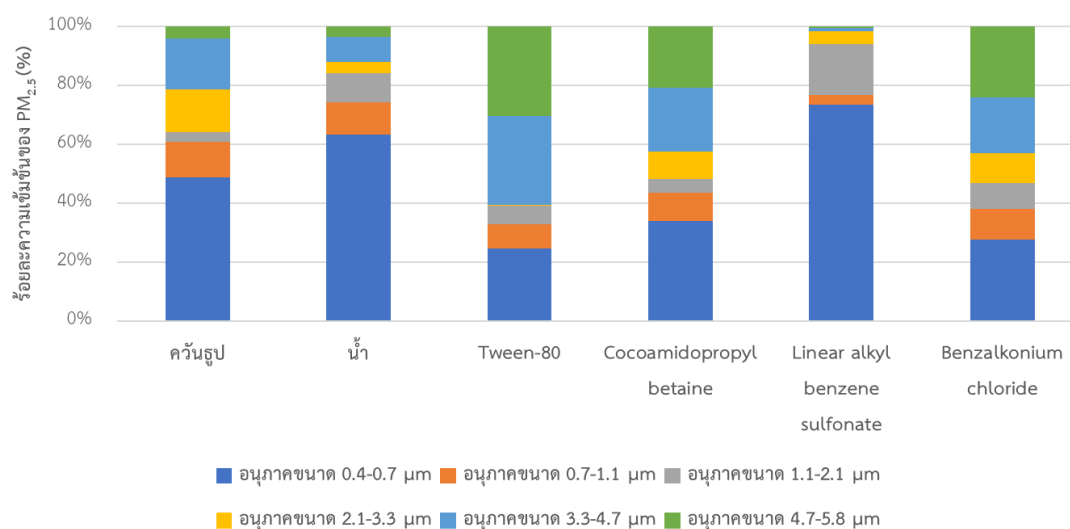
จากผลการคำนวณความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ในเก็บตัวอย่างของการทดสอบฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการลด PM<sub>2.5</sub> พบว่าการฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาคทั้ง 6 ช่วงขนาด อยู่ที่ 511.9, 175.3, 130.5, 3.1, 630 และ 635.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่ช่วงอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 และมีค่าใกล้เคียงกันที่ช่วงขนาด 3.3 - 4.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 30.5 และ 30.2 ตามลำดับ

การทดสอบฉีดพ่น Cocoamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาค 6 ช่วงขนาด อยู่ที่ 688.1, 199.7, 93.3, 189.6, 441.6 และ 423.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่ช่วงอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 33.8 ของค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> รวมจากทุกระดับชั้น

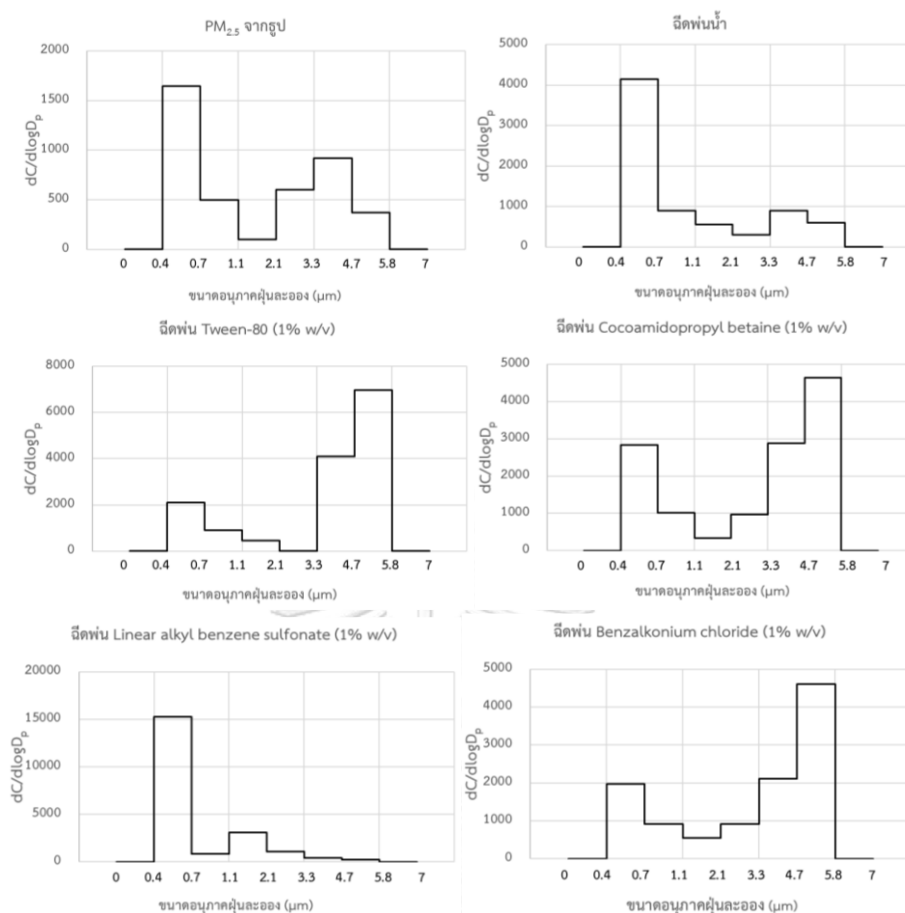
การทดสอบฉีดพ่น Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาค 6 ช่วงขนาด อยู่ที่ 3709.6, 170.7, 868.1, 216.6, 60.4 และ 23.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่

ที่ช่วงอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 73.5 ของค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> รวมจากทุกระดับชั้น

การทดสอบฉีดพ่น Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีค่าความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ที่ชั้นกรองตัวอย่างอนุภาค 6 ช่วงขนาด อยู่ที่ 477.3, 180.8, 153.5, 179.1, 325 และ 420.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับโดยมีค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> สูงสุดอยู่ที่ช่วงอนุภาคขนาด 0.4-0.7 ไมครอน คิดเป็นร้อยละ 27.5 ของค่าความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> รวมจากทุกระดับชั้น



ภาพที่ 44 ค่าร้อยละความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> จากการเก็บตัวอย่างควันรูปเปล่า ร่วมกับการทดสอบฉีดพ่น ละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดในแต่ละระดับชั้นของขนาดอนุภาค



ภาพที่ 45 ค่า normalization ของความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  จากการเก็บตัวอย่างควันธูปเปล่า ร่วมกับการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิดในแต่ละระดับชั้นของขนาดอนุภาค

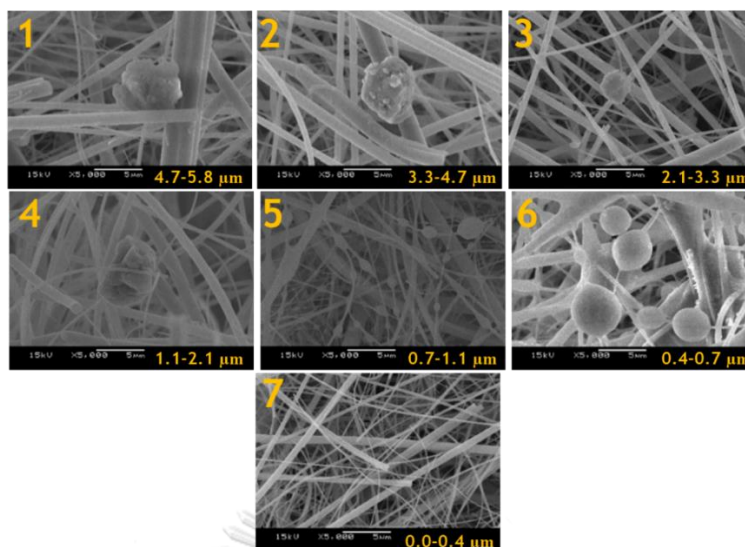
จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดของ  $PM_{2.5}$  ในการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างและการคำนวณความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  แบบชั่งน้ำหนัก (Gravimetric analysis) ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการฉีดพ่น Tween-80, Cocoamidopropyl betaine และ Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v ทำให้ปริมาณ  $PM_{2.5}$  ส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาการกระจายตัวตามน้ำหนักของ  $PM_{2.5}$  จากตัวอย่างของควันธูป (ดังภาพที่ 43 และ 44) อ้างอิงจากผลการทดสอบที่พบว่า ในตัวอย่างจากการทดสอบฉีดพ่น Tween-80, Cocoamidopropyl betaine และ Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v ปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองส่วนใหญ่รวมตัวกันอยู่ที่ชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 5.8 ไมครอนคิดเป็นร้อยละ 60.7 42.5 และ 42.9 ตามลำดับ ซึ่งเป็นชั้นที่มีการกรองอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดของอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non-Viable Andersen Cascade impactor) และจัดเป็นชั้นกรองอนุภาคฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน ในขณะที่ตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  จากควันธูปมีการกระจายตัวอยู่ที่ชั้นขนาดอนุภาคไม่เกิน 2.5 ไมครอนเป็นส่วนมาก

โดยคิดเป็นร้อยละ 64.7 จากความเข้มข้น  $PM_{2.5}$  ทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่า Tween-80, Cocoamidopropyl betaine และ Benzalkonium chloride มีคุณสมบัติในการเป็นสารเกาะรวม (agglomerant) ในการดักจับ  $PM_{2.5}$  ให้เกิดการเกาะรวมและมีขนาดใหญ่ขึ้น และ Tween-80 มีคุณสมบัติในการเป็นสารเกาะรวมมากที่สุด โดยมีการกระจายตัวของความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน มากกว่า Cocoamidopropyl betaine และ Benzalkonium chloride อยู่ที่ร้อยละ 29.98 และ 29.32 หรือคิดเป็น 1.43 และ 1.41 เท่า ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างในการทดสอบฉีดพ่นน้ำพบว่า Tween-80 มีประสิทธิภาพในการดักจับและเกาะรวมอนุภาคฝุ่นละอองได้ดีกว่า โดย Tween-80 มีการกระจายตัวของความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน มากกว่าน้ำคิดเป็นร้อยละ 94.33 หรือ 2.81 เท่า

#### 4.5 ลักษณะการเกาะรวมทางกายภาพของ $PM_{2.5}$ หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

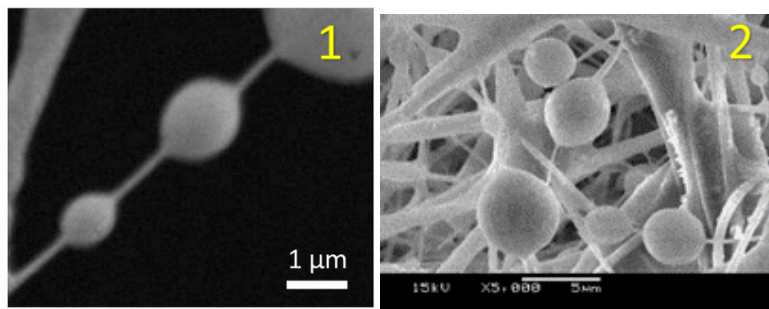
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองจากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และความเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละออง และลักษณะการเกาะรวมระหว่างอนุภาคฝุ่นละออง กับน้ำและสารลดแรงตึงผิว จากเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองในการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ภายในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด ด้วยชุดอุปกรณ์คัดแยกขนาดอนุภาค 8 ชั้น (Non - Viable Andersen Cascade impactor)

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปในสถานะที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำและสารใดๆ ดังภาพที่ 45 พบว่าในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 5.8 ไมครอนมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (irregular particle) และบางชิ้นหรือบางจุดมีลักษณะรูปทรงคล้ายทรงเหลี่ยมเป็นบล็อก (blocky particle) หรือเป็นแผ่น (Flaky particle) และในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 1.1 ไมครอนอนุภาคมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม (Spherical particle) รูปทรงรี (Ellipsoidal particle) และอนุภาคฝุ่นกับเส้นใยแผ่นกรองดักจับฝุ่นมีลักษณะเหมือนถูกเคลือบด้วยสารซึ่งเป็นลักษณะของฝุ่นรูปที่มีความเปียกที่ถูกเคลือบด้วยสารแขวนลอยหรือ แอโรซอลที่เป็นของเหลว (liquid aerosol) ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของอนุภาคที่มาจากการเผาไหม้ของรูป (Xia & Chen, 2020) โดยการเปรียบเทียบกับผลของการศึกษาในครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ลักษณะสัณฐานวิทยาตามการกระจายตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองที่มาจากควันรูปที่รวบรวมในช่วงชั้นต่างๆ (ที่กำลังขนาด 5,000 เท่า)

- 1) 4.7 - 5.8 ไมครอน, 2) 3.3 - 4.7 ไมครอน, 3) 2.1 - 3.3 ไมครอน, 4) 1.1 - 2.1 ไมครอน, 5) 0.7 - 1.1 ไมครอน, 6) 0.4 - 0.7 ไมครอน 7) 0.0 - 0.4 ไมครอน



ภาพที่ 47 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองจากควันรูป

- 1) จากผลการศึกษาของ (Xia & Chen, 2020) 2) อนุภาคที่พบเจอในตัวอย่างฝุ่นจากควันรูปที่สถานะไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ ในชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปที่ผ่านการทดสอบดักจับด้วยการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวดังตารางที่ 22 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองที่ผ่านการฉีดพ่นละอองน้ำในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 2.1 - 5.8 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน คล้ายคลึงกับอนุภาคของฝุ่นเปล่าที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ ที่ชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 2.1 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างกลมเป็นผลึกรูปร่างไม่แน่นอน มีความเป็นไปได้อันเป็นอนุภาคของแร่ธาตุและองค์ประกอบของสารอื่นที่ไม่ใช่ฝุ่นละออง ซึ่งอาจเป็นแร่ธาตุที่พบเจอได้ในน้ำประปา เช่น โซเดียม แคลเซียม เหล็ก ทองแดง คลอรีน ซัลเฟต เป็นต้น ผลที่พบคล้ายคลึงกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแร่ธาตุในน้ำประปาที่พบในงานวิจัยของ Romanovski (2020) โดยการเปรียบเทียบกับผลของการศึกษาในครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 47 และในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 1.1 ไมครอน อนุภาคที่พบมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม และรูปทรงรี

ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปที่ผ่านการทดสอบดักจับด้วยการฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ช่วงชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 5.8 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนที่เกิดการจับตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กที่มีรูปร่างแตกต่างกันไป เช่น อนุภาครูปทรงเหลี่ยม เป็นบล็อก เป็นแผ่น และอนุภาครูปร่างอื่นๆ ที่มีลักษณะไม่แน่นอน ที่ชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 2.1 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนคล้ายกับฝุ่นเปล่าที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ และในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 1.1 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม และรูปทรงรี และมีลักษณะของสารเคลือบที่เส้นใยแผ่นกรองฝุ่นในชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน

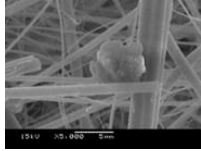
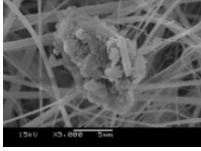
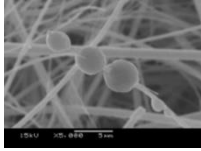
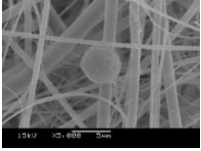
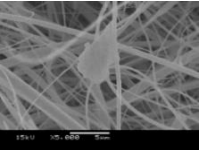
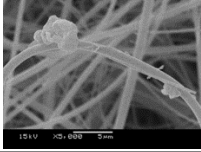
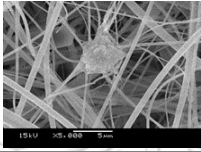
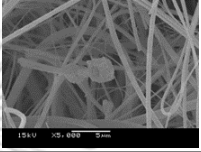
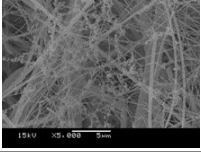
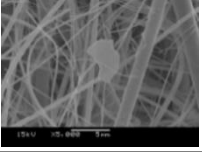

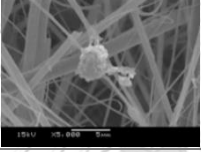
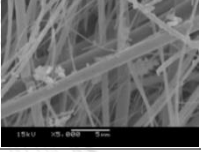
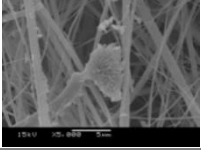
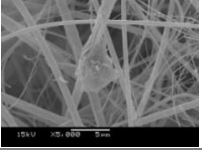
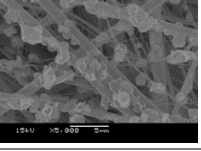
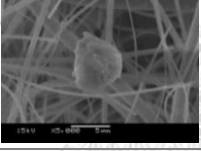
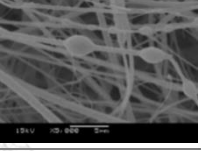
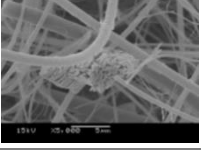
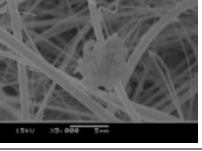
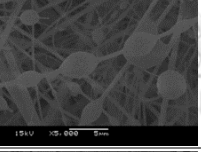
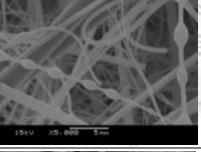
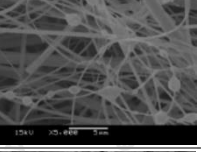
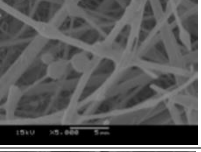
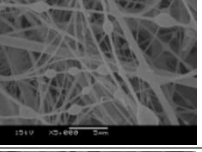
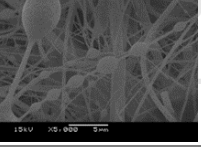
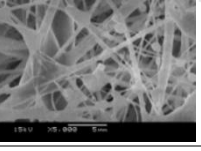
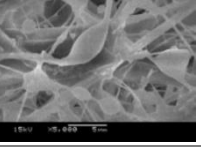
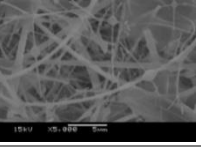
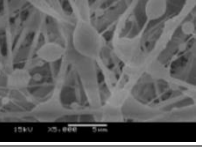
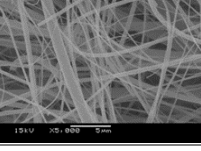
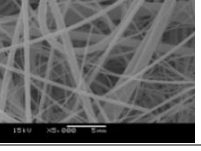
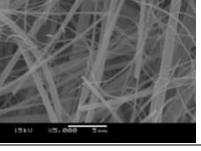
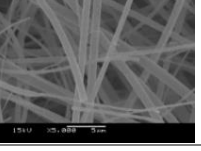
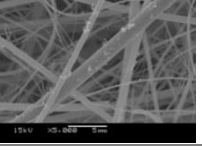


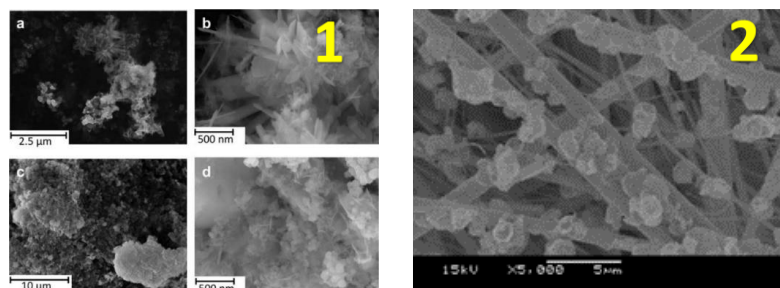
ลักษณะสัณฐานของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปที่ผ่านการทดสอบดักจับด้วยการฉีดพ่น Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ชั้นอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม ที่ช่วงชั้นอนุภาคขนาด 2.1 - 4.7 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน และในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 2.1 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม และรูปทรงรี และมีลักษณะของสารเคลือบที่เส้นใยแผ่นกรองฝุ่นในชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน

ลักษณะสัณฐานของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปที่ผ่านการทดสอบดักจับด้วยการฉีดพ่น Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ชั้นอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกลม ที่ชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 4.7 ไมครอน อนุภาคมีรูปร่างลักษณะเป็นเส้นใยฟู (Fluffy soot aggregates) ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคของ Benzalkonium chloride ที่ตกค้างอยู่บนแผ่นกระดาษกรอง อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang (2020) ที่ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานของ Benzalkonium chloride ที่อยู่ในยาหยอดจมูก โดยมีรูปร่างลักษณะทางสัณฐานวิทยาใกล้เคียงกันกับการศึกษาในครั้งนี้ (ภาพที่ 48) สำหรับที่ช่วงชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 3.3 ไมครอน อนุภาคมีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่น และมีขนาดไม่แน่นอน ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมากซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นอนุภาคของ Benzalkonium chloride ที่ตกค้างอยู่บนแผ่นกระดาษกรองฝุ่นเช่นเดียวกับที่ชั้นขนาดอนุภาค 3.3 - 4.7 ไมครอน และช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 1.1 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมโดยส่วนใหญ่ และมีลักษณะของสารเคลือบที่เส้นใยแผ่นกรองฝุ่นในชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน

ลักษณะสัณฐานของอนุภาคฝุ่นจากควันรูปที่ผ่านการทดสอบดักจับด้วยการฉีดพ่น Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ช่วงชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 5.8 ไมครอน มีลักษณะรูปร่างเป็นแผ่นเป็นส่วนใหญ่ ช่วงชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 2.1 ไมครอน อนุภาคมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน และในช่วงชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 1.1 ไมครอน อนุภาคมีรูปร่างลักษณะเป็นรูปทรงกลม และรูปทรงรี และมีลักษณะของสารเคลือบที่เส้นใยแผ่นกรองฝุ่นในชั้นอนุภาคขนาด 0.4 - 0.7 ไมครอน โดยสารที่เคลือบอยู่บนอนุภาคฝุ่นละอองในชั้นคัดแยกอนุภาคดังกล่าวเป็นลักษณะของสารแขวนลอยหรือ แอโรซอลที่เป็นของเหลว คล้ายคลึงกับในฝุ่นรูปเปลา่ที่ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานมาก่อนหน้านี้

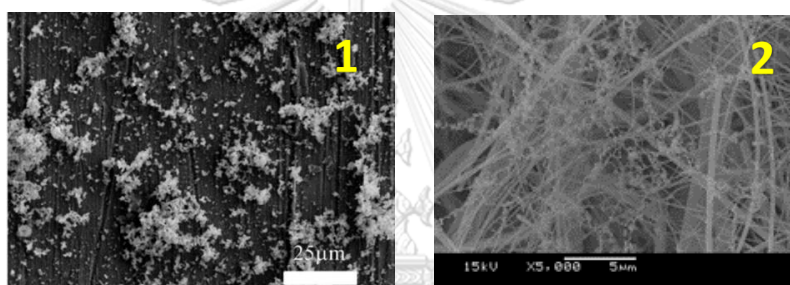
ตารางที่ 22 ลักษณะสัณฐานวิทยาตามการกระจายตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิว ในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิด

สารฉีดพ่น	น้ำเปล่า	Tween-80	Linear alkyl benzene sulfonate	Benzalkonium chloride	Cocamidopropyl betaine
ขนาดอนุภาค 4.7-5.8 $\mu\text{m}$					
3.3-4.7 $\mu\text{m}$					
2.1-3.3 $\mu\text{m}$					
1.1-2.1 $\mu\text{m}$					
0.7-1.1 $\mu\text{m}$					
0.4-0.7 $\mu\text{m}$					
0.0-0.4 $\mu\text{m}$					



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่พบในน้ำประปา

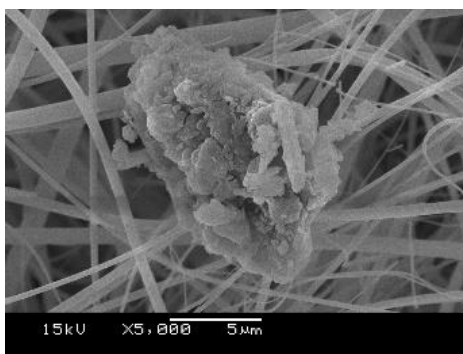
- 1) อนุภาคแร่ธาตุผลิตภัณฑ์ในน้ำประปาที่ผ่านการบำบัดด้วยโซเดียม (a,b) และแคลเซียม (c,d) ไฮโปคลอไรท์ (Romanovski, Claesson, & Hedberg, 2020) 2) อนุภาคที่พบในตัวอย่างการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในชั้นอนุภาคขนาด 1.1 - 2.1 ไมครอน



ภาพที่ 49 เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาค Benzalkonium chloride  
1) จากการศึกษาของ (J. Wang et al., 2020) 2) จากตัวอย่างที่พบในการทดสอบฉีดพ่น Benzalkonium chloride 1% w/v เพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 4.7 ไมครอน

จากการวิเคราะห์การเกาะรวมทางกายภาพของ  $PM_{2.5}$  ที่ผ่านการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิว โดยวิธีการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฝุ่นละอองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) ดังกล่าวมาข้างต้นพบว่าตัวอย่างฝุ่นละอองจากการทดสอบฉีดพ่นด้วย Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีลักษณะของการเกาะรวมทางกายภาพที่ชัดเจน โดยสังเกตจากภาพ SEM ของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฝุ่นละอองในชั้นที่มีขนาดอนุภาค 4.7 - 5.8 ไมครอน ดังภาพที่ 49 ที่มีลักษณะของอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากการเกาะรวมกันของอนุภาคขนาดเล็กหลายๆ อนุภาคและมีความแตกต่างจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างฝุ่นละอองอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษการกระจายตัวตามน้ำหนักที่พบว่า ตัวอย่างฝุ่นละอองที่ผ่านการทดสอบฉีดพ่นด้วย Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีการกระจายตัวของอนุภาคอยู่ที่ช่วงขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน (3.3 - 5.8 ไมครอน) บ่งชี้ให้เห็น

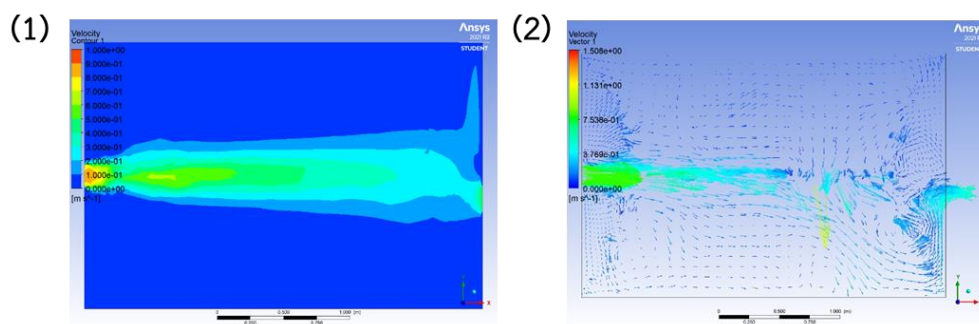
ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ Tween-80 นั้นเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มการเกาะรวมของ  $PM_{2.5}$  ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของการทดสอบการฉีดพ่นละอองในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดมากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น



ภาพที่ 50 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองจากตัวอย่างการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ขึ้นกรองอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอน

#### 4.6 ลักษณะการไหลของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

การศึกษาลักษณะการไหลของ  $PM_{2.5}$  ในการทดสอบการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ด้วยโปรแกรม ANSYS 2021 R2 ซึ่งมีจำนวนของการสร้างตาข่ายการคำนวณ (mesh) สำหรับแบบจำลองห้องทดสอบแบบกึ่งปิดที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 87,000 เซลล์ โดยผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดในสถานะที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำแสดงดังภาพที่ 50

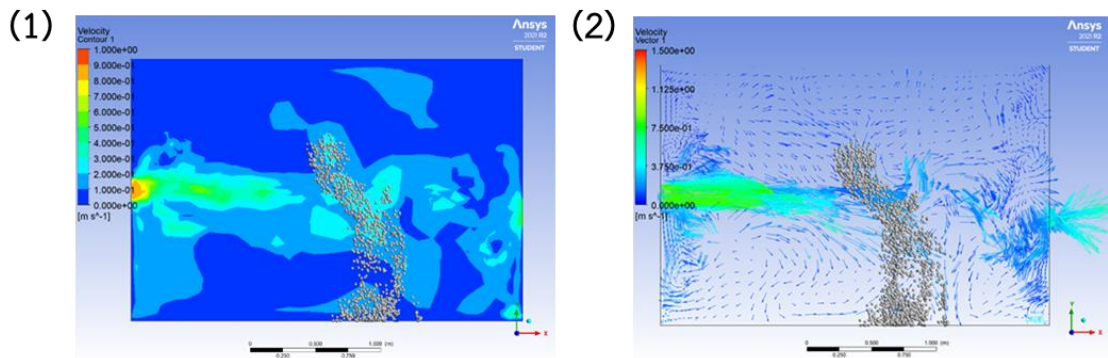


ภาพที่ 51 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่ไม่มีการฉีดพ่นละอองน้ำ

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์

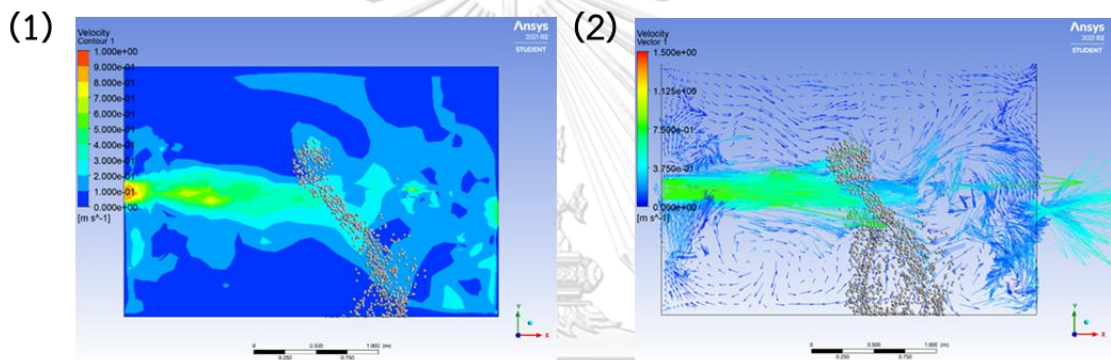
จากผลการศึกษาการไหลของฝุ่นละอองจากแบบจำลอง CFD ข้างต้น พบว่าแนวการไหลของแรงลมโดยสังเกตจากพื้นที่ สีฟ้า สีเขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง โดยไล่ตามลำดับความเร็วลมจากน้อยไปหามาก มีแนวเป็นเส้นตรงจากบริเวณช่องเปิดป้อนอากาศเข้า (Inlet) ออกสู่บริเวณช่องเปิดระบายอากาศออก (Outlet) ของห้องทดสอบอย่างชัดเจน โดยมีลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน (Vortex) เล็กน้อยที่บริเวณหน้าช่องเปิดระบายอากาศออก แสดงถึงระบบห้องทดสอบแบบกึ่งปิดที่สามารถกำหนดทิศทางของการไหลของอากาศซึ่งเป็นแนวการเคลื่อนที่ของ  $PM_{2.5}$  ให้สามารถปะทะและไหลผ่านแนวม่านละอองน้ำในการทดสอบการสกัดกั้น  $PM_{2.5}$  ให้มีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาลักษณะการไหลของ  $PM_{2.5}$  ขณะทำการฉีดพ่นละอองน้ำในสถานะที่มีการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน โดยการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ทางผู้วิจัยได้กำหนดการศึกษารูปแบบการไหลของอากาศจากแบบจำลอง CFD โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  อ้างอิงจากผลการศึกษาและการวิเคราะห์ทางสถิติก่อนหน้านี้ ได้แก่ ขนาดหัวฉีดพ่น และระดับแรงดันฉีดพ่น กำหนดจำนวนหัวฉีดพ่นที่ใช้เป็นจำนวน 1 หัวฉีด โดยผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยการปรับเปลี่ยนปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะการไหลของอากาศโดยสังเกตจากลักษณะของพื้นที่ความเร็วลมที่เกิดขึ้นมีรูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการขัดขวางของแนวฉีดพ่นละอองน้ำที่เพิ่มเข้ามาในระบบ ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 51 – 59



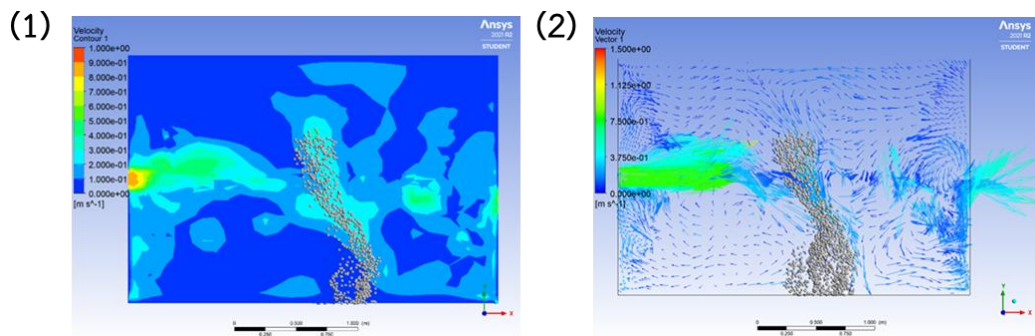
ภาพที่ 52 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



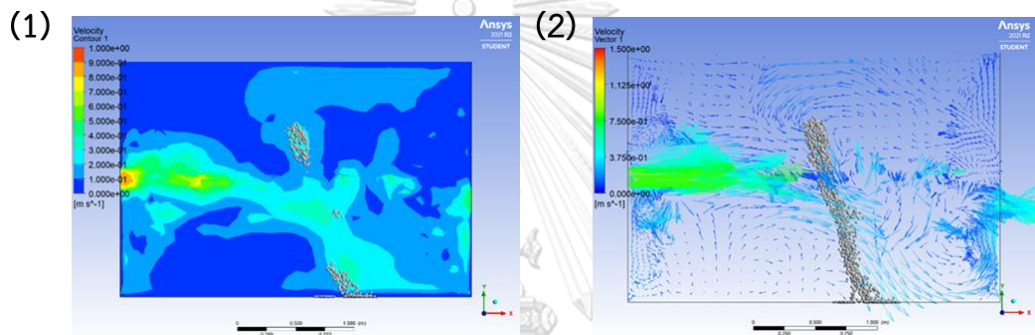
ภาพที่ 53 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



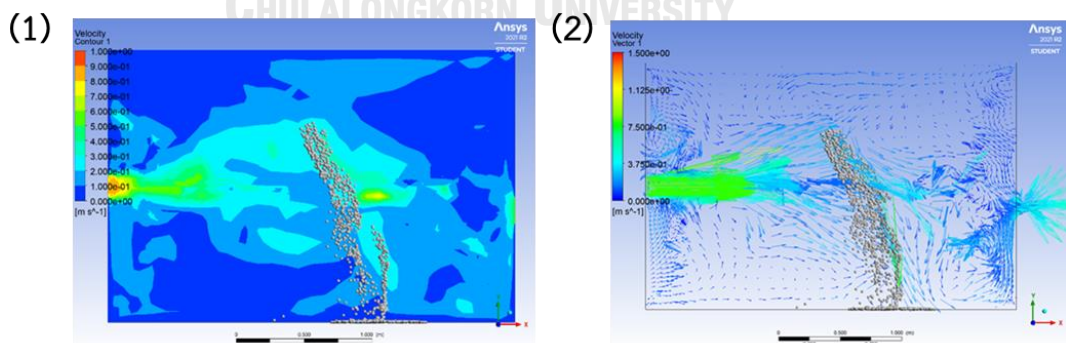
ภาพที่ 54 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



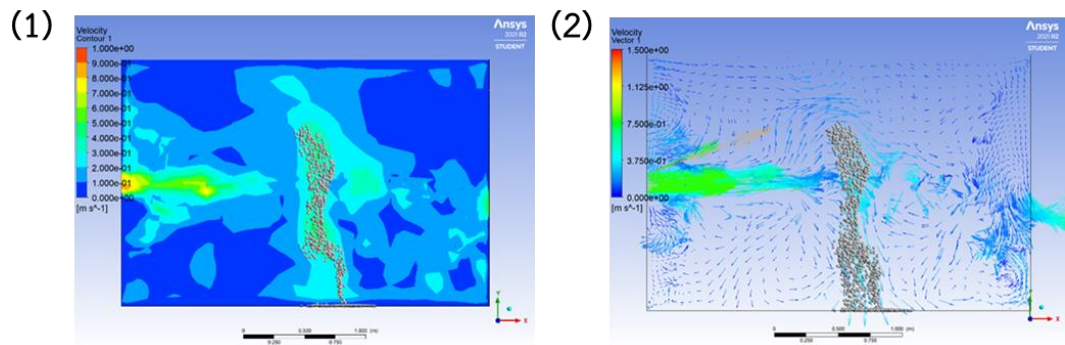
ภาพที่ 55 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



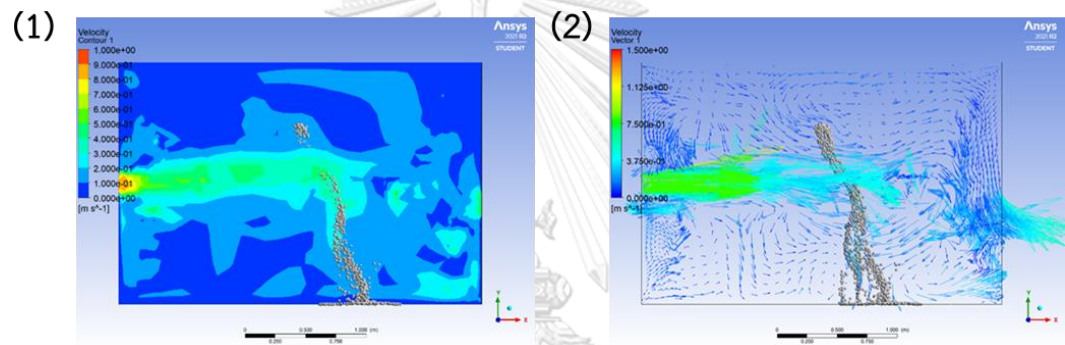
ภาพที่ 56 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



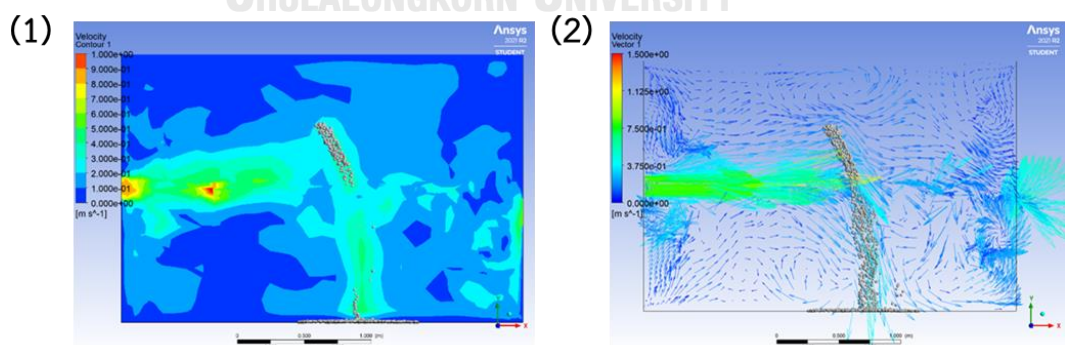
ภาพที่ 57 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



ภาพที่ 58 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa

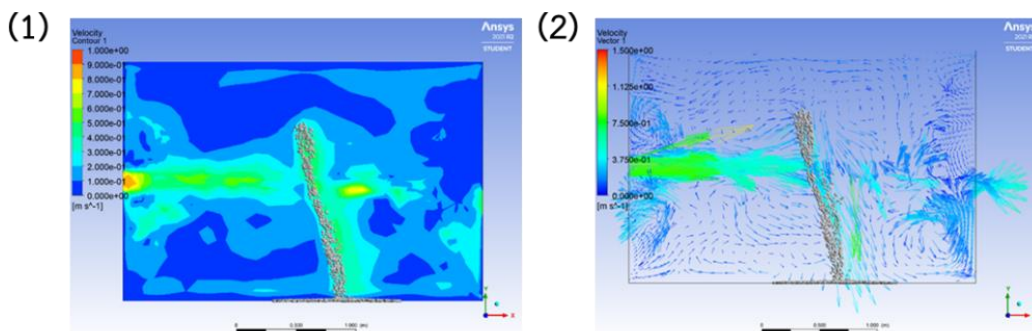
1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์



ภาพที่ 59 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์





ภาพที่ 60 รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิดในสถานะที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa

1) รูปแบบคอนทัวร์ 2) รูปแบบเวกเตอร์

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของ  $PM_{2.5}$  โดยการสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณตั้งที่กล่าวมาข้างต้น ในปัจจุบันการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยการฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 และ 0.3 เมกะปาสคาล เมื่อสังเกตพื้นที่ความเร็วลม โดยไล่ระดับความเร็วจากต่ำไปสูงได้แก่สีฟ้า สีเขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง จะสังเกตเห็นว่ามีแนวกระแสลมจากช่องป้อนเข้าอากาศบริเวณตรงกลางของห้องทดสอบปะทะหน้าม่านละอองน้ำ และมีพื้นที่ของการปะทะเพิ่มมากขึ้นที่ระดับแรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล โดยมีแรงลมบริเวณแนวปะทะอยู่ในช่วงประมาณ 0.18 - 0.21 เมตรต่อวินาที ที่ปัจจุบันการฉีดพ่นด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าแนวพื้นที่ของการปะทะกันระหว่างแรงลมและแนวฉีดพ่นละอองน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.4 เมกะปาสคาล แรงลมบริเวณแนวปะทะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 0.23 - 0.31 เมตรต่อวินาที และเมื่อสังเกตพื้นที่ความเร็วลมในปัจจุบันการฉีดพ่นด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ในระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล เกิดแนวปะทะระหว่างพื้นที่ความเร็วลมและม่านละอองน้ำไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่นที่ 0.3 และ 0.4 เมกะปาสคาล จะเห็นแนวปะทะของแรงลมอย่างชัดเจนตลอดแนวพื้นที่บริเวณหน้าม่านละอองน้ำและมีค่าความเร็วของแรงลมในแนวปะทะกับม่านละอองน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.24-0.45 เมตรต่อวินาทีโดยประมาณ ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันฉีดพ่นที่ทำให้เกิดความแตกต่างของการเบี่ยงเบนของพื้นที่ความเร็วลมที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's Equations) ตามหลักของพลศาสตร์ของไหล ดังนี้

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

เมื่อ  $P_1, P_2$  คือ ความดันของของไหล

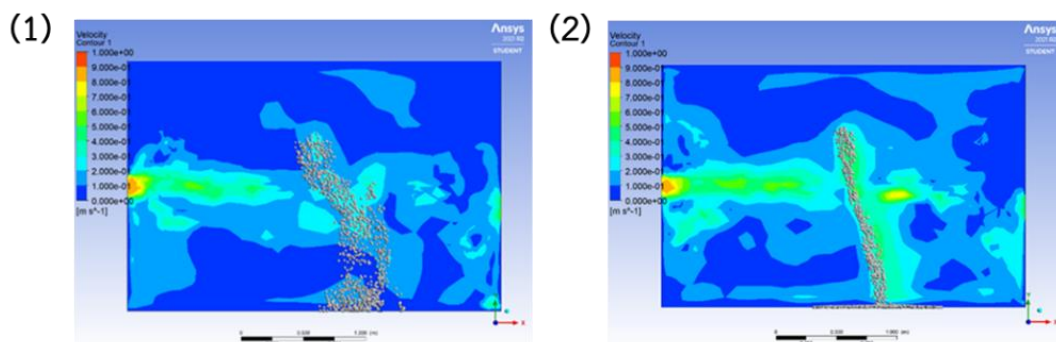
$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

$h_1, h_2$  คือ ความสูงของกระแสของไหลวัดจากระดับอ้างอิง

$V_1, V_2$  คือ ความเร็วของของไหล

$A_1, A_2$  คือพื้นที่หน้าตัดของท่อสายกระแส (ขนาดหัวฉีดพ่นละอองน้ำ)

โดยสมการดังกล่าวเป็นสมการเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันฉีดพ่น (P) กับความเร็ว (V) ของละอองน้ำที่ออกมาโดยเมื่อแรงดันฉีดพ่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความเร็วของละอองน้ำเพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่งผลต่อความสามารถในการเบี่ยงเบนทิศทางของลมที่เข้ามาปะทะได้มากขึ้นเช่นกัน รวมถึงขนาดหัวฉีดพ่นละอองน้ำ (A) ที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วของละอองน้ำเช่นกัน โดยเมื่อขนาดหัวฉีดหรือพื้นที่ของรูฉีดพ่นละอองน้ำเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความเร็ว (V) ของละอองน้ำลดลง แต่ก็จะมีพื้นที่สัมผัสของละอองน้ำกับฝุ่นละอองเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากปริมาณและความหนาแน่นของละอองน้ำที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วละอองน้ำที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อระยะเวลาคงอยู่ในระบบ (retention time) ของละอองน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของลักษณะการไหลของอากาศและการสกັดกันของของไหลจากการคำนวณของแบบจำลอง CFD ในสภาวะการฉีดพ่นที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบควบคู่กับผลการทดสอบประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ก่อนหน้าระหว่างปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดและมากที่สุดโดยกำหนดปัจจัยจำนวนหัวฉีดที่ 1 หัวฉีด ได้แก่ หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล (ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> = 6.4%±0.4%) และหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล (ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> = 22%±1.4%) ตามลำดับพบว่าลักษณะของพื้นที่แรงลมและความเร็วลมที่บริเวณแนวปะทะกับพื้นที่บริเวณหน้าม่านละอองน้ำมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในปัจจัยการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดลักษณะของแรงลมที่ปะทะหน้าม่านละอองน้ำเกิดเป็นแนวสกັดกันและเบี่ยงเบนทิศทางลมลงสู่พื้นอย่างชัดเจน สามารถแสดงถึงลักษณะของการสกັดกันและดักจับฝุ่นละอองที่ดีกว่าลักษณะวิธีการฉีดพ่นอื่นๆ เนื่องจากปริมาณและความหนาแน่นของอนุภาคละอองน้ำที่ใช้ในการสกັดกันและดักจับ PM<sub>2.5</sub> มีมากกว่าการฉีดพ่นด้วยขนาดหัวฉีดที่เล็กลงหรือระดับแรงดันฉีดพ่นที่น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบก่อนหน้า โดยการเปรียบเทียบผลการศึกษาแบบจำลองการไหลของอากาศดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 60



ภาพที่ 61 คอนทัวร์การกระจายตัวของความเร็วลมของผลการสร้างแบบจำลอง CFD ในห้องทดสอบแบบกึ่งปิด

- 1) จำลองการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 mm. ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa
- 2) จำลองการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 mm. ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa

จากผลการศึกษาทั้งหมดที่กล่าวมาชี้ให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนลักษณะวิธีการฉีดพ่นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของอุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำ โดยเฉพาะการปรับเปลี่ยนแรงดันฉีดพ่นและขนาดหัวฉีดควบคู่กัน แต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนของการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับขนาดอนุภาคละอองน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปัจจัยลักษณะวิธีการฉีดพ่นต่างๆ ดังนั้นในส่วนของงานวิจัยในครั้งต่อไปควรมีการศึกษาในส่วนของขนาดอนุภาคละอองน้ำที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  เพิ่มเติม และในส่วนของผลการศึกษาประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ของสารลดแรงตึงผิวโดยเฉพาะ Tween-80 ที่พบว่าไม่ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการฉีดพ่นน้ำแบบเดิมอย่างที่คาดหวังไว้ แต่ในส่วนของคุณสมบัติการเพิ่มการเกาะรวมจากการศึกษาการกระจายตัวตามขนาดของ  $PM_{2.5}$  และลักษณะการเกาะรวมจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างการทดสอบ สารลดแรงตึงผิวกลับมีคุณสมบัติในการเป็นสารเกาะรวมได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปอาจมีการนำสารลดแรงตึงผิวไปทดสอบในระบบควบคุมและกำจัด  $PM_{2.5}$  รูปแบบอื่นๆ เพิ่มเติม หรือนำไปผสมกับสารชนิดอื่นในการช่วยส่งเสริมคุณสมบัติในการเพิ่มการเกาะรวมของอนุภาค  $PM_{2.5}$  ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป และจากข้อสังเกตที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองการไหลของฝุ่นละอองพบว่า ลักษณะการแนวการไหลของกระแสลมบางส่วนที่พัดพาฝุ่นละอองอาจมีการเลี้ยวเบนออกจากแนวการปะทะกับม่านละอองน้ำได้ซึ่งส่งผลให้การฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดจากการศึกษาครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  จากการทดสอบลดลง เนื่องจากม่านละอองน้ำภายในระบบไม่สามารถสกัดกั้นฝุ่นละอองที่ไหลเข้ามาภายในระบบได้ทั้งหมด

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาประสิทธิภาพของน้ำและสารลดแรงตึงผิวในการลด  $PM_{2.5}$  ด้วยการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิด โดยได้ทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนปัจจัยด้านลักษณะและวิธีการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อนำไปทดสอบฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดได้แก่ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant) Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ (anionic surfactant) Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวก (cationic surfactant) Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1 % w/v เป็นตัวแทนสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (amphoteric surfactant) รวมทั้งหมด 4 ชนิด โดยทำการทดสอบฉีดพ่นในระบบเป็นเวลา 15 นาที และใช้การเผาไหม้รูปเป็นแหล่งกำเนิด  $PM_{2.5}$  พร้อมทั้งวิเคราะห์การกระจายตัวตามขนาดและลักษณะทางสัญญาณวิทยาของการจับตัวทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) ของ  $PM_{2.5}$  ในการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิว รวมถึงศึกษาลักษณะการไหลของ  $PM_{2.5}$  ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 ประสิทธิภาพในการลด $PM_{2.5}$ ของการฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

ลักษณะวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ด้วยระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล ด้วยหัวฉีดพ่น 1 หัว โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ  $22 \pm 1.4$  จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลด  $PM_{2.5}$  ด้วยสถิติ One-Way ANOVA พบว่าการปรับเปลี่ยนขนาดหัวฉีด และระดับแรงดันฉีดพ่นแต่ละระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) การเพิ่มลดจำนวนหัวฉีดพ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value > 0.05) จากการวิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์ด้วยสถิติ

Pearson correlation และ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) พบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพ ได้แก่ แรงดันฉีดพ่น และขนาดหัวฉีด โดยแรงดันฉีดเป็นปัจจัยที่มีระดับความสัมพันธ์มาก และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ขนาดหัวฉีดเป็นปัจจัยที่มีระดับความสัมพันธ์น้อย และมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง (nonlinear relationship) โดยมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 (p-value = 0.0042) นอกจากนี้ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างขนาดหัวฉีด และแรงดันฉีดพ่นมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เช่นกัน ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ในขณะที่การเพิ่มขนาดหัวฉีดไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างชัดเจน แต่การฉีดพ่นละอองน้ำโดยเพิ่มระดับแรงดันฉีดพ่นกับขนาดหัวฉีดควบคู่กันสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองพื้นที่แบบกึ่งปิดได้

### 5.1.2 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของการฉีดพ่นละอองสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> มากที่สุดคือ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v รองลงมาได้แก่ Cocamidopropyl betaine, Linear alkyl benzene sulfonate และ Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 23.6 ± 1.4, 12.2 ± 0.2, 9.1 ± 0.4 และ 8.5 ± 0.3 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่มีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 22 ± 1.4 ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ของ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v มีประสิทธิภาพมากกว่าน้ำคิดเป็นร้อยละ 1.6 หรือ 0.07 เท่า และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยสถิติ One-Way ANOVA พบว่าประสิทธิภาพของ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v สูง สารลดแรงตึงผิวอีก 3 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) เมื่อเปรียบเทียบ Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v พบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value < 0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Tween-80 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าน้ำเพียงเล็กน้อย

### 5.1.3 การกระจายตัวตามขนาดของ PM<sub>2.5</sub> หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

การทดสอบฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวสามารถส่งผลให้การกระจายตัวของปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองส่วนใหญ่ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า PM<sub>2.5</sub> ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคฝุ่นละอองที่ใหญ่ขึ้นมากที่สุดพบจากการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1%

w/v รองลงมาได้แก่ Benzalkonium chloride และ Cocoamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v โดยมีปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองส่วนใหญ่รวมตัวกันอยู่ที่ชั้นอนุภาคขนาด 3.3 - 5.8 ไมครอนคิดเป็นร้อยละ 60.7, 42.9 และ 42.5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Tween-80, Benzalkonium chloride และ Cocoamidopropyl betaine เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นสารเกาะรวม (agglomerant) ที่ช่วยส่งเสริมการลด PM<sub>2.5</sub> โดยกลไกการเกาะรวม (agglomeration) ของ PM<sub>2.5</sub> ที่อยู่ในอากาศส่งผลให้อนุภาคมีขนาดและน้ำหนักมากขึ้น จึงทำให้ PM<sub>2.5</sub> สามารถตกลงสู่พื้นได้อย่างรวดเร็ว โดยจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า Tween-80 มีคุณสมบัติเป็นสารเกาะรวมได้ดีที่สุด

#### 5.1.4 ลักษณะการจับตัวกันทางกายภาพของ PM<sub>2.5</sub> หลังการฉีดพ่นละอองน้ำและสารลดแรงตึงผิวในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นละอองที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope / SEM) พบว่าตัวอย่างอนุภาคในการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่ความเข้มข้น 1% w/v ที่ชั้นกรองอนุภาคขนาด 4.7 - 5.8 ไมครอนแสดงให้เห็นว่าอนุภาคฝุ่นละอองมีลักษณะการจับตัวกันของอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กอย่างชัดเจนและมีขนาดใหญ่กว่า 2.5 ไมครอน แสดงให้เห็นว่า Tween-80 เป็นสารลดแรงตึงผิวสามารถทำหน้าที่เป็นสารเกาะรวม โดยทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กสามารถเกาะรวมกันจนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้อย่างชัดเจน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่างอนุภาคในการทดสอบฉีดพ่นน้ำ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคฝุ่นที่พบมีลักษณะการเกาะรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่พบน้อยกว่าในตัวอย่างอนุภาคการทดสอบฉีดพ่น Tween-80

#### 5.1.5 ลักษณะการไหลของ PM<sub>2.5</sub> ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

การจำลองการฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดัน 0.4 เมกะปาสคาล ทำให้สามารถสังเกตลักษณะของการสักรัดกันและเบี่ยงเบนทิศทางลมในบริเวณพื้นที่แนวปะทะหน้าม่านละอองน้ำชัดเจนที่สุด โดยจากการศึกษาแบบจำลองทั้งหมดบ่งชี้ให้เห็นว่าลักษณะการขัดขวางทิศทางการไหลของอากาศบริเวณแนวปะทะบริเวณหน้าม่านละอองน้ำ มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยในการฉีดพ่นละอองน้ำ โดยเฉพาะระดับแรงดันฉีดพ่นที่ส่งผลต่อลักษณะ

การกระจายตัวและทิศทางของความเร็วลมที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านบริเวณหน้ามานละอองน้ำ โดยระดับแรงดันฉีดพ่นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วลมในจุดปะทะกับมานละอองน้ำเพิ่มสูงขึ้นรวมถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมที่เกิดการเบี่ยงเบนไปตามทิศทางการไหลของละอองน้ำที่มาจากจุดฉีดพ่นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงแรงดันฉีดพ่น (P) มีผลต่อความเร็ว (V) ของอนุภาคละอองน้ำ นอกจากนี้ขนาดหัวฉีดพ่นละอองน้ำยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อพื้นที่ฉีดพ่นละอองน้ำ (A) ที่ส่งผลต่อปริมาณและความหนาแน่นของละอองน้ำที่เกิดขึ้น โดยเมื่อขนาดหัวฉีดพ่นใหญ่ขึ้น ปริมาณและความหนาแน่นของมวลและอนุภาคละอองน้ำที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ลักษณะการสกัดกั้นแนวการไหลของอากาศด้วยมานฉีดพ่นละอองน้ำทำได้ดีขึ้นเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การใช้อุปกรณ์ฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลดฝุ่นละออง ต้องมีระบบจัดการรองรับน้ำที่เกิดขึ้นจากการฉีดพ่น และเลือกประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่เหมาะสม หากนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดหรือพื้นที่อุตสาหกรรมต่างๆ ควรมีระบบรองรับและบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น หรือหากนำไปประยุกต์ใช้ในครัวเรือนหรือพื้นที่สาธารณะทั่วไปควรเลือกใช้ในพื้นที่ที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อบุคคลที่สัญจรผ่านไปมา เช่น ไม่ติดตั้งในพื้นที่ที่มีพื้นผิวลื่นง่าย เพราะอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ ไม่ติดตั้งในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำขังหรือพื้นที่ที่ไม่สามารถระบายน้ำออกได้สะดวก เพราะอาจทำให้เกิดโรคร่ที่เกิดขึ้นจากน้ำขังในบริเวณนั้นรวมถึงเกิดทรศณะอุจาด และความไม่สะดวกสบายต่อผู้ที่อาศัยหรือสัญจรผ่านไปมาในพื้นที่ได้ และควรเลือกใช้น้ำหรือสารฉีดพ่นที่มีความสะอาดและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

2) ถึงแม้ว่าการเพิ่มขนาดหัวฉีด และแรงดันฉีดพ่นจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> เพิ่มสูงขึ้น แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณภาพน้ำหรือสารที่นำมาใช้เพิ่มสูงขึ้นด้วย รวมถึงค่าใช้จ่ายของการปรับเปลี่ยนหรือนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้แทนน้ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน ควรพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้จริงเพื่อความคุ้มค่าต่อประสิทธิภาพที่ได้รับ และไม่ใช้ทรัพยากรให้สูญเปล่านั้นมากเกินไป

3) ควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลด PM<sub>2.5</sub> เช่น ระดับความสูงในการฉีดพ่น เพิ่มจำนวนหัวฉีดให้ครอบคลุมพื้นที่การทดสอบในรูปแบบอื่นๆ ขนาดอนุภาคละอองน้ำ การปรับคุณสมบัติของสารให้เหมาะสมในการทดสอบ (ความเข้มข้น ความหนืด ความเป็นกรด-ด่าง) เป็นต้น การศึกษาลักษณะการจับตัวทางเคมีของสารและฝุ่นละอองที่ชัดเจนขึ้นด้วยอุปกรณ์หรือ

เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง การศึกษาพัฒนาระบบเพื่อประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริง หรือการนำไปใช้ใน พื้นที่การทดสอบที่มีขนาดแตกต่างออกไปโดยสามารถนำค่าอัตราส่วนของอัตราการใช้ของเหลวต่อ ก๊าซ (Gas-Liquid ratio, GLR) จากการคำนวณในรูปแบบวิธีการฉีดพ่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใน การการศึกษาครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อหารูปแบบวิธีการฉีดพ่นที่เหมาะสมในพื้นที่นั้นๆได้ และเลือก ทำการศึกษาในพื้นที่ที่สามารถควบคุมปัจจัยรบกวนต่างๆ ได้มากขึ้น เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และ แรงแลมที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ภายนอก รวมถึงฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงไป





## บรรณานุกรม

- Al-Gebory, L., & Mengüç, M. P. (2018). The effect of pH on particle agglomeration and optical properties of nanoparticle suspensions. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 219, 46-60. doi:10.1016/j.jqsrt.2018.07.020
- Alberni-Clayoquot. (2020). Particulate Matter. Retrieved from <https://www.acrd.bc.ca/particulate-matter>
- Bian, Y., Wang, S., Zhang, L., & Chen, C. (2020). Influence of fiber diameter, filter thickness, and packing density on PM2.5 removal efficiency of electrospun nanofiber air filters for indoor applications. *Building and Environment*, 170. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106628
- Bian, Z., Li, Y., Zhang, C., Zhao, J., Wang, Z., & Liu, W. (2021). CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> heat storage performance of hollow nanostructured CaO-based material from Ca-looping cycles for CO<sub>2</sub> capture. *Fuel Processing Technology*, 217, 106834. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106834>
- Bin, H., Yang, Y., Lei, Z., Ao, S., Cai, L., Linjun, Y., & Roszak, S. (2018). Experimental and DFT studies of PM2.5 removal by chemical agglomeration. *Fuel*, 212, 27-33. doi:10.1016/j.fuel.2017.09.121
- Chang, S.-Y., Chou, C. C. K., Liu, S., & Zhang, Y. (2013). The Characteristics of PM2.5 and Its Chemical Compositions between Different Prevailing Wind Patterns in Guangzhou. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(4), 1373-1383. doi:10.4209/aaqr.2012.09.0253
- Chen, S.-C., Tang, M., Kuehn, T. H., Lo, C. S., Zhao, D., Xie, X., . . . Pui, D. Y. H. (2020). Design of a rain-shower based cleaning system for simultaneous PM2.5 removal and CO<sub>2</sub> capture of ambient air. *Separation and Purification Technology*, 237. doi:10.1016/j.seppur.2019.116389
- Dai, X., Liu, J., Li, X., & Zhao, L. (2018). Long-term monitoring of indoor CO<sub>2</sub> and PM2.5 in Chinese homes: Concentrations and their relationships with outdoor environments. *Building and Environment*, 144, 238-247. doi:10.1016/j.buildenv.2018.08.019

- Dassisti, M., & Brunetti, G. (2020). Introduction to Magnetorheological Fluids. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*.
- El-Sherbiny, S., El-Sheikh, S. M., & Barhoum, A. (2015). Preparation and modification of nano calcium carbonate filler from waste marble dust and commercial limestone for papermaking wet end application. *Powder Technology*, 279, 290-300. doi:10.1016/j.powtec.2015.04.006
- Feng, J. L., Guo, Z. G., Zhang, T. R., Yao, X. H., Chan, C. K., & Fang, M. (2012). Source and formation of secondary particulate matter in PM<sub>2.5</sub> in Asian continental outflow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D3), n/a-n/a. doi:10.1029/2011jd016400
- Han, D., Guene Lougou, B., Xu, Y., Shuai, Y., & Huang, X. (2020). Thermal properties characterization of chloride salts/nanoparticles composite phase change material for high-temperature thermal energy storage. *Applied Energy*, 264. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114674
- He, Y., Gu, Z., Lu, W., Zhang, L., Okuda, T., Fujioka, K., . . . Yu, C. W. (2019). Atmospheric humidity and particle charging state on agglomeration of aerosol particles. *Atmospheric Environment*, 197, 141-149. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.10.035
- Hernandez-Diaz, D., Martos-Ferreira, D., Hernandez-Abad, V., Villar-Ribera, R., Tarres, Q., & Rojas-Sola, J. I. (2021). Indoor PM<sub>2.5</sub> removal efficiency of two different non-thermal plasma systems. *J Environ Manage*, 278(Pt 1), 111515. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111515
- Huang, T., Chen, J., Zhao, W., Cheng, J., & Cheng, S. (2016). Seasonal Variations and Correlation Analysis of Water-Soluble Inorganic Ions in PM<sub>2.5</sub> in Wuhan, 2013. *Atmosphere*, 7(4). doi:10.3390/atmos7040049
- Huang, X. H. H., Bian, Q., Ng, W. M., Louie, P. K. K., & Yu, J. Z. (2014). Characterization of PM<sub>2.5</sub> Major Components and Source Investigation in Suburban Hong Kong: A One Year Monitoring Study. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1), 237-250. doi:10.4209/aaqr.2013.01.0020
- Huo, P., Yan, Y., Li, S., Li, H., & Huang, W. (2009). Preparation and characterization of Cobalt Sulphophthalocyanine/TiO<sub>2</sub>/fly-ash cenospheres photocatalyst and study on degradation activity under visible light. *Applied Surface Science*, 255(15),

6914-6917. doi:10.1016/j.apsusc.2009.03.014

- Javed, W., Wexler, A. S., Murtaza, G., Ahmad, H. R., & Basra, S. M. A. (2015). Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan. *Atmósfera*, *28*(2), 99-116. doi:10.20937/atm.2015.28.02.03
- Khaliullin, T. O., Kisin, E. R., Yanamala, N., Guppi, S., Harper, M., Lee, T., & Shvedova, A. A. (2019). Comparative cytotoxicity of respirable surface-treated/untreated calcium carbonate rock dust particles in vitro. *Toxicol Appl Pharmacol*, *362*, 67-76. doi:10.1016/j.taap.2018.10.023
- Kim, J., Kim, J. J., & Lee, S. J. (2020). Efficient removal of indoor particulate matter using water microdroplets generated by a MHz-frequency ultrasonic atomizer. *Building and Environment*, *175*. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106797
- Kim, J. J., Hann, T., & Lee, S. J. (2019). Effect of flow and humidity on indoor deposition of particulate matter. *Environ Pollut*, *255*(Pt 2), 113263. doi:10.1016/j.envpol.2019.113263
- Kumar, D., & Kumar, D. (2018). Dust Control. In *Sustainable Management of Coal Preparation* (pp. 265-278).
- Lewandowski, K. A., & Kawatra, S. K. (2009). Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching. *International Journal of Mineral Processing*, *91*(3-4), 88-93. doi:10.1016/j.minpro.2009.01.004
- Li, Z., Wen, Q., & Zhang, R. (2017). Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>): A review. *Sci Total Environ*, *586*, 610-622. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.029
- Liu, X., Liu, J., Zhao, L., Ma, Z., Li, J., Wang, X., . . . He, C. (2020). Effects of operating conditions on the morphology and internal structure of soot particles emitted from an agricultural tractor. *Biosystems Engineering*, *198*, 280-290. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.08.018
- Liu, Y., Hu, B., Zhou, L., Jiang, Y., & Yang, L. (2016). Improving the Removal of Fine Particles with an Electrostatic Precipitator by Chemical Agglomeration. *Energy & Fuels*, *30*(10), 8441-8447. doi:10.1021/acs.energyfuels.6b00626
- Liu, Z., Nie, W., Peng, H., Yang, S., Chen, D., & Liu, Q. (2019). The effects of the spraying

- pressure and nozzle orifice diameter on the atomizing rules and dust suppression performances of an external spraying system in a fully-mechanized excavation face. *Powder Technology*, 350, 62-80.  
doi:10.1016/j.powtec.2019.03.029
- Ma, Y., Jiang, Y., & Li, L. (2015). Numerical Simulation of PM2.5 Distribution in Indoor Air. *Procedia Engineering*, 121, 1939-1947. doi:10.1016/j.proeng.2015.09.183
- Martins, N. R., & Carrilho da Graça, G. (2018). Impact of PM2.5 in indoor urban environments: A review. *Sustainable Cities and Society*, 42, 259-275.  
doi:10.1016/j.scs.2018.07.011
- Mills, D. (2016). Airflow Rate Evaluation. In *Pneumatic Conveying Design Guide* (pp. 199-225).
- Mkoma, S. L., Rocha, G. O. D., Domingos, J. S. S., Santos, J. V. S., Cardoso, M. P., Silva, R. L. D., & Andrade, J. B. D. (2014). Atmospheric particle dry deposition of major ions to the South Atlantic coastal area observed at Baía de Todos os Santos, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(1), 37-55. doi:10.1590/0001-3765201420130234
- Naghdi, M., Taheran, M., Rama, P., Rouissi, T., Brar, S., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2017). Pine-Wood derived Nanobiochar for Removal of Carbamazepine from Aqueous Media: Adsorption Behavior and Influential Parameters. *Arabian Journal of Chemistry*, 12. doi:10.1016/j.arabjc.2016.12.025
- Nair, L., Stephens, N., Vincent, S., Raghavan, N., & Sand, P. (2003). Determination of polysorbate 80 in parenteral formulations by high-performance liquid chromatography and evaporative light scattering detection. *Journal of chromatography. A*, 1012, 81-86. doi:10.1016/S0021-9673(03)01105-1
- Nakama, Y. (2017). Surfactants. In *Cosmetic Science and Technology* (pp. 231-244).
- Narasimman, R., Vijayan, S., & Prabhakaran, K. (2014). Effect of activated carbon particle size on the thermo-foaming of aqueous sucrose resin and properties of the carbon foams. *Journal of Materials Research*, 30(1), 46-54.  
doi:10.1557/jmr.2014.294
- National Center for Environmental Assessment NC. (1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter* (Vol. 3): US Environmental Protection Agency, Office of

Research and Development.

- Niu, Z., Bian, Y., Xia, T., Zhang, L., & Chen, C. (2021). An optimization approach for fabricating electrospun nanofiber air filters with minimized pressure drop for indoor PM<sub>2.5</sub> control. *Building and Environment*, 188. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107449
- Peng, H., Cheng, W., Guo, Y., Xu, C., Guo, C., Ma, Q., . . . Yang, S. (2020). Study on the spray field distribution of the roadway full-section water curtain device and its effect on the settlement of PM<sub>2.5</sub>. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 101-113. doi:10.1016/j.psep.2020.05.038
- Peng, H., Nie, W., Yu, H., Cheng, W., Bai, P., Liu, Q., . . . Ma, Q. (2019). Research on mine dust suppression by spraying: Development of an air-assisted PM<sub>10</sub> control device based on CFD technology. *Advanced Powder Technology*, 30(11), 2588-2599. doi:10.1016/j.appt.2019.08.006
- Piemjaiswang, R. (2018). *Computational fluid dynamics of fluid transport and deposition of particles under unsteady flow in human fluid system*. (Doctoral dissertation, Chulalongkorn University). Chulalongkorn University Department of Chemical Technology.
- Qu, Y., Wang, H., Zhu, L., & Ji, J. (2017). Concentration Distribution and Control strategy of Indoor PM<sub>2.5</sub>. *Procedia Engineering*, 205, 1606-1611. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.288
- Ramanathan, S., Gopinath, S. C. B., Arshad, M. K. M., & Poopalan, P. (2020). Nanostructured aluminosilicate from fly ash: Potential approach in waste utilization for industrial and medical applications. *Journal of Cleaner Production*, 253. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119923
- Romanovski, V., Claesson, P. M., & Hedberg, Y. S. (2020). Comparison of different surface disinfection treatments of drinking water facilities from a corrosion and environmental perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12704-12716. doi:10.1007/s11356-020-07801-9
- Sabirova, A., Wang, S., Falca, G., Hong, P.-Y., & Nunes, S. P. (2021). Flexible isoporous air filters for high-efficiency particle capture. *Polymer*, 213. doi:10.1016/j.polymer.2020.123278

- SciByDegrees. (2018, 2018-06-13). Mixing oil and water - Science by degrees. Retrieved from <https://sciencebydegrees.com/2018/06/13/mixing-oil-and-water/>
- See, S. W., & Balasubramanian, R. (2011). Characterization of fine particle emissions from incense burning. *Building and Environment*, *46*(5), 1074-1080. doi:10.1016/j.buildenv.2010.11.006
- Sen, R., Goeppert, A., Kar, S., & Prakash, G. K. S. (2020). Hydroxide Based Integrated CO<sub>2</sub> Capture from Air and Conversion to Methanol. *Journal of the American Chemical Society*, *142*(10), 4544-4549. doi:10.1021/jacs.9b12711
- Spraying System Co. (2016). *Spray technology for dust control: A guide to selecting the optimal spray system for your application*.
- Tang, H., Zhao, L., Sun, W., Hu, Y., & Han, H. (2016). Surface characteristics and wettability enhancement of respirable sintering dust by nonionic surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *509*, 323-333. doi:10.1016/j.colsurfa.2016.09.041
- Tessum, M. W., & Raynor, P. C. (2017). Effects of Spray Surfactant and Particle Charge on Respirable Coal Dust Capture. *Saf Health Work*, *8*(3), 296-305. doi:10.1016/j.shaw.2016.12.006
- Tian, Y. Z., Chen, J. B., Zhang, L. L., Du, X., Wei, J. J., Fan, H., . . . Feng, Y. C. (2017). Source profiles and contributions of biofuel combustion for PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and their compositions, in a city influenced by biofuel stoves. *Chemosphere*, *189*, 255-264. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.09.044
- United States. Environmental Protection Agency. (1996). *Review of the national ambient air quality standards for particulate matter: Policy assessment of scientific and technical information*: DIANE Publishing.
- United States. Environmental Protection Agency. (2004). Air quality criteria for particulate matter. *US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park*.
- United States. Environmental Protection Agency. (2017). Indoor Particulate Matter. Retrieved from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/indoor-particulate-matter>
- United States. Environmental Protection Agency. (2018). Environmental Topics. In.

- Wang, B., Lee, S. C., & Ho, K. F. (2006). Chemical composition of fine particles from incense burning in a large environmental chamber. *Atmospheric Environment*, 40(40), 7858-7868. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.07.041
- Wang, J., Zhang, T., Zhang, X., Asif, M., Jiang, L., Dong, S., . . . Liu, H. (2020). Inhibition effects of benzalkonium chloride on *Chlorella vulgaris* induced corrosion of carbon steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 43, 14-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.012>
- Wang, P., Han, H., Tian, C., Liu, R., & Jiang, Y. (2020). Experimental study on dust reduction via spraying using surfactant solution. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 32-42. doi:10.1016/j.apr.2020.02.010
- Wang, P., Tan, X., Zhang, L., Li, Y., & Liu, R. (2019). Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying. *Process Safety and Environmental Protection*, 132, 189-199. doi:10.1016/j.psep.2019.09.031
- Wang, S., Wang, J., Song, C., & Wen, J. (2019). Numerical investigation on urea particle removal in a spray scrubber using particle capture theory. *Chemical Engineering Research and Design*, 145, 150-158. doi:10.1016/j.cherd.2019.03.011
- Wang, X., Zhang, Y., Liu, B., Liang, P., & Zhang, Y. (2019). Effectiveness and mechanism of carbamide/fly ash cenosphere with bilayer spherical shell structure as explosion suppressant of coal dust. *J Hazard Mater*, 365, 555-564. doi:10.1016/j.jhazmat.2018.11.044
- Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Chen, S., & Zheng, A. (2005). The ion chemistry and the source of PM<sub>2.5</sub> aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment*, 39(21), 3771-3784. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.03.013
- Wang, Y., Zhuang, G., Zhang, X., Huang, K., Xu, C., Tang, A., . . . An, Z. (2006). The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM<sub>2.5</sub> and TSP aerosol in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 40(16), 2935-2952. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.051
- Woo, H. C., Yoo, D. K., & Jhung, S. H. (2021). Particulate matters removal by using cotton coated with isomeric metal-organic frameworks (MOFs): Effect of voidage of MOFs on removal. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 95, 277-285.

doi:10.1016/j.jiec.2020.12.035

- World Health Organization. (2013). Health Effects of Particulate Matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia.
- Xia, T., & Chen, C. (2020). Toward understanding the evolution of incense particles on nanofiber filter media: Its influence on PM<sub>2.5</sub> removal efficiency and pressure drop. *Building and Environment*, 172, 106725.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106725>
- Xu, G., Chen, Y., Eksteen, J., & Xu, J. (2018). Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors. *Sci Total Environ*, 639, 1060-1076. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.182
- Yang, X., Pu, Y., Zhang, Y., Liu, X., Li, J., Yuan, D., & Ning, X. (2020). Multifunctional composite membrane based on BaTiO<sub>3</sub>@PU/PSA nanofibers for high-efficiency PM<sub>2.5</sub> removal. *J Hazard Mater*, 391, 122254. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122254
- Zhou, L., Chen, W., Wu, H., Shen, A., Yuan, Z., & Yang, L. (2019). Investigation on the relationship of droplet atomization performance and fine particle abatement during the chemical agglomeration process. *Fuel*, 245, 65-77.  
doi:10.1016/j.fuel.2019.02.033
- Zhu, J., Shang, J., & Zhu, T. (2020). A new understanding of the microstructure of soot particles: The reduced graphene oxide-like skeleton and its visible-light driven formation of reactive oxygen species. *Environ Pollut*, 116079.  
doi:10.1016/j.envpol.2020.116079
- โสภิตา ท่วมมี. (2550). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตแผ่นพลาสติกแผ่น โดยการใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมพลาสติก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาอุตสาหกรรมบัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- จันทร์ ทงคำภา. (2562). สารลดแรงตึงผิว และการประยุกต์ใช้ด้านเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์. (2562). สมการอนุรักษ์ในกลศาสตร์ของไหล. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, 18, 135-156.
- ฉันทบุรณ์ ฉาวรรณ. (2560). การศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกตันแบบ 2 มิติด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขา



วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีปีที่ 12, 1, 38-50.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2559). พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลุ่ม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาวรรณ คำหาญ. (2560). ผู้ล่องในบรรยากาศ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริภัทร อินทร์ตระกูล, ทรรศนีย์ พุกกาสิทธิ์, & นรุตตม์ สหนาวิน. (2563). ระดับความเข้มข้นตามแนวตั้งของผู้ล่องขนาดเล็กในรอบวัน บริเวณอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 19, 513-520.

สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. (2559). คู่มือการปฏิบัติงานเพื่อการตรวจประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร สำหรับเจ้าหน้าที่. นนทบุรี: สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ภาคผนวก ก

ผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้น และความแตกต่างของ PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบการแพร่กระจายของ PM<sub>2.5</sub> ภายในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 23 ปริมาณความเข้มข้น และความแตกต่างของ PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบการแพร่กระจายของ PM<sub>2.5</sub> ภายในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดเป็นเวลา 30 นาที

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	%ความ แตกต่าง	Inlet	Outlet	%ความ แตกต่าง	Inlet	Outlet	%ความ แตกต่าง
นาทีที่ 0	12	21	42.9	23	44	47.7	17	20	15.0
นาทีที่ 1	30	43	30.2	43	50	14.0	24	28	14.3
นาทีที่ 2	36	65	44.6	68	77	11.7	33	32	3.0
นาทีที่ 3	57	81	29.6	98	95	3.1	53	44	17.0
นาทีที่ 4	79	94	16.0	93	120	22.5	80	88	9.1
นาทีที่ 5	102	106	3.8	110	137	19.7	114	113	0.9
นาทีที่ 6	114	115	0.9	131	144	9.0	134	138	2.9
นาทีที่ 7	145	143	1.4	148	157	5.7	150	145	3.3
นาทีที่ 8	167	161	3.6	157	170	7.6	162	155	4.3
นาทีที่ 9	178	172	3.4	188	190	1.1	180	186	3.2
นาทีที่ 10	182	187	2.7	199	191	4.0	194	192	1.0
นาทีที่ 11	181	180	0.6	197	193	2.0	197	192	2.5
นาทีที่ 12	189	185	2.1	198	197	0.5	202	201	0.5
นาทีที่ 13	185	182	1.6	202	199	1.5	204	198	2.9
นาทีที่ 14	190	185	2.6	202	200	1.0	200	199	0.5
นาทีที่ 15	185	186	0.5	210	204	2.9	210	209	0.5
นาทีที่ 16	181	188	3.7	211	209	0.9	218	213	2.3
นาทีที่ 17	186	187	0.5	223	220	1.3	221	228	3.1
นาทีที่ 18	190	185	2.6	238	236	0.8	230	237	3.0
นาทีที่ 19	192	188	2.1	218	207	5.0	212	210	0.9
นาทีที่ 20	213	202	5.2	234	222	5.1	239	239	0.0
นาทีที่ 21	227	209	7.9	230	225	2.2	244	258	5.4
นาทีที่ 22	251	248	1.2	227	221	2.6	252	259	2.7
นาทีที่ 23	260	265	1.9	249	223	10.4	267	254	4.9
นาทีที่ 24	279	296	5.7	299	303	1.3	317	324	2.2
นาทีที่ 25	318	286	10.1	305	321	5.0	375	433	13.4
นาทีที่ 26	319	271	15.0	322	288	10.6	393	371	5.6
นาทีที่ 27	326	265	18.7	307	266	13.4	380	314	17.4
นาทีที่ 28	293	248	15.4	286	261	8.7	373	301	19.3
นาทีที่ 29	286	235	17.8	274	244	10.9	355	284	20.0
นาทีที่ 30	264	240	9.1	249	228	8.4	331	287	13.3

## ภาคผนวก ข

ค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้น และร้อยละความแตกต่างของ PM<sub>2.5</sub> ชุดควบคุมการทดลองทั้งหมด  
(30 ชุด) ในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด

ตารางที่ 24 ค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้น และร้อยละความแตกต่างของ PM<sub>2.5</sub> จากชุดควบคุมการทดลอง

ชุดควบคุมการทดสอบ	PM <sub>2.5</sub> ขาเข้า (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> ขาออก (µg/m <sup>3</sup> )	%ความแตกต่าง
ชุดที่ 1	244.8 ± 26.4	240.2 ± 26.3	1.9 ± 0.7
ชุดที่ 2	196 ± 19.3	193 ± 17.3	1.5 ± 1
ชุดที่ 3	169.6 ± 3.2	167 ± 2.9	1.5 ± 0.7
ชุดที่ 4	192.8 ± 21.3	185.6 ± 16.3	3.5 ± 2.2
ชุดที่ 5	280.4 ± 23.4	271.8 ± 19.7	3 ± 1.3
ชุดที่ 6	254.4 ± 34.7	229.2 ± 31.9	2 ± 1.4
ชุดที่ 7	234 ± 34.7	229.2 ± 33.9	2.1 ± 2
ชุดที่ 8	318.2 ± 30.3	302.8 ± 32.3	4.9 ± 1.7
ชุดที่ 9	250.8 ± 26.7	243.2 ± 21.3	2.9 ± 2.2
ชุดที่ 10	366 ± 12.7	359.2 ± 14.3	1.9 ± 0.6
ชุดที่ 11	265 ± 13	254 ± 9.1	4.1 ± 2
ชุดที่ 12	392 ± 31.8	382.8 ± 31.9	2.4 ± 0.7
ชุดที่ 13	229.2 ± 20.5	224 ± 19.9	2.3 ± 0.7
ชุดที่ 14	311.6 ± 30.3	302.6 ± 24.4	2.8 ± 1.9
ชุดที่ 15	371 ± 29.7	368.4 ± 27.2	1 ± 0.6
ชุดที่ 16	368.6 ± 32.6	355.4 ± 28.5	3.5 ± 1.8
ชุดที่ 17	411 ± 32.4	406.2 ± 35.8	1.2 ± 0.9
ชุดที่ 18	327 ± 24.4	317.8 ± 16.3	3.5 ± 1.8
ชุดที่ 19	364 ± 25.8	353 ± 25	3 ± 0.5
ชุดที่ 20	330 ± 31.2	323.4 ± 25.2	1.9 ± 1.9
ชุดที่ 21	178.6 ± 20.9	171.4 ± 19	4 ± 2
ชุดที่ 22	335.2 ± 34.1	325.4 ± 31.6	2.9 ± 0.8
ชุดที่ 23	363.6 ± 23.2	355 ± 17.6	2.3 ± 1.4
ชุดที่ 24	366.2 ± 28.8	358.8 ± 27.3	2 ± 0.9
ชุดที่ 25	353.6 ± 23.3	343.6 ± 21.1	2.8 ± 2
ชุดที่ 26	333.8 ± 33.5	328.8 ± 29.7	1.4 ± 1.2
ชุดที่ 27	349.4 ± 20.3	341 ± 23.5	2.4 ± 1.8
ชุดที่ 28	202.6 ± 4.9	199.8 ± 6.1	1.4 ± 1.2
ชุดที่ 29	201.8 ± 5.1	198.6 ± 4	1.6 ± 0.9
ชุดที่ 30	203.8 ± 15.5	201.2 ± 13	1.2 ± 1.4

## ภาคผนวก ค

ผลการตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนและระหว่างการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด  
PM<sub>2.5</sub>

ตารางที่ 25 ความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนและระหว่างการทดสอบ

ปัจจัยการทดสอบ	การทดสอบ ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%)		ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ (°C)	
		ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ	ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	32	31.6	64	69.2
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa	2	31.8	31.6	67.4	69.2
จำนวน 1 หัวฉีด	3	31.9	31.6	64.6	68
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	31.3	32.3	71.5	77.5
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa	2	N/A	N/A	N/A	N/A
จำนวน 2 หัวฉีด	3	N/A	N/A	N/A	N/A
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	32.6	32.4	65.1	71.8
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa	2	32.8	32.5	62.8	71.1
จำนวน 3 หัวฉีด	3	33.4	32.7	64.4	73.1
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	N/A	N/A	N/A	N/A
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa	2	31.3	31	69.08	76.8
จำนวน 1 หัวฉีด	3	32	31.4	67.8	75.1
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	32.2	31.4	68.6	77.4
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa	2	31.8	31.2	66.6	76.2
จำนวน 2 หัวฉีด	3	31.4	31	69.4	77.2
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	33.3	33	53.8	56.1
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa	2	32.5	32	65.7	76.2
จำนวน 3 หัวฉีด	3	32.6	32	65.6	76.6
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	30.4	30.1	71.7	78.2
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	30.8	30.3	67.6	76.6
จำนวน 1 หัวฉีด	3	31.4	30.6	65.8	74.9
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	28.9	28.6	71.2	81.1
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	29	28.6	70.4	80.7
จำนวน 2 หัวฉีด	3	28.9	28.4	71.6	81.7
หัวฉีดขนาด 0.1 mm.	1	32.1	31.7	68.5	79.3
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	32.3	31.7	68.1	79.7
จำนวน 3 หัวฉีด	3	32.7	32.3	57.9	71.4
หัวฉีดขนาด 0.3 mm.	1	29.2	29	68.6	74.1
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa	2	29.2	29.1	68.6	74.4
จำนวน 1 หัวฉีด	3	29.5	29.2	68.4	75.3
หัวฉีดขนาด 0.3 mm.	1	N/A	N/A	N/A	N/A
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa	2	N/A	N/A	N/A	N/A
จำนวน 2 หัวฉีด	3	31.1	31	73.3	80.1

ตารางที่ 25 (ต่อ) ความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนและระหว่างการทดสอบ

ปัจจัยการทดสอบ	การทดสอบ ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%)		ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ (°C)	
		ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ	ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa จำนวน 3 หัวฉีด	1	33.4	32.6	66.3	76.3
	2	33.2	32.5	64.5	75.3
	3	32.6	32.1	65.9	75.3
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa จำนวน 1 หัวฉีด	1	31.3	30.9	71.9	78.2
	2	31.9	31.3	72	78.3
	3	31.6	31	70.1	77.1
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa จำนวน 2 หัวฉีด	1	30.1	30.7	82.6	83.2
	2	30.2	30	70.7	77.5
	3	N/A	N/A	N/A	N/A
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa จำนวน 3 หัวฉีด	1	32.6	32.3	71.3	81.5
	2	34	33.1	66.6	79.7
	3	32.5	32.1	73.7	83.7
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa จำนวน 1 หัวฉีด	1	31.1	30.5	70.8	76.7
	2	30.5	30.2	73.4	83.2
	3	31.4	30.7	68.3	79.3
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa จำนวน 2 หัวฉีด	1	30.8	30.6	79	84
	2	31.8	31.7	62.8	72.9
	3	31.5	31.1	66.2	77.6
หัวฉีดขนาด 0.3 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa จำนวน 3 หัวฉีด	1	33.8	33.3	63.6	78.6
	2	32.2	31.6	69.6	82.1
	3	32.3	31.7	68.9	81.5
หัวฉีดขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa จำนวน 1 หัวฉีด	1	30.3	29.4	66.6	75
	2	28.7	28.2	75.5	80
	3	28.3	28.2	72.4	78.2
หัวฉีดขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa จำนวน 2 หัวฉีด	1	31	30.8	76.7	80.7
	2	31	30.7	73.7	79.8
	3	31.4	30.9	73.9	79.9
หัวฉีดขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.2 MPa จำนวน 3 หัวฉีด	1	33.6	32.5	66.6	76.8
	2	32.1	31.9	66.8	73.5
	3	32.3	32	65.2	73.4
หัวฉีดขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa จำนวน 1 หัวฉีด	1	31.5	31.4	68.9	72
	2	31.8	31.5	66.2	70.4
	3	31.9	31.6	64.5	69.5
หัวฉีดขนาด 0.6 mm. ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa จำนวน 2 หัวฉีด	1	30.7	30.3	68.7	80.5
	2	31.2	30.8	68.1	71.9
	3	30.6	30.2	70.4	81.4

ตารางที่ 25 (ต่อ) ความชื้นและอุณหภูมิช่วงก่อนและระหว่างการทดสอบ

ปัจจัยการทดสอบ	การทดสอบ ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%)		ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ (°C)	
		ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ	ก่อนทดสอบ	ระหว่างทดสอบ
หัวฉีดขนาด 0.6 mm.	1	32.4	31.8	64.8	74.9
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.3 MPa	2	N/A	N/A	N/A	N/A
จำนวน 3 หัวฉีด	3	32.6	32	67.2	81.2
หัวฉีดขนาด 0.6 mm.	1	31.7	31.2	69	80
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	31.3	30.7	68.1	81.8
จำนวน 1 หัวฉีด	3	31.6	30.8	69.2	82.5
หัวฉีดขนาด 0.6 mm.	1	30.4	29.8	74	85.7
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	30.2	29.5	75.6	86.7
จำนวน 2 หัวฉีด	3	30.7	29.8	73.3	85.9
หัวฉีดขนาด 0.6 mm.	1	32.4	31.8	70.4	84.1
ที่แรงดันฉีดพ่น 0.4 MPa	2	33.4	32.4	67.5	82.7
จำนวน 3 หัวฉีด	3	32.4	31.9	64.6	82.2



## ภาคผนวก ง

ผลการตรวจวัดความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> แบบอ่านค่าทันทีของทดสอบการฉีดพ่นละอองน้ำเพื่อลด PM<sub>2.5</sub>

ตารางที่ 26 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วยหัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	7	5	28.57	15	14	6.67	26	21	19.23
นาทิตี่ 1	14	24	-71.43	32	36	-12.50	25	39	-56.00
นาทิตี่ 2	41	48	-17.07	40	44	-10.00	58	60	-3.45
นาทิตี่ 3	57	65	-14.04	85	85	0.00	49	43	12.24
นาทิตี่ 4	87	77	11.49	110	111	-0.91	90	97	-7.78
นาทิตี่ 5	98	96	2.04	118	122	-3.39	116	110	5.17
นาทิตี่ 6	105	115	-9.52	138	136	1.45	132	124	6.06
นาทิตี่ 7	132	134	-1.52	154	147	4.55	150	140	6.67
นาทิตี่ 8	157	147	6.37	161	155	3.73	164	154	6.10
นาทิตี่ 9	159	150	5.66	184	173	5.98	182	169	7.14
นาทิตี่ 10	184	173	5.98	197	187	5.08	196	186	5.10
นาทิตี่ 11	209	195	6.70	209	194	7.18	223	210	5.83
นาทิตี่ 12	232	214	7.76	218	207	5.05	240	226	5.83
นาทิตี่ 13	252	237	5.95	252	235	6.75	271	254	6.27
นาทิตี่ 14	269	252	6.32	260	242	6.92	285	267	6.32
นาทิตี่ 15	281	261	7.12	275	261	5.09	298	279	6.38



ตารางที่ 27 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	12	13	-8.33	10	10	0.00	12	12	0.00
นาทิตี่ 1	20	22	-10.00	12	19	-58.33	20	14	30.00
นาทิตี่ 2	42	34	19.05	48	49	-2.08	47	60	-27.66
นาทิตี่ 3	78	63	19.23	72	78	-8.33	70	84	-20.00
นาทิตี่ 4	101	95	5.94	88	100	-13.64	78	91	-16.67
นาทิตี่ 5	124	116	6.45	115	114	0.87	100	104	-4.00
นาทิตี่ 6	139	132	5.04	130	128	1.54	118	115	2.54
นาทิตี่ 7	149	146	2.01	144	140	2.78	133	126	5.26
นาทิตี่ 8	158	153	3.16	167	160	4.19	147	137	6.80
นาทิตี่ 9	170	165	2.94	187	180	3.74	156	147	5.77
นาทิตี่ 10	186	177	4.84	207	194	6.28	170	167	1.76
นาทิตี่ 11	189	181	4.23	223	214	4.04	179	167	6.70
นาทิตี่ 12	201	188	6.47	238	219	7.98	200	187	6.50
นาทิตี่ 13	214	198	7.48	255	232	9.02	212	195	8.02
นาทิตี่ 14	226	204	9.73	269	245	8.92	220	206	6.36
นาทิตี่ 15	234	216	7.69	282	259	8.16	236	217	8.05

ตารางที่ 28 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	13	15	-15.38	4	4	0.00	6	5	16.67
นาที่ที่ 1	27	28	-3.70	12	13	-8.33	51	55	-7.84
นาที่ที่ 2	45	55	-22.22	30	38	-26.67	71	74	-4.23
นาที่ที่ 3	69	77	-11.59	55	53	3.64	75	78	-4.00
นาที่ที่ 4	94	103	-9.57	74	75	-1.35	90	100	-11.11
นาที่ที่ 5	111	103	7.21	102	81	20.59	116	113	2.59
นาที่ที่ 6	130	118	9.23	114	105	7.89	139	126	9.35
นาที่ที่ 7	142	133	6.34	132	123	6.82	155	142	8.39
นาที่ที่ 8	166	155	6.63	152	141	7.24	172	160	6.98
นาที่ที่ 9	186	173	6.99	160	152	5.00	187	172	8.02
นาที่ที่ 10	196	182	7.14	179	168	6.15	198	184	7.07
นาที่ที่ 11	224	204	8.93	195	178	8.72	211	192	9.00
นาที่ที่ 12	237	220	7.17	217	200	7.83	228	208	8.77
นาที่ที่ 13	257	236	8.17	231	216	6.49	237	219	7.59
นาที่ที่ 14	273	244	10.62	247	224	9.31	253	230	9.09
นาที่ที่ 15	291	266	8.59	256	233	8.98	266	241	9.40

ตารางที่ 29 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	15	13	13.33	14	15	-7.14	9	12	-33.33
นาที่ที่ 1	33	38	-15.15	31	36	-16.13	27	31	-14.81
นาที่ที่ 2	46	53	-15.22	46	47	-2.17	53	58	-9.43
นาที่ที่ 3	68	72	-5.88	66	70	-6.06	72	77	-6.94
นาที่ที่ 4	94	95	-1.06	91	93	-2.20	87	100	-14.94
นาที่ที่ 5	114	112	1.75	114	114	0.00	107	111	-3.74
นาที่ที่ 6	135	124	8.15	135	124	8.15	117	123	-5.13
นาที่ที่ 7	147	145	1.36	150	137	8.67	138	127	7.97
นาที่ที่ 8	170	152	10.59	164	144	12.20	148	141	4.73
นาที่ที่ 9	185	178	3.78	180	164	8.89	169	157	7.10
นาที่ที่ 10	214	198	7.48	195	182	6.67	184	170	7.61
นาที่ที่ 11	231	207	10.39	209	193	7.66	203	185	8.87
นาที่ที่ 12	245	220	10.20	225	208	7.56	218	197	9.63
นาที่ที่ 13	263	237	9.89	243	213	12.35	241	215	10.79
นาที่ที่ 14	270	238	11.85	259	225	13.13	250	219	12.40
นาที่ที่ 15	282	251	10.99	263	232	11.79	258	227	12.02

ตารางที่ 30 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	12	13	-8.33	12	17	-41.67	11	12	-9.09
นาทิตี่ 1	33	43	-30.30	30	35	-16.67	20	33	-65.00
นาทิตี่ 2	68	69	-1.47	72	84	-16.67	63	72	-14.29
นาทิตี่ 3	88	95	-7.95	93	103	-10.75	82	84	-2.44
นาทิตี่ 4	105	109	-3.81	106	114	-7.55	103	111	-7.77
นาทิตี่ 5	114	119	-4.39	125	124	0.80	122	126	-3.28
นาทิตี่ 6	133	127	4.51	140	141	-0.71	138	133	3.62
นาทิตี่ 7	152	140	7.89	156	148	5.13	152	142	6.58
นาทิตี่ 8	161	157	2.48	170	154	9.41	165	160	3.03
นาทิตี่ 9	178	170	4.49	185	172	7.03	181	173	4.42
นาทิตี่ 10	196	182	7.14	198	187	5.56	195	184	5.64
นาทิตี่ 11	217	196	9.68	211	190	9.95	205	186	9.27
นาทิตี่ 12	225	203	9.78	220	197	10.45	220	195	11.36
นาทิตี่ 13	233	214	8.15	230	210	8.70	227	204	10.13
นาทิตี่ 14	245	221	9.80	249	222	10.84	236	213	9.75
นาทิตี่ 15	252	220	12.70	256	230	10.16	245	220	10.20

ตารางที่ 31 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	8	7	12.50	15	16	-6.67	6	6	0.00
นาทิตี่ 1	75	82	-9.33	90	119	-32.22	81	90	-11.11
นาทิตี่ 2	119	123	-3.36	129	146	-13.18	113	122	-7.96
นาทิตี่ 3	123	150	-21.95	165	149	9.70	139	140	-0.72
นาทิตี่ 4	148	151	-2.03	214	188	12.15	158	163	-3.16
นาทิตี่ 5	184	172	6.52	246	219	10.98	191	177	7.33
นาทิตี่ 6	222	190	14.41	285	259	9.12	228	209	8.33
นาทิตี่ 7	241	221	8.30	312	280	10.26	247	228	7.69
นาทิตี่ 8	277	244	11.91	336	302	10.12	276	252	8.70
นาทิตี่ 9	297	270	9.09	343	317	7.58	297	274	7.74
นาทิตี่ 10	309	281	9.06	369	332	10.03	313	290	7.35
นาทิตี่ 11	329	295	10.33	381	341	10.50	336	302	10.12
นาทิตี่ 12	347	310	10.66	395	358	9.37	351	317	9.69
นาทิตี่ 13	358	321	10.34	411	368	10.46	363	329	9.37
นาทิตี่ 14	373	335	10.19	415	375	9.64	377	332	11.94
นาทิตี่ 15	383	347	9.40	428	382	10.75	376	337	10.37

ตารางที่ 32 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	28	30	-7.14	31	28	9.68	27	24	11.11
นาที่ที่ 1	67	73	-8.96	55	70	-27.27	34	36	-5.88
นาที่ที่ 2	96	95	1.04	80	92	-15.00	79	92	-16.46
นาที่ที่ 3	129	133	-3.10	112	112	0.00	109	114	-4.59
นาที่ที่ 4	149	140	6.04	131	132	-0.76	131	131	0.00
นาที่ที่ 5	178	160	10.11	155	147	5.16	151	150	0.66
นาที่ที่ 6	189	178	5.82	174	169	2.87	175	168	4.00
นาที่ที่ 7	212	196	7.55	189	187	1.06	191	184	3.66
นาที่ที่ 8	231	218	5.63	209	196	6.22	216	201	6.94
นาที่ที่ 9	244	220	9.84	237	208	12.24	234	223	4.70
นาที่ที่ 10	257	241	6.23	241	223	7.47	247	233	5.67
นาที่ที่ 11	275	241	12.36	258	233	9.69	269	249	7.43
นาที่ที่ 12	286	256	10.49	276	241	12.68	277	253	8.66
นาที่ที่ 13	299	265	11.37	279	250	10.39	299	262	12.37
นาที่ที่ 14	305	278	8.85	295	266	9.83	301	267	11.30
นาที่ที่ 15	328	281	14.33	299	265	11.37	315	274	13.02

ตารางที่ 33 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	20	23	-15.00	28	30	-7.14	23	22	4.35
นาทิตี่ 1	62	68	-9.68	73	85	-16.44	70	88	-25.71
นาทิตี่ 2	111	122	-9.91	127	132	-3.94	138	145	-5.07
นาทิตี่ 3	166	181	-9.04	165	199	-20.61	197	208	-5.58
นาทิตี่ 4	216	245	-13.43	213	222	-4.23	261	274	-4.98
นาทิตี่ 5	267	277	-3.75	286	298	-4.20	302	311	-2.98
นาทิตี่ 6	292	301	-3.08	321	318	0.93	340	343	-0.88
นาทิตี่ 7	328	315	3.96	353	335	5.10	366	348	4.92
นาทิตี่ 8	353	329	6.80	369	357	3.25	391	375	4.09
นาทิตี่ 9	368	336	8.70	387	372	3.88	403	383	4.96
นาทิตี่ 10	379	345	8.97	415	387	6.75	424	380	10.38
นาทิตี่ 11	386	357	7.51	426	390	8.45	435	390	10.34
นาทิตี่ 12	402	366	8.96	447	408	8.72	446	396	11.21
นาทิตี่ 13	415	370	10.84	456	412	9.65	449	406	9.58
นาทิตี่ 14	426	379	11.03	471	414	12.10	454	407	10.35
นาทิตี่ 15	436	383	12.16	468	415	11.32	463	417	9.94

ตารางที่ 34 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.1 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาฬิกาที่ 0	24	25	-4.17	7	6	14.29	10	15	-50.00
นาฬิกาที่ 1	61	71	-16.39	35	100	-185.71	50	108	-116.00
นาฬิกาที่ 2	124	152	-22.58	87	120	-37.93	99	159	-60.61
นาฬิกาที่ 3	173	172	0.58	128	137	-7.03	154	179	-16.23
นาฬิกาที่ 4	207	215	-3.86	162	150	7.41	194	200	-3.09
นาฬิกาที่ 5	231	208	9.96	186	200	-7.53	226	232	-2.65
นาฬิกาที่ 6	258	251	2.71	228	224	1.75	261	248	4.98
นาฬิกาที่ 7	288	287	0.35	245	239	2.45	293	269	8.19
นาฬิกาที่ 8	315	292	7.30	282	259	8.16	308	300	2.60
นาฬิกาที่ 9	327	312	4.59	306	290	5.23	334	307	8.08
นาฬิกาที่ 10	354	324	8.47	328	310	5.49	364	324	10.99
นาฬิกาที่ 11	366	332	9.29	351	318	9.40	374	332	11.23
นาฬิกาที่ 12	389	341	12.34	366	325	11.20	383	346	9.66
นาฬิกาที่ 13	391	353	9.72	383	346	9.66	400	359	10.25
นาฬิกาที่ 14	412	370	10.19	403	361	10.42	418	375	10.29
นาฬิกาที่ 15	425	380	10.59	424	379	10.61	426	380	10.80



ตารางที่ 35 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	9	10	-11.11	14	14	0.00	9	8	11.11
นาทิตี่ 1	20	30	-50.00	28	35	-25.00	15	12	20.00
นาทิตี่ 2	37	43	-16.22	53	62	-16.98	37	43	-16.22
นาทิตี่ 3	58	65	-12.07	72	88	-22.22	54	59	-9.26
นาทิตี่ 4	78	83	-6.41	96	110	-14.58	71	74	-4.23
นาทิตี่ 5	93	95	-2.15	119	122	-2.52	88	93	-5.68
นาทิตี่ 6	110	108	1.82	141	139	1.42	101	98	2.97
นาทิตี่ 7	127	125	1.57	166	157	5.42	125	119	4.80
นาทิตี่ 8	140	134	4.29	179	173	3.35	142	134	5.63
นาทิตี่ 9	152	145	4.61	206	197	4.37	158	147	6.96
นาทิตี่ 10	169	158	6.51	233	214	8.15	172	160	6.98
นาทิตี่ 11	184	172	6.52	261	242	7.28	194	178	8.25
นาทิตี่ 12	207	190	8.21	276	253	8.33	204	190	6.86
นาทิตี่ 13	217	195	10.14	285	268	5.96	231	214	7.36
นาทิตี่ 14	243	220	9.47	309	278	10.03	245	223	8.98
นาทิตี่ 15	256	232	9.38	328	289	11.89	256	230	10.16

ตารางที่ 36 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	2	2	0.00	5	5	0.00	7	6	14.29
นาที่ที่ 1	26	33	-26.92	12	17	-41.67	21	58	-176.19
นาที่ที่ 2	64	77	-20.31	39	47	-20.51	52	96	-84.62
นาที่ที่ 3	119	124	-4.20	63	68	-7.94	80	109	-36.25
นาที่ที่ 4	153	164	-7.19	77	79	-2.60	103	116	-12.62
นาที่ที่ 5	182	202	-10.99	97	113	-16.49	119	131	-10.08
นาที่ที่ 6	223	235	-5.38	110	122	-10.91	141	144	-2.13
นาที่ที่ 7	233	241	-3.43	126	131	-3.97	153	157	-2.61
นาที่ที่ 8	251	250	0.40	137	134	2.19	171	173	-1.17
นาที่ที่ 9	261	250	4.21	147	140	4.76	183	184	-0.55
นาที่ที่ 10	273	262	4.03	156	150	3.85	198	189	4.55
นาที่ที่ 11	288	270	6.25	165	157	4.85	209	198	5.26
นาที่ที่ 12	303	288	4.95	174	161	7.47	224	212	5.36
นาที่ที่ 13	307	291	5.21	191	180	5.76	236	224	5.08
นาที่ที่ 14	321	297	7.48	196	183	6.63	247	231	6.48
นาที่ที่ 15	331	309	6.65	211	197	6.64	257	235	8.56

ตารางที่ 37 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	4	3	25.00	5	4	20.00	6	5	16.67
นาทิตี่ 1	12	25	-108.33	24	32	-33.33	21	25	-19.05
นาทิตี่ 2	31	34	-9.68	43	55	-27.91	64	75	-17.19
นาทิตี่ 3	55	53	3.64	55	65	-18.18	68	72	-5.88
นาทิตี่ 4	78	84	-7.69	80	82	-2.50	90	104	-15.56
นาทิตี่ 5	101	107	-5.94	97	97	0.00	114	104	8.77
นาทิตี่ 6	124	119	4.03	114	104	8.77	132	129	2.27
นาทิตี่ 7	136	133	2.21	134	126	5.97	156	143	8.33
นาทิตี่ 8	155	147	5.16	145	134	7.59	164	157	4.27
นาทิตี่ 9	172	161	6.40	161	151	6.21	183	173	5.46
นาทิตี่ 10	191	179	6.28	176	165	6.25	199	192	3.52
นาทิตี่ 11	203	190	6.40	193	183	5.18	217	202	6.91
นาทิตี่ 12	226	210	7.08	209	192	8.13	234	217	7.26
นาทิตี่ 13	241	221	8.30	226	208	7.96	248	226	8.87
นาทิตี่ 14	254	233	8.27	235	215	8.51	259	241	6.95
นาทิตี่ 15	265	244	7.92	255	233	8.63	278	256	7.91

ตารางที่ 38 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	13	17	-30.77	13	15	-15.38	12	10	16.67
นาที่ที่ 1	51	60	-17.65	30	40	-33.33	23	24	-4.35
นาที่ที่ 2	72	78	-8.33	55	59	-7.27	52	57	-9.62
นาที่ที่ 3	93	102	-9.68	86	99	-15.12	85	89	-4.71
นาที่ที่ 4	116	118	-1.72	104	113	-8.65	110	102	7.27
นาที่ที่ 5	145	139	4.14	137	140	-2.19	135	125	7.41
นาที่ที่ 6	160	148	7.50	154	149	3.25	138	144	-4.35
นาที่ที่ 7	181	164	9.39	188	159	15.43	181	159	12.15
นาที่ที่ 8	194	179	7.73	200	189	5.50	200	181	9.50
นาที่ที่ 9	209	194	7.18	222	195	12.16	221	199	9.95
นาที่ที่ 10	227	208	8.37	235	209	11.06	228	206	9.65
นาที่ที่ 11	250	217	13.20	265	221	16.60	254	220	13.39
นาที่ที่ 12	266	229	13.91	275	237	13.82	270	232	14.07
นาที่ที่ 13	270	233	13.70	280	243	13.21	295	251	14.92
นาที่ที่ 14	289	242	16.26	300	255	15.00	307	265	13.68
นาที่ที่ 15	302	263	12.91	297	263	11.45	318	271	14.78

ตารางที่ 39 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	8	7	12.50	10	8	20.00	3	3	0.00
นาทิตี่ 1	17	22	-29.41	43	60	-39.53	24	36	-50.00
นาทิตี่ 2	66	69	-4.55	119	142	-19.33	99	107	-8.08
นาทิตี่ 3	124	148	-19.35	166	187	-12.65	171	190	-11.11
นาทิตี่ 4	158	171	-8.23	216	230	-6.48	241	237	1.66
นาทิตี่ 5	188	197	-4.79	252	259	-2.78	276	275	0.36
นาทิตี่ 6	214	213	0.47	288	273	5.21	319	307	3.76
นาทิตี่ 7	235	234	0.43	317	295	6.94	351	320	8.83
นาทิตี่ 8	253	238	5.93	334	310	7.19	368	337	8.42
นาทิตี่ 9	271	253	6.64	355	325	8.45	382	339	11.26
นาทิตี่ 10	285	263	7.72	374	333	10.96	392	349	10.97
นาทิตี่ 11	295	275	6.78	388	342	11.86	402	356	11.44
นาทิตี่ 12	314	281	10.51	405	355	12.35	408	362	11.27
นาทิตี่ 13	322	294	8.70	415	358	13.73	412	374	9.22
นาทิตี่ 14	340	303	10.88	416	362	12.98	426	371	12.91
นาทิตี่ 15	350	302	13.71	418	361	13.64	430	378	12.09

ตารางที่ 40 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	8	4	50.00	4	3	25.00	9	7	22.22
นาทิตี่ 1	31	37	-19.35	26	40	-53.85	36	39	-8.33
นาทิตี่ 2	56	60	-7.14	59	62	-5.08	64	63	1.56
นาทิตี่ 3	84	82	2.38	89	83	6.74	96	89	7.29
นาทิตี่ 4	114	102	10.53	117	100	14.53	120	116	3.33
นาทิตี่ 5	147	120	18.37	140	123	12.14	157	130	17.20
นาทิตี่ 6	166	142	14.46	168	141	16.07	183	149	18.58
นาทิตี่ 7	184	162	11.96	192	160	16.67	206	178	13.59
นาทิตี่ 8	205	183	10.73	213	182	14.55	227	195	14.10
นาทิตี่ 9	228	196	14.04	234	202	13.68	251	219	12.75
นาทิตี่ 10	248	214	13.71	257	212	17.51	269	235	12.64
นาทิตี่ 11	262	225	14.12	265	225	15.09	287	251	12.54
นาทิตี่ 12	285	243	14.74	285	246	13.68	304	261	14.14
นาทิตี่ 13	296	253	14.53	297	257	13.47	318	270	15.09
นาทิตี่ 14	304	266	12.50	310	257	17.10	330	276	16.36
นาทิตี่ 15	312	264	15.38	320	279	12.81	341	291	14.66

ตารางที่ 41 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	28	24	14.29	29	27	6.90	30	35	-16.67
นาทิตี่ 1	69	80	-15.94	76	73	3.95	79	90	-13.92
นาทิตี่ 2	129	119	7.75	122	98	19.67	119	113	5.04
นาทิตี่ 3	170	151	11.18	152	131	13.82	157	143	8.92
นาทิตี่ 4	197	172	12.69	177	154	12.99	186	171	8.06
นาทิตี่ 5	241	204	15.35	206	182	11.65	219	196	10.50
นาทิตี่ 6	268	225	16.04	225	199	11.56	238	209	12.18
นาทิตี่ 7	291	246	15.46	254	219	13.78	260	228	12.31
นาทิตี่ 8	320	262	18.13	274	238	13.14	279	244	12.54
นาทิตี่ 9	341	279	18.18	290	256	11.72	295	257	12.88
นาทิตี่ 10	367	298	18.80	306	271	11.44	311	275	11.58
นาทิตี่ 11	385	321	16.62	322	281	12.73	340	285	16.18
นาทิตี่ 12	399	332	16.79	336	287	14.58	343	290	15.45
นาทิตี่ 13	429	351	18.18	342	281	17.84	362	301	16.85
นาทิตี่ 14	447	366	18.12	351	288	17.95	367	314	14.44
นาทิตี่ 15	448	367	18.08	368	305	17.12	391	320	18.16

ตารางที่ 42 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	12	11	8.33	17	42	-147.06	9	8	11.11
นาที่ที่ 1	48	52	-8.33	90	121	-34.44	27	51	-88.89
นาที่ที่ 2	115	148	-28.70	151	186	-23.18	96	117	-21.88
นาที่ที่ 3	168	210	-25.00	211	228	-8.06	161	182	-13.04
นาที่ที่ 4	238	244	-2.52	272	254	6.62	218	229	-5.05
นาที่ที่ 5	283	268	5.30	315	275	12.70	271	247	8.86
นาที่ที่ 6	322	284	11.80	338	290	14.20	314	277	11.78
นาที่ที่ 7	344	299	13.08	358	308	13.97	339	292	13.86
นาที่ที่ 8	364	308	15.38	379	311	17.94	358	311	13.13
นาที่ที่ 9	376	320	14.89	397	319	19.65	375	304	18.93
นาที่ที่ 10	395	335	15.19	402	331	17.66	399	330	17.29
นาที่ที่ 11	413	340	17.68	412	346	16.02	410	332	19.02
นาที่ที่ 12	415	357	13.98	427	359	15.93	427	349	18.27
นาที่ที่ 13	434	365	15.90	440	372	15.45	430	353	17.91
นาที่ที่ 14	445	370	16.85	458	364	20.52	445	359	19.33
นาที่ที่ 15	456	370	18.86	464	377	18.75	453	380	16.11



ตารางที่ 43 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.3 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาฬิกาที่ 0	9	9	0.00	6	7	-16.67	5	4	20.00
นาฬิกาที่ 1	27	37	-37.04	76	93	-22.37	86	150	-74.42
นาฬิกาที่ 2	88	98	-11.36	129	129	0.00	141	166	-17.73
นาฬิกาที่ 3	144	140	2.78	170	172	-1.18	191	197	-3.14
นาฬิกาที่ 4	183	182	0.55	215	216	-0.47	234	236	-0.85
นาฬิกาที่ 5	230	214	6.96	252	236	6.35	277	261	5.78
นาฬิกาที่ 6	271	251	7.38	287	246	14.29	312	286	8.33
นาฬิกาที่ 7	306	274	10.46	316	276	12.66	342	314	8.19
นาฬิกาที่ 8	339	291	14.16	343	321	6.41	375	335	10.67
นาฬิกาที่ 9	378	328	13.23	374	317	15.24	402	354	11.94
นาฬิกาที่ 10	396	342	13.64	389	351	9.77	426	369	13.38
นาฬิกาที่ 11	416	348	16.35	413	353	14.53	457	378	17.29
นาฬิกาที่ 12	445	368	17.30	434	365	15.90	470	388	17.45
นาฬิกาที่ 13	459	384	16.34	456	375	17.76	491	393	19.96
นาฬิกาที่ 14	470	396	15.74	465	388	16.56	494	418	15.38
นาฬิกาที่ 15	490	402	17.96	488	403	17.42	517	431	16.63

ตารางที่ 44 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	10	17	-70.00	15	14	6.67	17	15	11.76
นาที่ที่ 1	38	47	-23.68	21	44	-109.52	25	27	-8.00
นาที่ที่ 2	45	52	-15.56	48	57	-18.75	57	65	-14.04
นาที่ที่ 3	73	82	-12.33	61	67	-9.84	67	79	-17.91
นาที่ที่ 4	102	107	-4.90	92	99	-7.61	94	99	-5.32
นาที่ที่ 5	127	126	0.79	112	117	-4.46	113	109	3.54
นาที่ที่ 6	141	140	0.71	135	126	6.67	128	123	3.91
นาที่ที่ 7	163	152	6.75	149	148	0.67	145	139	4.14
นาที่ที่ 8	178	170	4.49	174	175	-0.57	154	148	3.90
นาที่ที่ 9	194	185	4.64	195	179	8.21	171	167	2.34
นาที่ที่ 10	218	207	5.05	213	194	8.92	192	180	6.25
นาที่ที่ 11	236	217	8.05	232	209	9.91	206	190	7.77
นาที่ที่ 12	256	233	8.98	247	228	7.69	232	207	10.78
นาที่ที่ 13	275	254	7.64	263	243	7.60	247	222	10.12
นาที่ที่ 14	289	264	8.65	276	245	11.23	262	240	8.40
นาที่ที่ 15	301	267	11.30	296	265	10.47	273	250	8.42

ตารางที่ 45 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	19	25	-31.58	16	16	0.00	15	16	-6.67
นาทิตี่ 1	47	68	-44.68	22	36	-63.64	37	36	2.70
นาทิตี่ 2	87	92	-5.75	62	79	-27.42	81	88	-8.64
นาทิตี่ 3	129	132	-2.33	98	119	-21.43	111	103	7.21
นาทิตี่ 4	159	167	-5.03	132	129	2.27	143	130	9.09
นาทิตี่ 5	183	225	-22.95	159	139	12.58	172	164	4.65
นาทิตี่ 6	227	240	-5.73	191	165	13.61	201	187	6.97
นาทิตี่ 7	250	247	1.20	217	209	3.69	235	222	5.53
นาทิตี่ 8	285	269	5.61	247	240	2.83	257	241	6.23
นาทิตี่ 9	301	288	4.32	277	255	7.94	280	255	8.93
นาทิตี่ 10	328	301	8.23	293	265	9.56	312	283	9.29
นาทิตี่ 11	351	319	9.12	311	281	9.65	330	297	10.00
นาทิตี่ 12	368	333	9.51	336	301	10.42	348	312	10.34
นาทิตี่ 13	388	341	12.11	346	310	10.40	366	329	10.11
นาทิตี่ 14	401	364	9.23	365	326	10.68	378	337	10.85
นาทิตี่ 15	424	381	10.14	376	338	10.11	395	352	10.89

ตารางที่ 46 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.2 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาฬิกาที่ 0	8	5	37.50	5	4	20.00	9	5	44.44
นาฬิกาที่ 1	30	36	-20.00	26	78	-200.00	28	23	17.86
นาฬิกาที่ 2	89	110	-23.60	65	95	-46.15	81	106	-30.86
นาฬิกาที่ 3	117	120	-2.56	102	108	-5.88	109	101	7.34
นาฬิกาที่ 4	141	140	0.71	130	124	4.62	150	155	-3.33
นาฬิกาที่ 5	170	175	-2.94	157	151	3.82	174	173	0.57
นาฬิกาที่ 6	194	190	2.06	186	180	3.23	199	195	2.01
นาฬิกาที่ 7	214	203	5.14	201	195	2.99	225	211	6.22
นาฬิกาที่ 8	246	231	6.10	219	210	4.11	248	242	2.42
นาฬิกาที่ 9	268	253	5.60	242	234	3.31	273	258	5.49
นาฬิกาที่ 10	290	276	4.83	272	252	7.35	296	285	3.72
นาฬิกาที่ 11	311	290	6.75	300	274	8.67	314	288	8.28
นาฬิกาที่ 12	333	301	9.61	319	293	8.15	329	303	7.90
นาฬิกาที่ 13	351	328	6.55	334	308	7.78	345	316	8.41
นาฬิกาที่ 14	368	332	9.78	352	322	8.52	359	322	10.31
นาฬิกาที่ 15	388	364	6.19	367	338	7.90	370	340	8.11

ตารางที่ 47 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	20	21	-5.00	15	19	-26.67	12	19	-58.33
นาทิตี่ 1	45	39	13.33	33	46	-39.39	68	82	-20.59
นาทิตี่ 2	59	58	1.69	61	61	0.00	83	96	-15.66
นาทิตี่ 3	68	75	-10.29	71	68	4.23	101	121	-19.80
นาทิตี่ 4	95	103	-8.42	90	95	-5.56	135	140	-3.70
นาทิตี่ 5	119	109	8.40	100	101	-1.00	161	168	-4.35
นาทิตี่ 6	135	125	7.41	126	116	7.94	205	185	9.76
นาทิตี่ 7	165	143	13.33	143	128	10.49	219	193	11.87
นาทิตี่ 8	166	153	7.83	153	137	10.46	252	235	6.75
นาทิตี่ 9	184	182	1.09	186	156	16.13	277	254	8.30
นาทิตี่ 10	210	189	10.00	197	179	9.14	285	266	6.67
นาทิตี่ 11	227	205	9.69	214	198	7.48	325	296	8.92
นาทิตี่ 12	240	218	9.17	233	211	9.44	342	311	9.06
นาทิตี่ 13	252	227	9.92	246	220	10.57	356	311	12.64
นาทิตี่ 14	275	245	10.91	261	224	14.18	365	333	8.77
นาทิตี่ 15	289	255	11.76	271	241	11.07	393	347	11.70

ตารางที่ 48 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	7	7	0.00	10	14	-40.00	9	11	-22.22
นาที่ที่ 1	35	57	-62.86	49	89	-81.63	50	71	-42.00
นาที่ที่ 2	81	97	-19.75	100	137	-37.00	88	99	-12.50
นาที่ที่ 3	119	130	-9.24	149	175	-17.45	117	122	-4.27
นาที่ที่ 4	152	161	-5.92	200	207	-3.50	140	139	0.71
นาที่ที่ 5	190	187	1.58	242	246	-1.65	166	155	6.63
นาที่ที่ 6	226	217	3.98	284	269	5.28	189	178	5.82
นาที่ที่ 7	260	246	5.38	314	289	7.96	209	194	7.18
นาที่ที่ 8	285	267	6.32	345	312	9.57	233	215	7.73
นาที่ที่ 9	312	290	7.05	370	339	8.38	252	223	11.51
นาที่ที่ 10	342	315	7.89	394	360	8.63	264	237	10.23
นาที่ที่ 11	355	320	9.86	413	372	9.93	286	255	10.84
นาที่ที่ 12	381	342	10.24	432	381	11.81	299	266	11.04
นาที่ที่ 13	403	357	11.41	464	411	11.42	321	287	10.59
นาที่ที่ 14	421	370	12.11	472	422	10.59	327	287	12.23
นาที่ที่ 15	442	393	11.09	490	431	12.04	346	299	13.58

ตารางที่ 49 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.3 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	3	3	0.00	4	5	-25.00	8	8	0.00
นาที่ที่ 1	25	33	-32.00	43	46	-6.98	40	10	75.00
นาที่ที่ 2	56	59	-5.36	84	89	-5.95	91	91	0.00
นาที่ที่ 3	103	110	-6.80	125	122	2.40	127	121	4.72
นาที่ที่ 4	139	121	12.95	157	141	10.19	163	156	4.29
นาที่ที่ 5	172	163	5.23	197	166	15.74	202	182	9.90
นาที่ที่ 6	212	200	5.66	224	197	12.05	233	210	9.87
นาที่ที่ 7	240	221	7.92	252	216	14.29	257	240	6.61
นาที่ที่ 8	270	245	9.26	267	243	8.99	285	262	8.07
นาที่ที่ 9	297	266	10.44	294	264	10.20	313	284	9.27
นาที่ที่ 10	324	303	6.48	321	280	12.77	335	301	10.15
นาที่ที่ 11	354	317	10.45	334	293	12.28	351	317	9.69
นาที่ที่ 12	374	334	10.70	346	307	11.27	374	327	12.57
นาที่ที่ 13	393	351	10.69	358	317	11.45	389	354	9.00
นาที่ที่ 14	412	362	12.14	376	335	10.90	411	368	10.46
นาที่ที่ 15	426	380	10.80	389	343	11.83	426	383	10.09

ตารางที่ 50 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 1 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	23	19	17.39	19	18	5.26	16	19	-18.75
นาทิตี่ 1	41	37	9.76	69	56	18.84	106	57	46.23
นาทิตี่ 2	139	106	23.74	147	113	23.13	160	113	29.38
นาทิตี่ 3	201	134	33.33	211	166	21.33	216	146	32.41
นาทิตี่ 4	239	173	27.62	266	205	22.93	260	192	26.15
นาทิตี่ 5	267	214	19.85	314	248	21.02	303	233	23.10
นาทิตี่ 6	327	246	24.77	343	268	21.87	353	274	22.38
นาทิตี่ 7	360	263	26.94	373	304	18.50	376	297	21.01
นาทิตี่ 8	404	304	24.75	415	321	22.65	418	344	17.70
นาทิตี่ 9	415	314	24.34	459	358	22.00	443	357	19.41
นาทิตี่ 10	421	340	19.24	470	365	22.34	471	383	18.68
นาทิตี่ 11	445	356	20.00	466	366	21.46	490	391	20.20
นาทิตี่ 12	484	364	24.79	516	402	22.09	506	408	19.37
นาทิตี่ 13	498	371	25.50	531	419	21.09	523	403	22.94
นาทิตี่ 14	517	395	23.60	533	422	20.83	566	445	21.38
นาทิตี่ 15	523	397	24.09	555	438	21.08	568	448	21.13



ตารางที่ 51 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 2 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	22	21	4.55	20	19	5.00	29	33	-13.79
นาทิตี่ 1	89	91	-2.25	61	69	-13.11	77	73	5.19
นาทิตี่ 2	133	120	9.77	112	84	25.00	119	96	19.33
นาทิตี่ 3	183	158	13.66	168	131	22.02	161	129	19.88
นาทิตี่ 4	223	179	19.73	221	171	22.62	204	155	24.02
นาทิตี่ 5	254	212	16.54	260	204	21.54	243	186	23.46
นาทิตี่ 6	299	246	17.73	287	246	14.29	280	210	25.00
นาทิตี่ 7	332	265	20.18	321	263	18.07	306	249	18.63
นาทิตี่ 8	353	293	17.00	356	289	18.82	337	299	11.28
นาทิตี่ 9	386	317	17.88	367	329	10.35	361	303	16.07
นาทิตี่ 10	390	330	15.38	408	340	16.67	388	331	14.69
นาทิตี่ 11	425	336	20.94	432	341	21.06	418	336	19.62
นาทิตี่ 12	435	340	21.84	438	352	19.63	447	363	18.79
นาทิตี่ 13	454	372	18.06	445	361	18.88	451	365	19.07
นาทิตี่ 14	466	374	19.74	472	382	19.07	467	373	20.13
นาทิตี่ 15	470	388	17.45	479	384	19.83	472	383	18.86

ตารางที่ 52 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่นละอองน้ำด้วย หัวฉีดพ่นขนาด 0.6 มิลลิเมตร ที่ระดับแรงดันฉีดพ่น 0.4 เมกะปาสคาล จำนวน 3 หัวฉีด

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	6	5	16.67	9	8	11.11	6	5	16.67
นาที่ที่ 1	38	45	-18.42	9	7	22.22	20	15	25.00
นาที่ที่ 2	110	97	11.82	45	41	8.89	72	66	8.33
นาที่ที่ 3	160	141	11.88	89	93	-4.49	133	121	9.02
นาที่ที่ 4	210	173	17.62	144	127	11.81	177	156	11.86
นาที่ที่ 5	249	217	12.85	182	164	9.89	230	198	13.91
นาที่ที่ 6	285	241	15.44	237	192	18.99	277	238	14.08
นาที่ที่ 7	323	260	19.50	278	221	20.50	309	259	16.18
นาที่ที่ 8	345	286	17.10	320	253	20.94	335	283	15.52
นาที่ที่ 9	380	308	18.95	350	278	20.57	359	310	13.65
นาที่ที่ 10	392	320	18.37	361	300	16.90	389	310	20.31
นาที่ที่ 11	419	342	18.38	395	317	19.75	405	330	18.52
นาที่ที่ 12	429	342	20.28	416	338	18.75	424	338	20.28
นาที่ที่ 13	447	361	19.24	438	353	19.41	442	348	21.27
นาที่ที่ 14	456	370	18.86	468	365	22.01	450	365	18.89
นาที่ที่ 15	480	379	21.04	486	381	21.60	472	386	18.22

## ภาคผนวก จ

ผลการตรวจวัดความเข้มข้น PM<sub>2.5</sub> แบบอ่านค่าทันทีของทดสอบการฉีดพ่นสารลดแรงตึงผิวเพื่อ  
ลด PM<sub>2.5</sub>

ตารางที่ 53 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Tween-80 ที่  
ความเข้มข้น 1% w/v

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาทิตี่ 0	86	89	-3.49	70	72	-2.86	50	40	20.00
นาทิตี่ 1	139	141	-1.44	141	112	20.57	42	37	11.90
นาทิตี่ 2	171	158	7.60	149	127	14.77	113	85	24.78
นาทิตี่ 3	204	169	17.16	203	178	12.32	157	103	34.39
นาทิตี่ 4	227	191	15.86	289	200	30.80	165	135	18.18
นาทิตี่ 5	239	200	16.32	294	231	21.43	246	175	28.86
นาทิตี่ 6	264	204	22.73	300	244	18.67	289	202	30.10
นาทิตี่ 7	275	218	20.73	311	253	18.65	296	224	24.32
นาทิตี่ 8	278	230	17.27	313	253	19.17	307	240	21.82
นาทิตี่ 9	294	233	20.75	328	256	21.95	315	249	20.95
นาทิตี่ 10	300	237	21.00	326	256	21.47	323	254	21.36
นาทิตี่ 11	310	240	22.58	336	261	22.32	333	250	24.92
นาทิตี่ 12	314	241	23.25	348	272	21.84	342	257	24.85
นาทิตี่ 13	314	243	22.61	354	270	23.73	346	259	25.14
นาทิตี่ 14	318	241	24.21	354	272	23.16	342	262	23.39
นาทิตี่ 15	324	252	22.22	353	269	23.80	341	253	25.81

ตารางที่ 54 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Linear alkyl benzene sulfonate ที่ความเข้มข้น 1% w/v

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	45	42	6.67	19	16	15.79	55	53	3.64
นาที่ที่ 1	92	83	9.78	52	51	1.92	82	70	14.63
นาที่ที่ 2	99	101	-2.02	74	72	2.70	102	91	10.78
นาที่ที่ 3	123	122	0.81	94	92	2.13	117	106	9.40
นาที่ที่ 4	140	141	-0.71	127	117	7.87	130	120	7.69
นาที่ที่ 5	158	156	1.27	141	139	1.42	141	136	3.55
นาที่ที่ 6	171	165	3.51	163	162	0.61	151	147	2.65
นาที่ที่ 7	180	169	6.11	185	178	3.78	164	163	0.61
นาที่ที่ 8	194	180	7.22	204	194	4.90	175	168	4.00
นาที่ที่ 9	200	188	6.00	212	197	7.08	179	170	5.03
นาที่ที่ 10	202	189	6.44	221	205	7.24	189	178	5.82
นาที่ที่ 11	211	193	8.53	236	216	8.47	198	179	9.60
นาที่ที่ 12	209	194	7.18	245	224	8.57	203	187	7.88
นาที่ที่ 13	218	202	7.34	241	223	7.47	207	191	7.73
นาที่ที่ 14	223	198	11.21	249	229	8.03	213	197	7.51
นาที่ที่ 15	223	203	8.97	251	230	8.37	214	190	11.21

ตารางที่ 55 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Benzalkonium chloride ที่ความเข้มข้น 1% w/v

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	36	30	16.67	40	33	17.50	65	64	1.54
นาที่ที่ 1	77	81	-5.19	91	87	4.40	113	113	0.00
นาที่ที่ 2	119	125	-5.04	141	138	2.13	148	148	0.00
นาที่ที่ 3	156	146	6.41	170	172	-1.18	180	185	-2.78
นาที่ที่ 4	183	182	0.55	204	213	-4.41	212	227	-7.08
นาที่ที่ 5	219	202	7.76	237	230	2.95	244	247	-1.23
นาที่ที่ 6	242	232	4.13	254	242	4.72	271	261	3.69
นาที่ที่ 7	255	231	9.41	274	265	3.28	289	280	3.11
นาที่ที่ 8	264	246	6.82	292	275	5.82	299	288	3.68
นาที่ที่ 9	270	255	5.56	298	276	7.38	308	289	6.17
นาที่ที่ 10	289	264	8.65	304	281	7.57	316	293	7.28
นาที่ที่ 11	290	262	9.66	312	288	7.69	321	294	8.41
นาที่ที่ 12	300	274	8.67	324	291	10.19	330	296	10.30
นาที่ที่ 13	303	280	7.59	330	297	10.00	330	303	8.18
นาที่ที่ 14	311	279	10.29	333	305	8.41	333	306	8.11
นาที่ที่ 15	313	281	10.22	339	304	10.32	329	302	8.21

ตารางที่ 56 ความเข้มข้น และประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> จากการทดสอบฉีดพ่น Cocamidopropyl betaine ที่ความเข้มข้น 1% w/v

ระยะเวลา ของการ ทดสอบ	ปริมาณความเข้มข้น PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )								
	การทดสอบครั้งที่ 1			การทดสอบครั้งที่ 2			การทดสอบครั้งที่ 3		
	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)	Inlet	Outlet	ประสิทธิภาพ (%)
นาที่ที่ 0	35	37	-5.71	32	28	12.50	44	39	11.36
นาที่ที่ 1	68	64	5.88	73	60	17.81	73	76	-4.11
นาที่ที่ 2	93	84	9.68	97	78	19.59	127	97	23.62
นาที่ที่ 3	117	104	11.11	109	96	11.93	124	111	10.48
นาที่ที่ 4	130	128	1.54	135	115	14.81	136	127	6.62
นาที่ที่ 5	144	132	8.33	151	132	12.58	159	137	13.84
นาที่ที่ 6	164	147	10.37	168	144	14.29	172	155	9.88
นาที่ที่ 7	178	171	3.93	179	155	13.41	190	159	16.32
นาที่ที่ 8	192	175	8.85	191	170	10.99	199	175	12.06
นาที่ที่ 9	207	183	11.59	202	177	12.38	209	186	11.00
นาที่ที่ 10	222	192	13.51	215	182	15.35	225	194	13.78
นาที่ที่ 11	225	198	12.00	219	189	13.70	231	200	13.42
นาที่ที่ 12	235	208	11.49	214	191	10.75	229	208	9.17
นาที่ที่ 13	241	211	12.45	227	197	13.22	244	219	10.25
นาที่ที่ 14	246	218	11.38	230	203	11.74	258	224	13.18
นาที่ที่ 15	254	222	12.60	232	204	12.07	264	224	15.15

**ภาคผนวก ฉ**  
**ผลการควบคุมคุณภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักในการชั่งน้ำหนักกระตาศกรอง**

ตารางที่ 57 ผลการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 และ 200 มิลลิกรัม

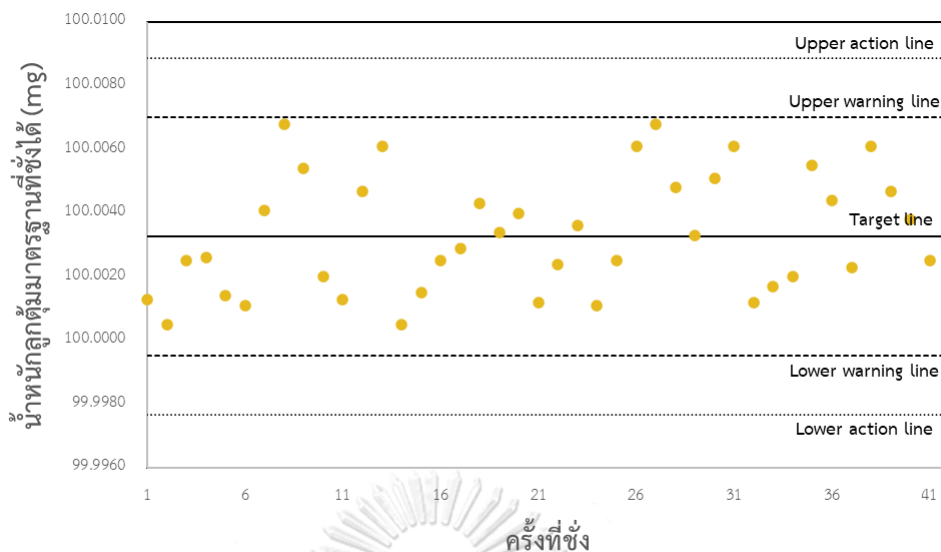
การชั่งครั้งที่	ลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 100 mg (mg)	ลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 200 mg (mg)
1	100.0013	200.0433
2	100.0005	200.0241
3	100.0025	200.0167
4	100.0026	200.0111
5	100.0014	200.0147
6	100.0011	200.0169
7	100.0041	200.0254
8	100.0068	200.0313
9	100.0054	200.0221
10	100.002	200.0145
11	100.0013	200.0133
12	100.0047	200.0331
13	100.0061	200.0165
14	100.0005	200.0271
15	100.0015	200.0215
16	100.0025	200.0124
17	100.0029	200.0319
18	100.0043	200.014
19	100.0034	200.0248
20	100.004	200.0351
21	100.0012	200.0217
22	100.0024	200.0224
23	100.0036	200.0141
24	100.0011	200.0163
25	100.0025	200.0211
26	100.0061	200.0124
27	100.0068	200.0331
28	100.0048	200.0147
29	100.0033	200.0215
30	100.0051	200.0144
31	100.0061	200.0336

ตารางที่ 57 (ต่อ) ผลการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 และ 200 มิลลิกรัม

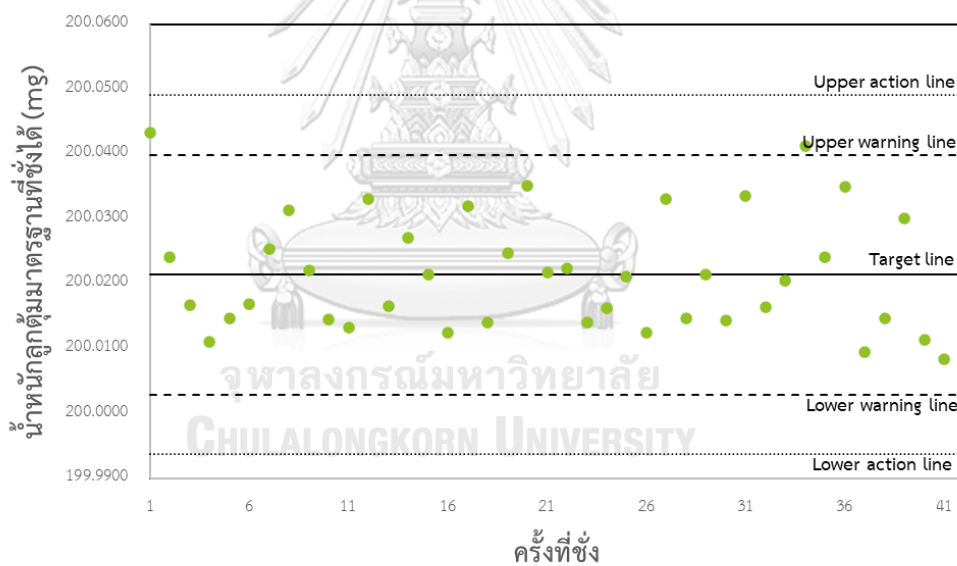
การชั่งครั้งที่	ลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 100 mg	ลูกตุ้มมาตรฐานขนาด 200 mg
32	100.0012	200.0164
33	100.0017	200.0205
34	100.002	200.0412
35	100.0055	200.0241
36	100.0044	200.035
37	100.0023	200.0094
38	100.0061	200.0147
39	100.0047	200.0301
40	100.0038	200.0114
41	100.0025	200.0084
42	100.0012	200.0216

จากผลการสร้างแผนภูมิควบคุมชีวฮาร์ท (shewhart control chart) ดังภาพที่ 61 และ 62 พบว่าค่า Target line ( $\mu$ ), Warning line ( $\mu \pm 2SD$ ) และ Action line ( $\mu \pm 3SD$ ) ของการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 มิลลิกรัม เท่ากับ  $100.0033 \pm 0.0019$ ,  $100.0033 \pm 0.0037$  และ  $100.0033 \pm 0.0056$  ตามลำดับ และค่า Target line ( $\mu$ ), Warning line ( $\mu \pm 2SD$ ) และ Action line ( $\mu \pm 3SD$ ) ของการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 200 มิลลิกรัม เท่ากับ  $200.0216 \pm 0.0089$ ,  $200.0216 \pm 0.0178$  และ  $200.0216 \pm 0.0266$  โดยผลการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 100 มิลลิกรัม เป็นจำนวน 42 ครั้ง โดยค่าน้ำหนักจากการชั่งมีค่าอยู่ในช่วง Warning line ( $\mu \pm 2SD$ ) และ Action line ( $\mu \pm 3SD$ ) ทั้งหมดทุกครั้ง สำหรับผลการชั่งน้ำหนักลูกตุ้มมาตรฐาน 200 มิลลิกรัม จำนวน 42 ครั้ง มีค่าอยู่ในช่วง Warning line ( $\mu \pm 2SD$ ) จำนวน 40 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 95.24 และค่าน้ำหนักจากการชั่งทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง Action line ( $\mu \pm 3SD$ ) ซึ่งจากผลการควบคุมการชั่งน้ำหนักกระตาศกรองดังกล่าว พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากช่วง Warning line และ Action line มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 แสดงให้เห็นว่าคุณภาพการชั่งน้ำหนักกระตาศกรองที่นำไปใช้ในการเก็บตัวอย่าง  $PM_{2.5}$  ในครั้งนี้มีความแม่นยำ





ภาพที่ 62 Control chart แสดงผลการซั่งน้ำหนักกลุกตุ้มมาตรฐาน 100 มิลลิกรัม



ภาพที่ 63 Control chart แสดงผลการซั่งน้ำหนักกลุกตุ้มมาตรฐาน 200 มิลลิกรัม

## ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์อัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลว

ตารางที่ 58 ค่าอัตราการไหลของน้ำในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ

ขนาดหัวฉีด/แรงดันฉีดพ่น	จำนวน 1 หัวฉีด	จำนวน 2 หัวฉีด	จำนวน 3 หัวฉีด
0.1 mm. 0.2 MPa	$1.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$2.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$4 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
0.1 mm. 0.3 MPa	$1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$4.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
0.1 mm. 0.4 MPa	$1.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$3.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
0.3 mm. 0.2 MPa	$3.83 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$7.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
0.3 mm. 0.3 MPa	$4.83 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$9.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.45 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
0.3 mm. 0.4 MPa	$5.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
0.6 mm. 0.2 MPa	$4.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$9 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
0.6 mm. 0.3 MPa	$6.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
0.6 mm. 0.4 MPa	$8.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	$1.73 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$2.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

จากค่าอัตราการไหลของน้ำในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำดังตารางที่ 58 และค่าอัตราการไหลของก๊าซหรืออากาศในระบบห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิดตั้งสมการ ก นำมาคำนวณเป็นค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลว (Gas-Liquid Ratio, GLR) ด้วยสมการ 4.1 ได้ค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลวในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ โดยแสดงดังตารางที่ 59

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศในระบบ} &= \text{ความเร็วลมขาเข้า (m/s)} \times \text{พื้นที่ช่องอากาศขาเข้า (m}^2\text{/s)} \\ &= 0.8 \text{ m/s} \times 3.14(0.08^2) = 0.0161 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{สมการ ก} \end{aligned}$$

ตารางที่ 59 อัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซต่อของเหลวในแต่ละรูปแบบวิธีการฉีดพ่นละอองน้ำ

ขนาดหัวฉีด/แรงดันฉีดพ่น	จำนวน 1 หัวฉีด	จำนวน 2 หัวฉีด	จำนวน 3 หัวฉีด
0.1 mm. 0.2 MPa	$1.21 \times 10^5$	$6.04 \times 10^4$	$4.03 \times 10^4$
0.1 mm. 0.3 MPa	$1.07 \times 10^5$	$5.37 \times 10^4$	$3.58 \times 10^4$
0.1 mm. 0.4 MPa	$9.66 \times 10^4$	$4.83 \times 10^4$	$3.22 \times 10^4$
0.3 mm. 0.2 MPa	$4.2 \times 10^4$	$2.1 \times 10^4$	$1.4 \times 10^4$
0.3 mm. 0.3 MPa	$3.33 \times 10^4$	$1.67 \times 10^4$	$1.11 \times 10^4$
0.3 mm. 0.4 MPa	$2.84 \times 10^4$	$1.42 \times 10^4$	$9.47 \times 10^3$
0.6 mm. 0.2 MPa	$3.58 \times 10^4$	$1.79 \times 10^4$	$1.19 \times 10^4$
0.6 mm. 0.3 MPa	$2.41 \times 10^4$	$1.21 \times 10^4$	$8.05 \times 10^3$
0.6 mm. 0.4 MPa	$1.86 \times 10^4$	$9.29 \times 10^3$	$6.19 \times 10^3$

## ภาคผนวก ข

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

ตารางที่ 60 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ระหว่างแรงดันฉีดพ่นแต่ละระดับด้วยสถิติ One-Way ANOVA

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5

LSD

(I) แรงดันฉีดพ่น	(J) แรงดันฉีดพ่น	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0.2 MPa	0.3 MPa	-3.47074 <sup>*</sup>	.73717	.000	-4.9383	-2.0032
	0.4 MPa	-8.01519 <sup>*</sup>	.73717	.000	-9.4828	-6.5476
0.3 MPa	0.2 MPa	3.47074 <sup>*</sup>	.73717	.000	2.0032	4.9383
	0.4 MPa	-4.54444 <sup>*</sup>	.73717	.000	-6.0120	-3.0769
0.4 MPa	0.2 MPa	8.01519 <sup>*</sup>	.73717	.000	6.5476	9.4828
	0.3 MPa	4.54444 <sup>*</sup>	.73717	.000	3.0769	6.0120

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ 61 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ระหว่างการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีดด้วยสถิติ One-Way ANOVA

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5

LSD

(I) จำนวนหัวฉีด	(J) จำนวนหัวฉีด	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1 หัว	2 หัว	.65333	1.16895	.578	-1.6739	2.9805
	3 หัว	.27519	1.16895	.815	-2.0520	2.6024
2 หัว	1 หัว	-.65333	1.16895	.578	-2.9805	1.6739
	3 หัว	-.37815	1.16895	.747	-2.7054	1.9491
3 หัว	1 หัว	-.27519	1.16895	.815	-2.6024	2.0520
	2 หัว	.37815	1.16895	.747	-1.9491	2.7054

ตารางที่ 62 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ระหว่างหัวฉีดพ่นแต่ละขนาดด้วยสถิติ One-Way ANOVA

#### Multiple Comparisons

Dependent Variable: ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5

LSD

(I) ขนาดหัวฉีด	(J) ขนาดหัวฉีด	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
หัวฉีดขนาด 0.1 มม.	หัวฉีดขนาด 0.3 มม.	-3.11630*	1.06958	.005	-5.2457	-.9869
	หัวฉีดขนาด 0.6 มม.	-4.01852*	1.06958	.000	-6.1479	-1.8892
หัวฉีดขนาด 0.3 มม.	หัวฉีดขนาด 0.1 มม.	3.11630*	1.06958	.005	.9869	5.2457
	หัวฉีดขนาด 0.6 มม.	-.90222	1.06958	.402	-3.0316	1.2271
หัวฉีดขนาด 0.6 มม.	หัวฉีดขนาด 0.1 มม.	4.01852*	1.06958	.000	1.8892	6.1479
	หัวฉีดขนาด 0.3 มม.	.90222	1.06958	.402	-1.2271	3.0316

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ตารางที่ 63 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหัวฉีดพ่นแต่ละขนาดด้วยสถิติ Pearson correlation

#### Correlations

		ขนาดหัวฉีด	ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5
ขนาดหัวฉีด	Pearson Correlation	1	.388**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	81	81
ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5	Pearson Correlation	.388**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	81	81

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 64 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีดพ่นแต่ละระดับด้วยสถิติ Pearson correlation

#### Correlations

		ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5	แรงดันฉีดพ่น
ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5	Pearson Correlation	1	.775**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	81	81
แรงดันฉีดพ่น	Pearson Correlation	.775**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	81	81

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ตารางที่ 65 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่ม-ลดจำนวนหัวฉีดด้วยสถิติ Pearson correlation

		ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5	จำนวนหัวฉีด
ประสิทธิภาพในการกำจัด PM2.5	Pearson Correlation	1	-.027
	Sig. (2-tailed)		.814
	N	81	81
จำนวนหัวฉีด	Pearson Correlation	-.027	1
	Sig. (2-tailed)	.814	
	N	81	81

ตารางที่ 66 ผลวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพในการลด PM<sub>2.5</sub> ระหว่างการฉีดพ่นน้ำและสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดด้วยสถิติ One-Way ANOVA

**Multiple Comparisons**

Dependent Variable: efficiency  
LSD

(I) Chemical	(J) Chemical	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
water	Tween-80	-1.6333*	.6716	.035	-3.130	-.137
	Benzalkonium chloride	12.9000*	.6716	.000	11.403	14.397
	Linear alkyl benzene sulfonate	13.4333*	.6716	.000	11.937	14.930
	Cocoamidopropyl betaine	9.8000*	.6716	.000	8.303	11.297
Tween-80	water	1.6333*	.6716	.035	.137	3.130
	Benzalkonium chloride	14.5333*	.6716	.000	13.037	16.030
	Linear alkyl benzene sulfonate	15.0667*	.6716	.000	13.570	16.563
	Cocoamidopropyl betaine	11.4333*	.6716	.000	9.937	12.930
Benzalkonium chloride	water	-12.9000*	.6716	.000	-14.397	-11.403
	Tween-80	-14.5333*	.6716	.000	-16.030	-13.037
	Linear alkyl benzene sulfonate	.5333	.6716	.446	-.963	2.030
	Cocoamidopropyl betaine	-3.1000*	.6716	.001	-4.597	-1.603
Linear alkyl benzene sulfonate	water	-13.4333*	.6716	.000	-14.930	-11.937
	Tween-80	-15.0667*	.6716	.000	-16.563	-13.570
	Benzalkonium chloride	-.5333	.6716	.446	-2.030	.963
	Cocoamidopropyl betaine	-3.6333*	.6716	.000	-5.130	-2.137
Cocoamidopropyl betaine	water	-9.8000*	.6716	.000	-11.297	-8.303
	Tween-80	-11.4333*	.6716	.000	-12.930	-9.937
	Benzalkonium chloride	3.1000*	.6716	.001	1.603	4.597
	Linear alkyl benzene sulfonate	3.6333*	.6716	.000	2.137	5.130

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นพรุจ นาคจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	16 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขานามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	134/224 หมู่บ้านเรือนแก้ววิลล่า ซอยคูบอน 24 แยก 14 ถ.รามอินทรา แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กทม. 10220
ผลงานตีพิมพ์	นพรุจ นาคจันทร์, ทรรศนีย์ พฤกษาสีทธิ์, รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง, สุชาดา สุขหรั่ง และนรุตตม์ สหนาวิน (2564). ปัจจัยส่งเสริมประสิทธิภาพการลดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ด้วยการฉีดพ่นละอองน้ำในห้องทดสอบจำลองแบบกึ่งปิด. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปี ครั้งที่ 33 (23-24 พฤษภาคม 2564) : 76-82.