

แบบจำลองของมลพิษทางอากาศ

AIR POLLUTION MODELLING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AIR POLLUTION MODELLING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2562

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

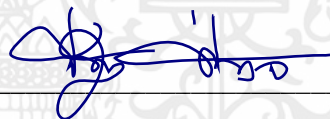
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองมลพิษทางอากาศ

AIR POLLUTION MODELLING

ผู้จัดทำ

1. นาย ณภัทร เจริญธนวุฒิ รหัสประจำตัว 59010381
2. นาย ณภัทร เพิ่มพูล รหัสประจำตัว 59010387
3. นาย ณัฐพล ศรีอ่อน รหัสประจำตัว 59010460



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.บำรุง พ่วงเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของมลพิษทางอากาศ

นายณภัทร	เจริญธนวุฒิ	59010381
----------	-------------	----------

นายณภัทร	เพิ่มพูล	59010387
----------	----------	----------

นายณัฐพล	ศรีอ่อน	59010460
----------	---------	----------

ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปริมาณฝุ่น PM 2.5 ที่เกิดจากการสูบบุหรี่ไฟฟ้าและจำลองการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 ผ่านโปรแกรม Simulation โดยนำเสนอในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบมาเพื่อดูการไหลของอากาศและการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 จากบุหรี่ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังต้องการศึกษาสารในควันบุหรี่ไฟฟ้าว่ามีลำดับการกระจายตัวเป็นอย่างไรเมื่อผ่านไปเวลาหนึ่งในพื้นที่จำกัดที่ผู้วิจัยได้สร้างห้องจำลองขึ้นมา โดยปริมาณฝุ่น PM 2.5 ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องวัดฝุ่น PM 2.5 รุ่น Xiaomi Smart Mi PM 2.5 Monitor และเครื่องตรวจจับ HCHO TVOC PM 1.0 PM 10 Formaldehyde ในการทดสอบและได้นำค่าบางส่วนจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์แล้วมาประกอบการสร้างแบบจำลองเนื่องจากคุณสมบัติบางอย่างของสารนั้นไม่สามารถใช้เครื่องวัดที่ผู้วิจัยมีทดสอบได้ ขั้นตอนของการจำลองคือเริ่มศึกษาเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้โปรแกรม Ansys ในการจำลองสนามการไหลอากาศก่อนจากนั้นจึงเปลี่ยนมาใช้ค่า PM 2.5 จากบุหรี่ไฟฟ้าโดยผลการวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองมลพิษทางอากาศขึ้นมา พบรูปแบบการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 ในรูปแบบที่ไม่แน่นอนแปรผันตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปและพบลำดับการกระจายตัวของสารในบุหรี่ไฟฟ้าที่มีขนาด 2.5 ไมครอน ซึ่งเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายได้ คือ Propylene Glycol (PG), Nicotine และ Glycerol ตามสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ซึ่งทำให้บุคคลทั่วไปหรือบุคคลที่อยู่ใกล้ตัวกับผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าได้ระมัดระวังถึงมลพิษที่เกิดจากบุหรี่ไฟฟ้า

AIR POLLUTION MODELLING

Napat	Jaroentanawut	59010381
-------	---------------	----------

Napat	Permpool	59010387
-------	----------	----------

Nattapon	Srion	59010460
----------	-------	----------

Dr.Bumroong Puangkird	Advisor
-----------------------	---------

Year 2562

Abstract

This research studies the amount of PM 2.5 generated by electric smoking and simulate the distribution of PM 2.5 through simulation program by presenting in a mathematical model designed to show the air flow and distribution of PM 2.5 from electric cigarettes. In addition, this research also studies the substance in the electric cigarette smoke in order to see how the distribution sequence is over a period of time in a confined area that researcher created. To find the amount of PM 2.5, the researchers used a PM 2.5 dust meter. Xiaomi Smart Mi PM 2.5 Monitor model and HCHO TVOC PM 1.0 PM 10 Formaldehyde detector for testing and use some values from the published research to create the model due to the characteristics of A substance that researchers cannot be measured. The simulation procedure is to study the computational flow technique (Computational Fluid Dynamics, CFD) by using Ansys program to simulate the air flow field first and then change to the PM 2.5 value from the electric cigarette with effect. The research presents an air pollution model. The distribution pattern of PM 2.5 dust in an uncertain pattern varies with time. And found that the distribution of substances in e-cigarettes with a size of 2.5 microns, which are substances that can affect the body are Propylene Glycol (PG), Nicotine and Glycerol in proportion by volume (Volume fraction), which makes people or Individuals who are close to electric smokers are careful about the pollution caused by electric cigarettes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ดร.บำรุง พวง-เกิด อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมา

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ในการวิจัยนี้ และต้องขอขอบคุณทางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเพื่อให้ใช้สำนักหอสมุดกลาง สำหรับค้นคว้าหาความรู้ในการวิจัย มา ณ ที่นี้



นายณภัทร เจริญนวุฒิ

นายณภัทร เพิ่มพูล

นายณัฐพล ศรีอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตวิจัยในการศึกษา	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 งานวิจัยและสมการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 รายละเอียดปัญหา	4
2.2 กระบวนการทางกายภาพและการนำเสนอเชิงคณิตศาสตร์	4
2.3 สมการการไหล	7
2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์	7
2.5 สมการการถ่ายเทพลังงานและสิ่งมีชีวิต	7
2.6 สมการการขนส่งอนุภาค	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.7 ความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	15
3.1 การใช้ข้อมูลอินพุตเพื่อสร้างแบบจำลอง	15
3.2 ชุดอุปกรณ์และเครื่องวัด	15
3.2.1 Digital Formaldehyde	15
3.2.2 Xiaomi Smart Mi PM 2.5	16
3.3 Geometry	17
3.4 Mesh	18
3.4.1 Mesh Default	19
3.4.2 Mesh Sizing	20
3.4.3 Mesh Quality	21
3.4.4 Mesh Inflation	21
3.4.5 Mesh Statistics	22
3.5 Setup	24
3.5.1 Setup การทำงาน	24
3.5.2 Setup แต่ละสาร	25
3.5.3 Setup การแสดงผล	26
3.6 การระบุตำแหน่งปริมาณสารสูงสุดและกราฟ	27
3.6.1 การสร้างจุด	27
3.6.2 การสร้าง Steam line	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.6.3 การสร้างกราฟ	31
3.6.3.1 การสร้างกราฟเพื่อระบุตำแหน่งปริมาณสารสูงสุด	31
3.6.3.2 การสร้างกราฟเพื่อหาปริมาณสารสูงสุดในช่วงเวลาที่กำหนด	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	37
4.1 ทดสอบแบบจำลองที่ได้	37
4.2 ดูปริมาณสารชนิดต่าง ๆ	37
4.3 กราฟ	41
4.3.1 กราฟแสดงตำแหน่งของสารชนิดต่าง ๆ ที่มีปริมาณสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา	42
4.3.2 กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของสารชนิดต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด	43
4.4 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่ปริมาณสารสูงสุด	45
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟ	47
4.5.1 การระบุตำแหน่งและปริมาณสารสูงสุดของสารแต่ละชนิด	47
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	49
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
5.2.1 เรื่องการยืมอุปกรณ์วัดฝุ่น PM 2.5 DUSTTRAK II	50
5.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสร้างแบบจำลอง	50
เอกสารอ้างอิง	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงข้อมูล 4 ชุด จากการใช้หรีไฟฟ้า	6
2. สัมประสิทธิ์ในสมการที่ 12 สำหรับสาร 4 ชนิด	6
3. ค่าคงที่ในสมการที่ 13a ของสาร 3 ชนิด	6
4. เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยแบบจำลอง	9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1. แสดงโมเดลเรขาคณิตของงานวิจัย	5
2. กราฟเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองจาก Czogala et al.(2014) กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง	10
3. การกระจายตัวของนิโคตินภายในห้องจำลองในเวลาที่แตกต่างกัน	11
4. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นนิโคตินกับเวลา	13
5. ผลกระทบของการระบายอากาศต่อความเข้มข้นของนิโคตินภายในห้องทดลอง	14
6. Mesh ของห้องโดยสารภายในรถยนต์เมื่อปิดกระจก	14
7. Digital Formaldehyde	15
8. Xiaomi Smart Mi PM 2.5	16
9. สร้างห้องจำลอง	17
10. เจาะรูแบบจำลอง	17
11. ห้องจำลองของการทดลองเสร็จสมบูรณ์	18
12. mesh จากการตั้งค่าตามค่าเริ่มต้น	19
13. ค่าต่าง ๆ ใน Mesh Default	19
14. การตั้งค่า Mesh Sizing	20
15. การตั้งค่า Mesh Quality	21
16. ค่าต่าง ๆ ใน Mesh Inflation	22
17. จำนวน Node และ Element ใน Mesh Statistics	22
18. mesh จากการใช้ inflation	23
19. mesh จากการลองเพิ่มขนาด	23
20. mesh จากการใช้ mesh defeaturing	24
21. หน้าตั้งค่าการคำนวณ	24
22. หน้าการตั้งค่าแต่ละสาร	25
23. แสดงสัดส่วนโดยมวลของสารในน้ำยาบุหรี่ไฟฟ้า	26
24. Volume Fractions ของสาร	26
25. หน้าต่างการ set up จุด	27
26. การกำหนด Geometry แต่ละสาร	28
27. การกำหนดชนิด Variable ที่ต้องการ	29
28. การเพิ่ม Steam line ให้แก่สารที่ต้องการสร้างกราฟ	30
29. การกำหนดจุดเริ่มให้แก่สาร ที่ต้องการสร้าง Steam line	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
30. การเพิ่มกราฟ	32
31. การระบุแกนของกราฟเพื่อหาตำแหน่งของสารที่ต้องการ	33
32. ขั้นตอนการเลือกสารที่ต้องการแสดงปริมาณสูงสุด	34
33. การปรับค่าในแกน X ของสารที่กำหนด	35
34. การปรับค่าในแกน Y ของสารที่กำหนด	36
35. ภาพจำลองการไหลของอากาศ (Steam line)	37
36. การเคลื่อนที่ที่เวลา 0 วินาที	37
37. การเคลื่อนที่ที่เวลา 1 วินาที	38
38. การเคลื่อนที่ที่เวลา 2 วินาที	38
39. การเคลื่อนที่ที่เวลา 3 วินาที	39
40. การเคลื่อนที่ที่เวลา 5 วินาที	39
41. การเคลื่อนที่ที่เวลา 10 วินาที	40
42. การเคลื่อนที่ที่เวลา 30 วินาที	40
43. การเคลื่อนที่ที่เวลา 60 วินาที	41
44. การเคลื่อนที่ที่เวลา 100 วินาที	41
45. กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ PG ในแต่ละช่วงเวลา	42
46. กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ Nicotine ในแต่ละช่วงเวลา	42
47. กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ Glycerol ในแต่ละช่วงเวลา	43
48. กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ PG ในแต่ละช่วงเวลา	43
49. กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ Nicotine ในแต่ละช่วงเวลา	44
50. กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ Glycerol ในแต่ละช่วงเวลา	44
51. แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 5	45
52. แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 10	45
53. แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 30	46
54. แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 60 และ 100	46
55. กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร PG	47
56. กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร Nicotine	47
57. กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร Glycerol	47
58. กราฟแสดงปริมาณของทั้ง 3 สารในแต่ละช่วงเวลา	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมลพิษทางอากาศมีปริมาณสูงกว่าในอดีตและสูงกว่าในระดับปกติ ทำให้อันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ที่อาจเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ฝุ่นละอองจากลมพายุ ไฟไหม้ป่า แผ่นดินไหว หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ มลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรม ท่อไอเสียรถยนต์ การเผาขยะมูลฝอย หรือการระเหยของก๊าซ ซึ่งหน่วยงานของกรมอนามัยและนักวิชาการด้านสิ่งแวดล้อมให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากพบว่าฝุ่นละอองเป็นสาเหตุของปัญหาด้านสุขภาพของประชาชน ทางด้านระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ฝุ่นละอองเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศ ซึ่งเกิดจากวัตถุที่ถูกทุบ ตี บด กระแทก จนแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ แล้วถูกกระแสลมพัดปลิวฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศและตกลงสู่พื้น ฝุ่นสามารถแบ่งโดยใช้ขนาดเป็นเกณฑ์ได้ 2 ส่วน คือ ฝุ่นละอองขนาดใหญ่มีขนาด 100 ไมครอนขึ้นไป ซึ่งเราสามารถมองเห็นฝุ่นขนาด 50 ไมครอนขึ้นไปได้ และฝุ่นละอองขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ซึ่งสามารถเข้าไปในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์และส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ในหลาย ๆ ด้าน

ประเทศไทยประสบปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือ PM 2.5 ที่สูงเกินมาตรฐานในพื้นที่กรุงเทพฯ ฯ ปริมาณ และในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ และคณะกรรมการป้องกันและขจัดมลพิษทางน้ำ ให้ความรู้ว่า ปัญหา PM 2.5 ที่กำลังเผชิญกันอยู่นี้ เกิดจาก 4 สาเหตุ คือ 1. แหล่งกำเนิด 2. สภาพอากาศ 3. สภาพพื้นที่ 4. พื้นที่สีเขียว โดย 1. แหล่งกำเนิดคือ การจราจร การเผาไหม้ในที่โล่ง การอุตสาหกรรม และกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ 2. สภาพอากาศ ที่เรียกกันว่า “สภาพการผกกลับของอุณหภูมิ” (Temperature Inversion) ที่มักเกิดขึ้นในฤดูหนาว ที่ชั้นความเย็นถูกกักอยู่ภายใต้ชั้นความร้อนแปลงสภาพเป็นฝ้าซี กักกันให้ฝุ่นไม่สามารถลอยสูงได้ 3. สภาพพื้นที่ของกรุงเทพฯ ฯ เป็นแอ่งไม่เอื้อต่อการเจือจางมลพิษ ร่วมกับผังเมือง การวางตัว การก่อสร้างทำให้การระบายอากาศในพื้นที่เป็นไปได้ยาก 4. พื้นที่สีเขียวตามองค์การอนามัยโลก (WHO) ระบุให้สัดส่วนพื้นที่สีเขียวต่อประชากร 1 คน คือ 9 ตารางเมตร แต่สำหรับกรุงเทพฯ ฯ แล้ว กลับมีสัดส่วนพื้นที่สีเขียวไม่ถึง 3 ตารางเมตร ต่อประชากร 1 คน น้อยกว่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลกถึง 3 เท่า

ผู้วิจัยสนใจคือ PM 2.5 ในบุหรีไฟฟ้า เนื่องจากในปัจจุบันผู้คนมีทางเลือกในการสูบบุหรีมากขึ้น และที่กำลังได้รับความนิยมคือบุหรีไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยเล็งเห็นอันตรายจากบุหรีไฟฟ้า จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองมลพิษทางอากาศเพื่อให้บุคคลทั่วไปตระหนักถึงมลพิษใกล้ตัวที่เกิดจากการสูบบุหรีผ่านทางแบบจำลอง เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 จากการสูบบุหรี่ไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อจำลองการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 ในเวลาที่แตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อหาดำแหน่งจุดที่มีปริมาณฝุ่น PM 2.5 กระจุกตัวอยู่มากที่สุดเพื่อการติดตั้งเครื่องกรองอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.4 เพื่อหาปริมาณสารสูงสุดที่หลงเหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา ณ ตั้งแต่ได้มีควันแพร่กระจายเข้าไป

1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1 คาดว่าบุหรี่ไฟฟ้าจะเป็นตัวการที่ทำให้เกิด PM 2.5 และเป็นอันตรายต่อร่างกาย
- 1.3.2 รูปแบบการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 มีทิศทางและการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่างเช่น ทิศทางของกระแสลม อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกันออกไป
- 1.3.3 สามารถระบุตำแหน่งของสารในบุหรี่ไฟฟ้าที่มีการกระจุกตัวกันมากที่สุดในแต่ละช่วงเวลา
- 1.3.4 สามารถหาค่าปริมาณสูงสุดของสารแต่ละชนิดในช่วงเวลาที่แตกต่างกันได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 เป็นการศึกษาเชิงการทดลอง
- 1.4.2 ในการทดลองวัดปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขปริมาตรภายในห้องมีขนาดคงที่
- 1.4.3 ใช้ห้องสี่เหลี่ยม มีขนาดความยาว 3.4 เมตร มีขนาดความกว้าง 4.1 เมตร และมีขนาดความสูง 2.8 เมตร ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากทำการทดลองและสร้างแบบจำลองการวัดปริมาณฝุ่น PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้าแล้ว คาดว่าผู้ที่ต้องการจะหลีกเลี่ยงควันบุนทรีย์ไฟฟ้าหรือมลพิษ จะสามารถติดตั้งตำแหน่งของเครื่องกรองอากาศได้อย่างเหมาะสมเพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และมองเห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไปในอนาคต

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1.6.1 เพื่อตอบวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ประเด็นการศึกษาปริมาณฝุ่นละออง PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีขอบเขตจำกัด มีแนวทางดังนี้

1.6.1.1 การศึกษาเอกสาร หนังสือวิชาการ สื่อออนไลน์ เพื่อวิเคราะห์เกี่ยวกับการกระจายตัวของฝุ่นในอากาศ

1.6.1.2 การศึกษาและใช้เครื่องมือวัดฝุ่น PM 2.5 แต่ละชนิด เพื่อความแม่นยำในการทดลอง

1.6.1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้าในพื้นที่จำกัดเพื่อให้เห็นถึงอันตรายจากการดูดบุนทรีย์ไฟฟ้า

1.6.2 เพื่อตอบวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ประเด็นการศึกษาแบบจำลองของฝุ่นละออง PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้าในเวลาที่แตกต่างกัน มีแนวทางดังนี้

1.6.2.1 การศึกษางานวิจัย และเอกสารเกี่ยวกับแหล่งที่มาของบุนทรีย์ไฟฟ้า และการนำไปใช้

1.6.2.2 การศึกษาโปรแกรม Ansys ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้จำลองการกระจายตัวของฝุ่นในอากาศ เพื่อให้การทดลองเห็นภาพมากยิ่งขึ้น

1.6.2.3 การรวบรวมผลลัพธ์จากแบบจำลองปริมาณฝุ่น PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้าในเวลาที่ต่างกัน

1.6.3 รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวัดและค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์แล้ว นำมาสร้างแบบจำลองและนำเสนอข้อมูล ให้เห็นรูปแบบการกระจายตัวและปริมาณของฝุ่น PM 2.5 จากบุนทรีย์ไฟฟ้า

1.6.4 เพื่อตอบวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 ประเด็นการหาตำแหน่งจุดที่มีปริมาณฝุ่น PM 2.5 กระจุกตัวอยู่มากที่สุดเพื่อการติดตั้งเครื่องกรอง อากาศอย่างมีประสิทธิภาพ มีแนวทางดังนี้

1.6.4.1 นำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ไปคำนวณเพื่อหาการระบุตำแหน่ง

1.6.4.2 ทำการพล็อตกราฟและรูป เพื่อให้การนำเสนอเห็นภาพและชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและสมการที่เกี่ยวข้อง

Ali A. Rostami , Samuel Agyemang and Yezdi B. Pithawallaw ได้ศึกษาแบบจำลองคุณภาพอากาศภายในอาคาร ส่วนใหญ่ที่เขียนในรายงานเป็นแบบจำลองแบบ well-mixed model ประเมินการรวมตัวเฉลี่ยของส่วนประกอบที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด มันไม่ได้ให้ข้อมูลว่า (1) สารเคมีที่ปล่อยออกมาเดินทางไปในอวกาศได้ไกลแค่ไหนและเร็วแค่ไหน และ (2) ความเข้มข้นเปลี่ยนไปอย่างไรเมื่อเทียบกับฟังก์ชันระยะทางจากแหล่งกำเนิดการปล่อย เราพัฒนาแบบจำลองการกระจายตัวโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและหลักการทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งใช้กับการกระจายตัวของละอองลอยในพื้นที่ภายในอาคาร รวมถึงการระเหยและการควบแน่นของส่วนประกอบในส่วนผสมของละอองลอยหลายสารประกอบแบบจำลองการกระจายตัวสามารถประมาณความแปรปรวนเชิงพื้นที่และเชิงเวลาของการรวมตัวขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่มีอยู่ในละอองที่ปล่อยออกมาในรูปของไอและเฟสของอนุภาคแยกกันได้ ผลลัพธ์จากแบบจำลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองที่ถูกตีพิมพ์ไปแล้ว และพบว่าได้ผลไปในทางเดียวกันได้ดำเนินการวิเคราะห์ความไวเพื่อประเมินผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อระดับขององค์ประกอบในอากาศที่ปล่อยออกมาภายในพื้นที่ภายในอาคารรวมถึงอัตราการปล่อย , อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเป็นต้นแบบจำลองนี้ยังสามารถใช้ในการประมาณระดับการคว้นบุรีไฟฟ้ามือสองในที่แคบได้อีกด้วย

2.1 รายละเอียดปัญหา

ละอองถูกปล่อยใส่พื้นที่ปิดขนาดตั้งรูปในอัตราที่กำหนดไว้ ละอองที่ปล่อยออกมาเป็นไอของส่วนผสมของส่วนประกอบระเหยหลายอย่างและเฟสของอนุภาคในตัวกลาง ด้วยการกระจายขนาดอนุภาคตามที่กำหนด ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในทั้งสองเฟสก็ได้กำหนดไว้เช่นกัน

ผลลัพธ์จากพื้นที่ปิดทั้งสิ้นนั้นแสดงอยู่ในเอกสารนี้

(1) ห้องที่มีการระบายอากาศที่อัตราแลกเปลี่ยนอากาศที่กำหนดไว้ผ่านทางเข้าและช่องระบายอากาศในสถานที่ที่กำหนดไว้ นอกจากนี้พัดลมหมุนเวียนอากาศนั้นเพิ่มกระบวนการผสมในห้องก็รวมอยู่ด้วย และอัตราการไหลของพัดลมไหลเวียนอากาศสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ (2) พื้นที่ห้องโดยสารของรถยนต์ซีดานทั่วไปซึ่ง (a) หยุดนิ่งโดยปิดหน้าต่างทั้งหมดและเปิดแอร์ และ (b) เดินทางด้วยความเร็วที่กำหนดพร้อมหน้าต่างที่ปรับได้ (3) ห้องทำงานทั่วไปที่มีผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าและ (4) ร้านอาหารทั่วไปที่มีผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้า 5 คน

2.2 กระบวนการทางกายภาพและการนำเสนอเชิงคณิตศาสตร์

เมื่อส่วนผสมของอนุภาคและไอระเหยเข้าสู่อากาศในอาคารในรูปของคว้นบุรีที่หายใจออกมาโดยผู้สูบบุหรี่ไฟฟ้าภายในพื้นที่ภายในอาคาร กระบวนการทางกายภาพและทางอุณหพลศาสตร์จำนวนหนึ่งเกิดผลกระทบกับระดับความเข้มข้นของห้องในแต่ละองค์ประกอบในไอและเฟสของอนุภาค คว้นบุรีถูกผสมและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนส่งทางอากาศ ในเวลาเดียวกันการถ่ายโอนมวลของแต่ละองค์ประกอบระหว่างไอและเฟสของอนุภาคสามารถเกิดขึ้นได้ซึ่งสำหรับแต่ละองค์ประกอบเป็นส่วนสำคัญกับความดันไออิ่มตัวของส่วนประกอบนั้น ที่อนุภาค / อากาศและความดันไอของมันในอากาศ เมื่ออุณหภูมิของควันบุหรี่ที่เข้ามามีค่าเท่ากับกับอุณหภูมิของอากาศในห้อง โดยทั่วไปการถ่ายโอนมวลจากอนุภาคไปยังเฟสของไอ (การระเหย) ในขณะที่ การย้อนกลับ (การควบแน่น) อาจเกิดขึ้นหากอุณหภูมิของควันบุหรี่ที่เข้ามานั้นสูงกว่าหรือความเข้มข้นของไอขององค์ประกอบในห้องสูงกว่าความเข้มข้นของมันบนพื้นผิวของอนุภาคควันบุหรี่ (มีความเกี่ยวข้องกับน้ำในพื้นที่ในร่มที่มีความชื้นสูง) อัตราการถ่ายโอนมวลที่ไม่เท่ากันเนื่องจากความผันผวนที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องขององค์ประกอบและเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

การขนส่งไอในพื้นที่ภายในอาคารควบคุมโดยการแพร่กระจายการพาและการปั่นป่วนกับอากาศ ในทางกลับกันอนุภาคถูกขนส่งโดยแรงที่แตกต่างกันเช่นแรงลาก การเคลื่อนที่แบบBrownian การตกตะกอนและการปะทะ เฟสของไอถือเป็นปริมาณที่ต่อเนื่อง (ความเข้มข้นซึ่งโดยทั่วไปมาจากการแก๊สการการขนส่งสำหรับองค์ประกอบไอแต่ละชนิด) เฟสของอนุภาคนั้นถือว่าเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่องและมีการติดตามตำแหน่งแบบทันทีโดยใช้วิธีการรันจ ในแต่ละขั้นตอนในเวลาและสถานที่อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างสองขั้นตอนถูกคำนวณ และการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของอนุภาค, ขนาดและความเข้มข้นและความเข้มข้นของไอถูกคำนวณใหม่

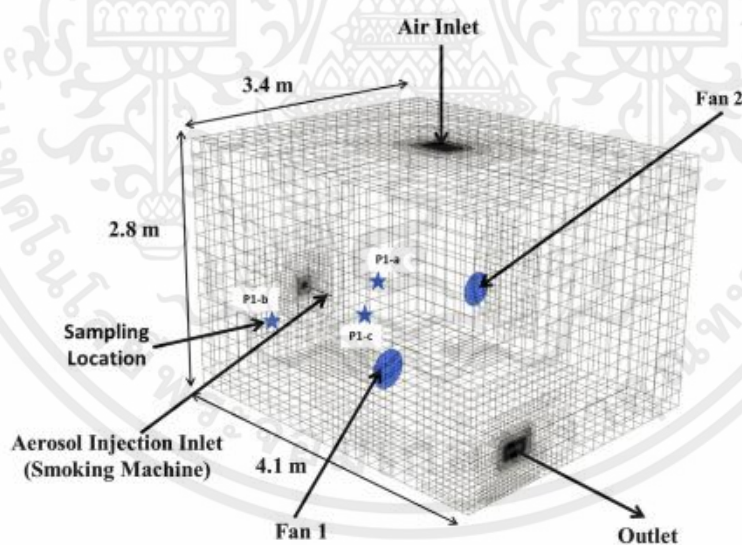


Fig. 1. Estimated geometry/mesh of Czogala et al. (2014) indoor space with designated air inlet, outlet, circulation fans and smoking machine.

รูปที่ 1 แสดงโมเดลเรขาคณิตของงานวิจัย Czogala et al.(2014) ซึ่งมีทั้ง
ช่องขาเข้า,ขาออก,พัดลมปรับอากาศและเครื่องดูดควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1

Input data from four runs using one EVP as described in the text.

Run number ^a	Aerosol release	Ventilation level (ACH)
1	7 puffs	9.86
2	7 puffs	6.81
3	15 puffs	6.83
4	15 puffs	6.80

ACH, air change per hour. Nicotine concentration was 1.8% of EVP's e-liquid (w/w) (Rostami et al., 2016).

^a Run numbers are different from Czogala et al. (2014).

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูล 4 ชุด จากการใช้บุหรี่ไฟฟ้า

Table 2

Coefficients of Eq. (12) for four compounds.

Compound	A _i	B _i	C _i	D _i	E _i
PG	90.293	-6696.8	-28.109	-1.3E-10	9.37E-06
Water	29.8605	-3152.2	-7.3037	2.42E-09	1.81E-06
Glycerol	-62.7929	-3658.5	34.249	-0.05194	2.28E-05
Nicotine	43.745	-4929	-11.561	0	0

PG, propylene glycol.

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์ในสมการที่ 12 สำหรับสาร 4 ชนิด

Table 3

Constants of Eq. (13a) for three compounds.

Compound	G _i	T _c (K)	n
PG	80.7	626	0.295
Water	52.053	647.13	0.321
Glycerol	104.153	723	0.301

PG, propylene glycol.

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ในสมการที่ 13a ของสาร 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการการไหล

ความเข้มข้นของควันทูหรือ (ไอและเฟสของฝุ่นละออง) ในอากาศมีน้อยจึงสันนิษฐานว่าไม่ส่งผลต่อการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของการไหลของอากาศ อากาศถือว่าเป็นไปตามกฎหมายก๊าซอุดมคติโดยมีเพียงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ สนามความเร็วในโดเมนการคำนวณนั้นได้มาจากการแก้สมการต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม 3 มิติพร้อมกับแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ สมการการไหลถูกควบคุมด้วยสมการพลังงาน การระเหย/การควบแน่น จากสูตรอนุภาคเกี่ยวข้องกับความร้อนแฝงของการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งมีสัดส่วนในสมการพลังงาน

2.4 สมการนาเวียร์-สโตกส์

พื้นฐานของการเขียนพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics) หรือ CFD คือ สมการนาเวียร์-สโตกส์ ซึ่งเป็นที่ใช้อย่างกว้างขวาง ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล ประกอบเข้ากับสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหลคือผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัว และเทอมของความดัน ชุดสมการนี้นับได้ว่าเป็นชุดสมการที่มีประโยชน์ต่อวิชาพลศาสตร์ของไหลมากที่สุด เนื่องจากที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพของของไหลได้กว้างขวางที่สุด มันอาจจะใช้เพื่อการจำลองสภาพอากาศ คลื่นทะเล การไหลของของไหลในท่อ การไหลของอากาศผ่านปีกเครื่องบิน หรือการเคลื่อนที่ของดาวในจักรวาล วิเคราะห์ผลกระทบของมลพิษ การนำชุดสมการนี้ร่วมกับการจำลองการไหลของควันทูหรือไฟฟ้าจะทำให้งานมีความแม่นยำสูง แต่รายละเอียดยุ่งยาก จึงเลือกในการคำนวณผ่านคอมพิวเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \right) \vec{v} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \vec{T} + \vec{f}$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น $\frac{\partial}{\partial t}$ คือ อนุพันธ์เทียบกับเวลา \vec{v} คือ ความเร็วของไหล

$\vec{\nabla}$ คือ เกรเดียนต์ \vec{T} คือ ความเค้น และ \vec{f} คือ แรงเสียดทานและ $\vec{\nabla} \cdot \vec{T}$ คือ ไดเวอร์เจนซ์

2.5 สมการการถ่ายเทพลังงานและสิ่งมีชีวิต

ในตัวอย่างที่นำเสนอภายในงานวิจัยนี้ ส่วนผสมของควันทูหรือในอากาศประกอบด้วยอากาศและอีกไอสี่ชนิดคือ PG, น้ำ, กลีเซอรินและนิโคตินซึ่งพบได้ในบุหรี่ไฟฟ้า หากสังเกตเห็นรูปแบบการระเหยเพิ่มเติมภายในควันทูหรือหายใจ แบบจำลองก็ความสามารถทำงานเข้ากับการจำลองและการทำนายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นภายในพื้นที่อาคาร สำหรับการจำลองทั้งหมดส่วนผสมนั้นถือเป็นเฟสต่อเนื่อง โดยมีกฎการอนุรักษ์นำไปใช้กับรูปแบบของมวลและการถ่ายเทพลังงานความร้อน สมการพลังงานสำหรับส่วนผสมของอากาศและไอน้ำถูกแสดงในรูปแบบต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{\rho c_p v_T}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sum_{i=1}^4 h_i \rho \left(D_i + \frac{v_T}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + S^{(E)}$$

เทอมแรกทางด้านขวามีอธิบายถึงการแพร่กระจายของโมเลกุลและการถ่ายเทความร้อนที่ปั่นป่วน เนื่องจากการไล่ระดับอุณหภูมิ เทอมที่สองหมายถึงการถ่ายเทพลังงานเนื่องจากการไล่รูปแบบของระดับความเข้มข้น และเทอมสุดท้ายคือแหล่งพลังงาน (sink) เนื่องจากการควบแน่น(การระเหย)ของไอระเหย คุณสมบัติการถ่ายเท ρ , v , และ k และ c_p สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยสำหรับส่วนผสมของอากาศและไอและ Pr_t และ Sc_t คือตัวเลข Prandtl และ Schmidt ลำดับ ในสมการ (1) เทอมแหล่งพลังงาน $S^{(E)}$ หมายถึงความร้อนแฝงของการระเหยหรือการควบแน่นซึ่งหยดหรือดูดซับโดยหยดต่อปริมาตรต่อหน่วยตามที่แสดงด้านล่างในสมการ (2)

$$S^{(E)} = - \sum_{i=1}^4 S_i^{(E)} = - \sum_{i=1}^4 n_c \pi d_p^2 J_i L_i / V_c \quad (2)$$

โดยที่ n_c คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดในเซลล์การคำนวณที่มีปริมาตร V_c และ d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคในองค์ประกอบนั้น J_i เป็นฟลักซ์มวลของส่วนประกอบ i ที่ผิวหน้าของอนุภาคของแต่ละอนุภาค มันเป็นค่าลบสำหรับการควบแน่นและเป็นบวกสำหรับการระเหย สอดคล้องกับการปลดปล่อย (source) และการดูดซับ (sink) ของความร้อน ความสัมพันธ์กับ J_i ถูกนำเสนอในภายหลังในส่วนนี้ ความเข้มข้นของสารระเหยแต่ละชนิดในเฟสไอถูกควบคุมโดยสมการรูปแบบการถ่ายเทเชิงสเกลาร์ด้านล่าง

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D_i + \frac{v_T}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + S_i^{(Y)} \quad (3)$$

โดยที่ Sc_t คือตัวเลข Schmidt สำหรับ Y_i , v_T คือความหนืดปั่นป่วน และ D_i คือการแพร่กระจายของโมเลกุลของชนิดไอในส่วนผสมของอากาศและไอ $S_i^{(Y)}$ เป็นเทอมของแหล่งกำเนิดของมวลสำหรับองค์ประกอบ

i ($\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{s}$) เช่น

$$S_i^{(Y)} = n_c \pi d_p^2 J_i / Vc \quad (4)$$

พลັกซ์ของมวลจากหรือไปยังอนุภาคเนื่องจากการระเหยหรือการควบแน่นของรูปแบบ i อาจแสดงได้โดย

$$J_i = \rho k_{m,i} (Y_{i,s} - Y_i) = k_{m,i} (C_{i,s} - C_i) \quad (5)$$

โดยที่ $k_{m,i}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอ i , ρ คือความหนาแน่นของอากาศผสม และ $Y_{i,s}$ คือเศษส่วนมวลของไอ i ที่ผิวอนุภาค C_i หมายถึงความเข้มข้นของไอ i (kg/m^3) ในกลุ่มก้อนของเหลวในขณะที่ $C_{i,s}$ คือความเข้มข้นของไอ i (kg/m^3) บนพื้นผิวของอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลอาจหาได้จากความสัมพันธ์สำหรับตัวเลข Sherwood

สำหรับอนุภาคที่เล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ ที่มีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาคน้อยและกระแสไอเทอมที่สองในสมการ (6) มีขนาดเล็กและสมเหตุสมผลที่จะให้ $Sh = 2.0$

$$\frac{k_{m,i} d_p}{D_i} = Sh = 2.0 + 0.6 Re_{d_p}^{1/2} Sc^{1/3} \quad (6)$$

ตัวแปรที่เพิ่งนำมาใช้ใหม่ในสมการ (5) คือ $C_{i,s}$ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของไอระเหยที่ผิวอนุภาค ค่าของมันเกี่ยวข้องกับเศษส่วนโมลของส่วนประกอบในเฟสอนุภาคของเหลว และปริมาณทางอุณหพลศาสตร์อื่น ๆ โดย

$$C_{i,s} = \frac{(\gamma x P_{sat} M)_i}{RT} \quad (7)$$

Table 4
Comparison of experimental results with simulation predictions (distributed and well-mixed models).

Run	Experiment and simulation results of nicotine concentration							
	Exposure level (# of puffs)	Ventilation rate (ACH)	Experiment results ^a [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Well mixed model results [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] ^b	Distributed model room average [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Distributed model average at P1-a [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Distributed model average at P1-b [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Distributed model average at P1-c [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
1	7	9.86	1.13	1.07	1.79	1.71	1.91	1.75
2	7	6.81	2.52	2.00	2.62	2.51	3.44	2.81
3	15	6.83	2.45	4.26	5.59	5.34	7.18	6.16
4	15	6.80	4.15	4.29	5.76	6.11	6.55	5.99
Average			2.56	2.91	3.94	3.92	4.77	4.18

ACH, air change per hour.

^a Experimental results reported in Czogala et al. (2014).

^b Modeling results from (Rostami et al., 2016).

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการทดลองด้วยแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์กิจกรรม x เป็นเศษส่วนโมลในเฟสของเหลว P_{sat} เป็นความดันไอเหนือของเหลวบริสุทธิ์ M เป็นมวลโมเลกุล, R เป็นค่าคงที่ของก๊าซสากลและ T เป็นอุณหภูมิ ปริมาณทั้งหมดในตัวเศษสอดคล้องกับองค์ประกอบ i

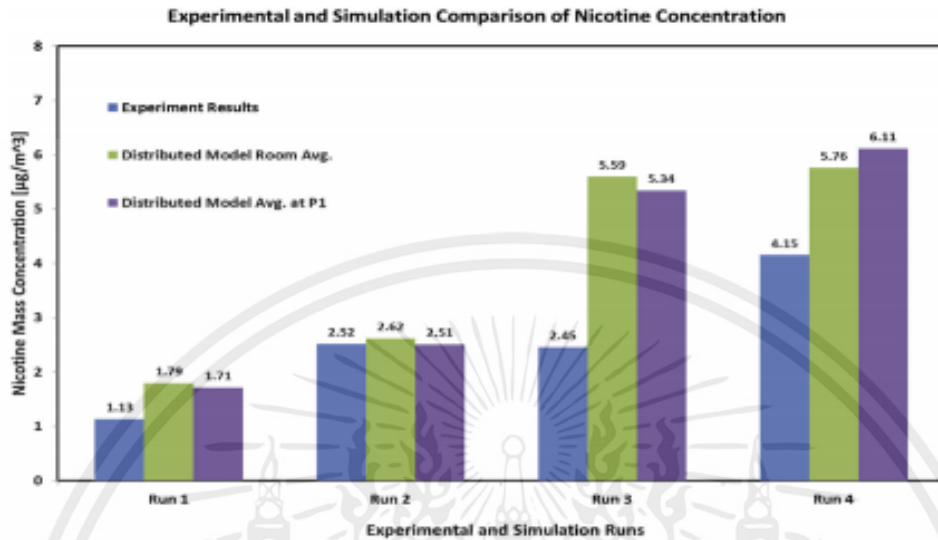


Fig. 2. Comparison of experimental data from Czogala et al. (2014) with modeling results.

รูปที่ 2 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองจาก Czogala et al.(2014) กับผลลัพธ์จากแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

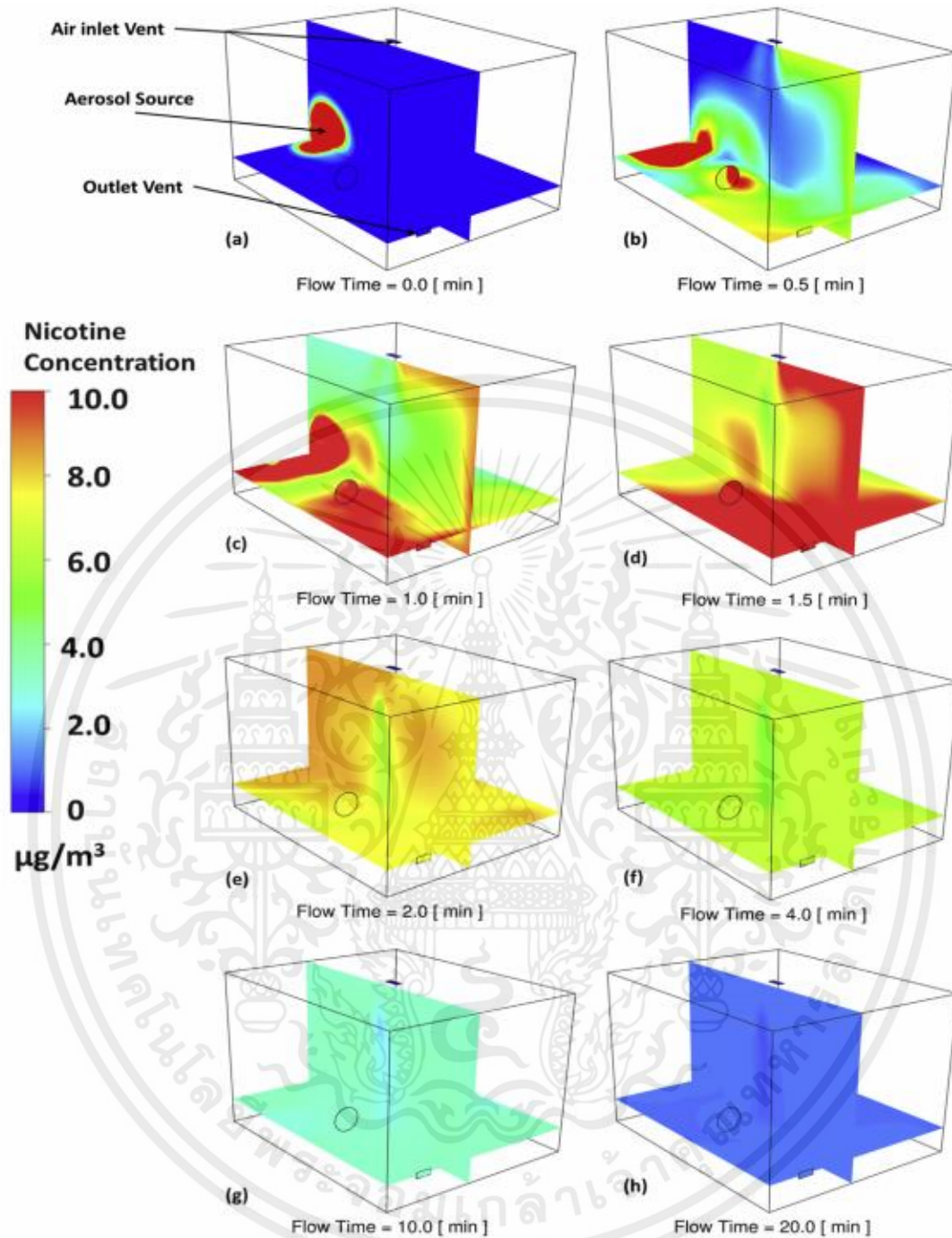


Fig. 3. Room distribution of nicotine concentration at different times (puffing was conducted for the first 1.5 min, i.e. 7 puffs with 10 s between puffs).

รูปที่ 3 การกระจายตัวของ Nicotine ภายในห้องจำลองในเวลาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สมการการขนส่งอนุภาค

วิถีของอนุภาคในกรอบอ้างอิงของลากรางจ์นั้นถูกคาดการณ์โดยการรวมความสมดุลของแรงเข้าบนอนุภาคนั้น แรงสมดุลนี้บนอนุภาค (droplet) เท่ากับแรงเฉื่อยของอนุภาคที่มีแรงกระทำต่อแต่ละอนุภาคและอาจแสดงเป็น

$$\frac{d}{dt}(m_p u_p) = F^D + F^L + F^{BM} + F^G \quad (8)$$

เมื่อ F^D , F^L , F^{BM} , F^G เป็นแรงลาก, แรงยก, การเคลื่อนไหว Brownian และแรงโน้มถ่วงในแต่ละอนุภาคตามลำดับ มวลอนุภาค M_p ก็เปลี่ยนแปลงไปเช่นกันเนื่องจากการระเหยหรือการควบแน่น

$$\frac{dm_p}{dt} = - \sum_{i=1}^4 \pi d_p^2 J_i \quad (9)$$

ความคงเส้นคงวาของทิศทางการถ่ายเทมวลต้องได้รับการตรวจสอบ สมการ (5) แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์ของมวล J_i เป็นค่าบวกสำหรับการระเหย (ความเข้มข้นของพื้นผิวสูงกว่าความเข้มข้นของสภาพแวดล้อม) ฟลักซ์ของมวลบวกนั้นสัมพันธ์กับการลดลงของมวลของอนุภาคตาม สมการ (9) การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอตามสมการ (4) และ (3) และชุดระบายความร้อนสำหรับพลังงานตามสมการ (2) และ (1) สามารถย้อนกลับได้สำหรับกรณีการควบแน่นที่ J_i เป็นค่าลบ

$$x_i = \frac{y_i M}{M_i} \quad (10)$$

มวลโมเลกุลของสารผสมในอนุภาคถูกกำหนดโดย

$$M = \left(\sum \frac{y_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (11)$$

ในแต่ละขั้นตอนในแบบจำลอง ค่าใหม่สำหรับเศษส่วนมวลของส่วนประกอบแต่ละตัวในเฟสของอนุภาคคำนวณจาก y_i จากนั้นทำการคำนวณมวลโมเลกุลผสมและเศษส่วนของโมเลกุลที่เกี่ยวข้องจากสมการ (11) และ (10) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

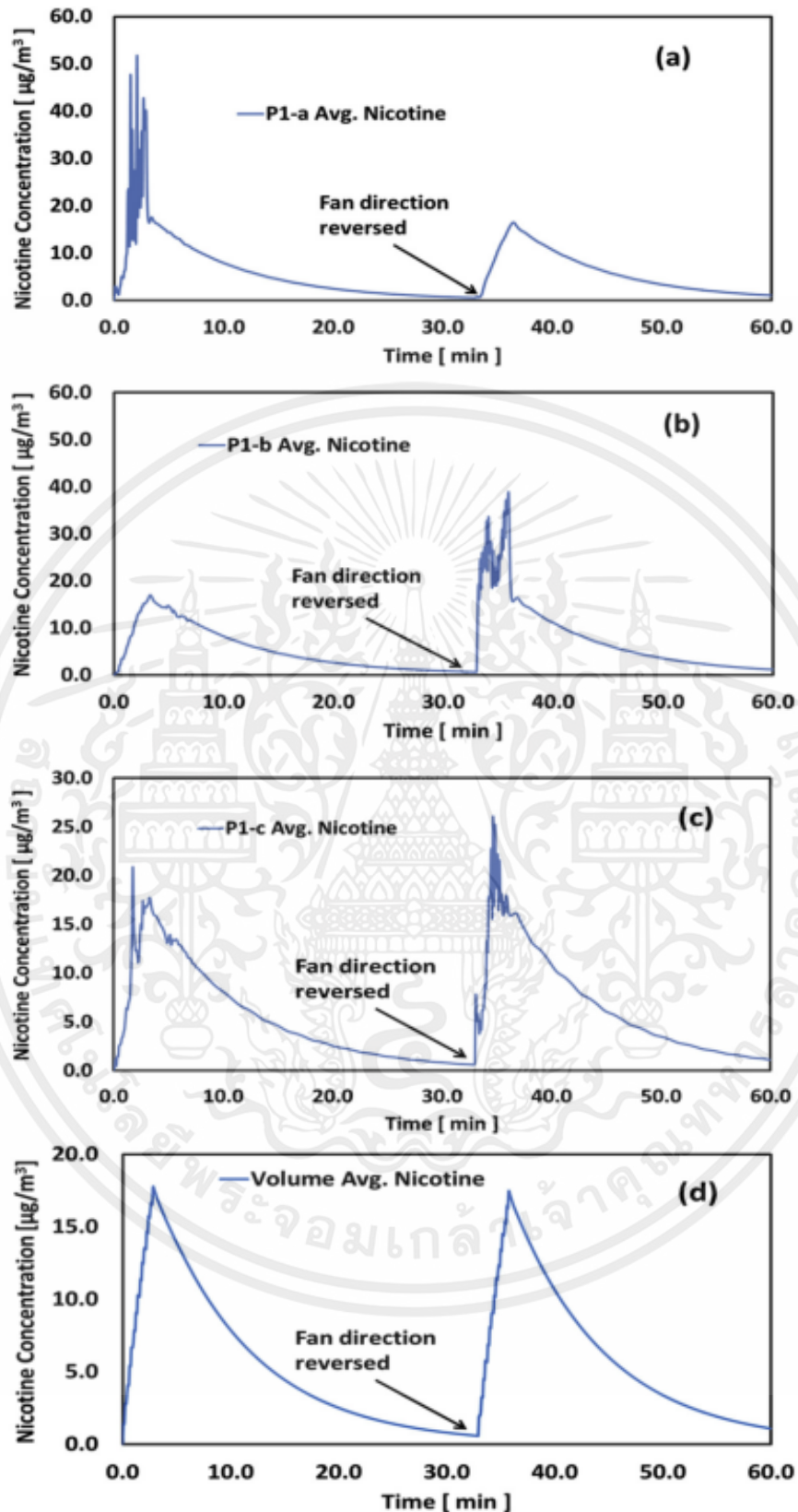


Fig. 4. Example demonstrating effects of circulation fan direction on room average and sampling point nicotine concentration.

รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นนิโคตินกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์

สมการ (7) บ่งชี้ว่าส่วนโมเลกุล (x) ของส่วนประกอบแต่ละตัวมีบทบาทสำคัญต่ออัตราการถ่ายโอนมวลที่ผิวอนุภาค ในขณะที่อัตราการระเหยและการควบแน่นขององค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดในอนุภาคเปลี่ยนไป ส่วนโมลของส่วนประกอบ i , x_i เช่นเดียวกับส่วนมวลในอนุภาค y_i มีความสัมพันธ์ผ่านความสัมพันธ์ของการผสม:

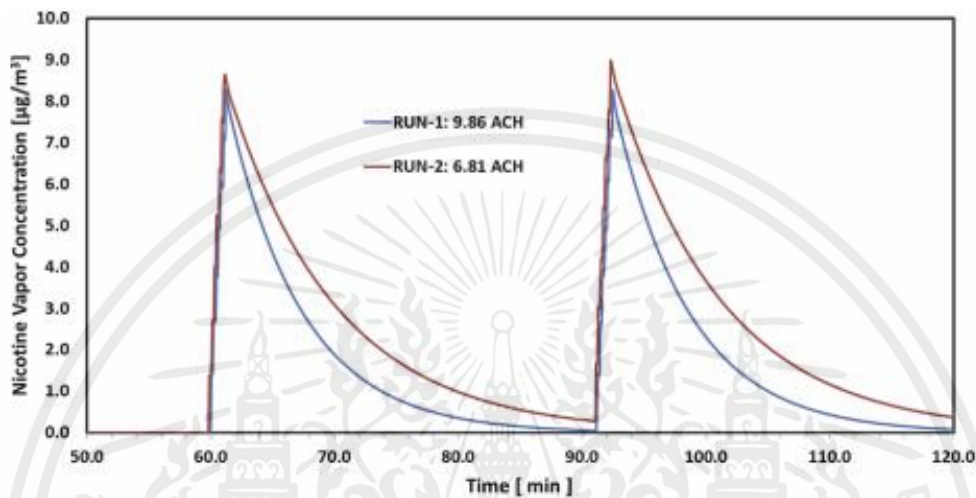


Fig. 5. Effects of ventilation rate on room averaged nicotine vapor concentration.

รูปที่ 5 ผลกระทบของการระบายอากาศต่อความเข้มข้นของนิโคตินภายในห้องทดลอง

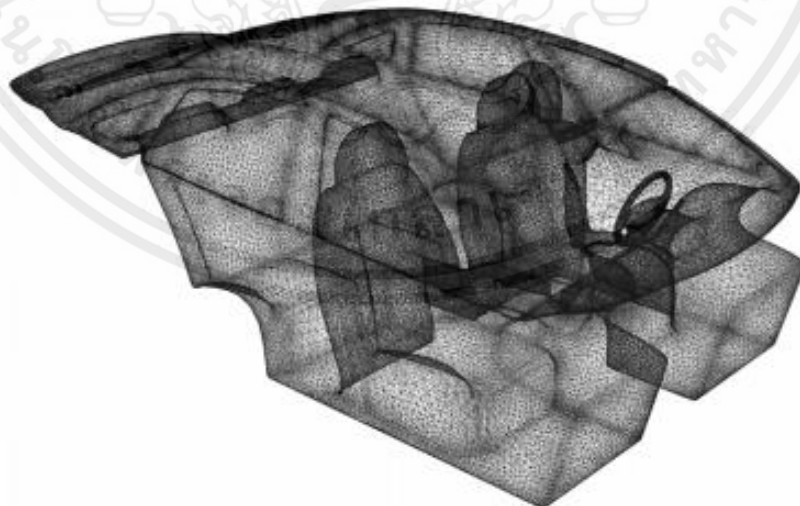


Fig. 6. Mesh of car cabin with closed windows.

รูปที่ 6 Mesh ของห้องโดยสารภายในรถยนต์เมื่อปิดกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการและชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองของฝุ่น PM 2.5 จากควันบุหรี่ไฟฟ้า

3.1 การใช้ข้อมูลอินพุตเพื่อสร้างแบบจำลอง

ผู้วิจัยใช้ข้อมูลอินพุตจาก Czogala et al. (2014) ในการจำลองและเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลที่ถูกต้องที่พิมพ์ไปแล้ว ผู้วิจัยใช้เครื่องสูบบุหรี่ไฟฟ้าในการผลิต และปล่อยควันบุหรี่ในห้องสี่เหลี่ยม ในระหว่างการทดสอบ ควันบุหรี่ถูกปล่อยหนึ่งครั้งในตอนเริ่มทดสอบและเก็บค่าจากเครื่องวัด ตั้งแต่เริ่มเป่าจนค่าคงที่ และเปลี่ยนสถานการณ์การทดลอง ระยะเวลาของการเป่าและปริมาตร เท่ากับ 4.2 วินาทีและ 70 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยเป่าเพียงครั้งเดียวเพื่อดูค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลงจนคงที่ แล้วจึงดำเนินการเปลี่ยนสถานการณ์การทดลอง บุหรี่ไฟฟ้าที่ทำการทดลอง มีระดับนิโคตินสองระดับ (1.1% และ 1.8–1.9%) ถูกนำมาใช้ในการทดลอง โดยใช้การเปิดพัดลมเพื่อระบายอากาศ โดยการทดสอบระดับการระบายอากาศออกเป็นสามจุดและเก็บค่าปริมาณฝุ่น PM 2.5 ในตัวควันบุหรี่

ข้อมูลจากการทดสอบสี่ครั้งโดยใช้บุหรี่ไฟฟ้า 1 ตัว (EC2) จาก Czogala et al. (2014) ถูกนำมาใช้ สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองของผู้วิจัย อากาศที่ไหลเข้าถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไข ขอบเขตความเร็วซึ่งคำนวณจากอัตราแลกเปลี่ยนอากาศและพื้นที่ไหลเข้า เศษส่วนมวลของ PG, กลีเซอรอล, นิโคติน และไอน้ำถูกคำนวณ โดยใช้มวลรวมของแต่ละส่วนประกอบที่ปล่อยออกมาจากเครื่องสูบบุหรี่ (รวมมวลของน้ำจากความชื้นด้วย)

3.2 ชุดอุปกรณ์และเครื่องวัด

3.2.1 Digital Formaldehyde

- สี : สีดำ
- ฟังก์ชัน : HCHO TVOC เบนซิน, PM 1/ 2.5/10
- HCHO ทดสอบช่วง : 0 ~ 1.999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM1/2.5/10 ทดสอบช่วง : 0 ~ 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- TVOC ทดสอบช่วง : 0 ~ 9.999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- แหล่งจ่ายไฟ : แบตเตอรี่ลิเธียม/1200 mAh



รูปที่ 7 Digital Formaldehyde

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อินพุต : 5.0 V/300 mA
- น้ำหนัก : 185 g
- ขนาด : 150 x 70.8 x 43.6 mm

3.2.2 Xiaomi Smart Mi PM 2.5

- สี : สีขาว
- วัสดุ : ABS
- ไฟบอกสถานะของค่าอากาศ
- สีเขียว สถานะดี ($0 < 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- สีส้ม สถานะปานกลาง ($76 < 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- สีแดง สถานะแย่ ($> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- ทดสอบช่วง : $0 \sim 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- แบตเตอรี่ Li-ion ในตัว ขนาดความจุ 950 mAh
- พอร์ตชาร์จ Micro USB
- Voltage : DC 5V, 1A
- กำลังไฟ : 3W
- ขนาด : 90 x 65 x 20 mm
- น้ำหนัก : 75 g



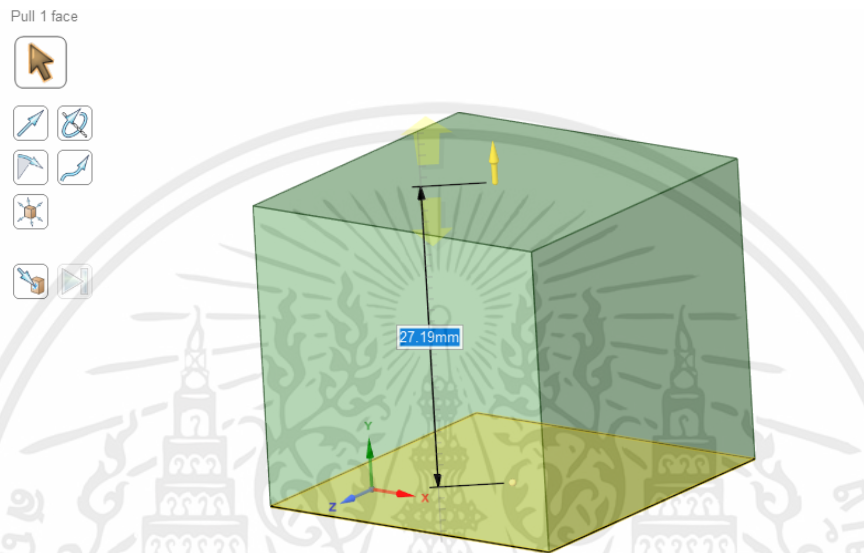
รูปที่ 8 Xiaomi Smart Mi PM 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 Geometry

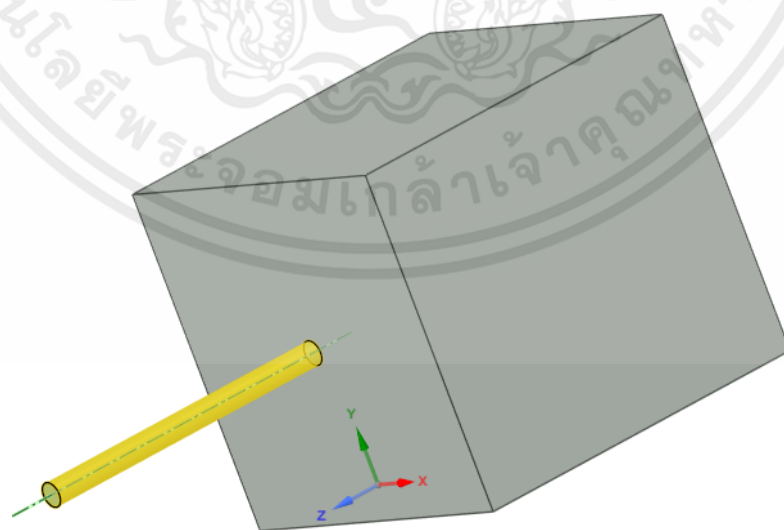
เราสร้างตามงานวิจัยแต่ลดขนาดลงมาให้คำนวณได้เร็วขึ้น แต่ยังคงช่อง inlet outlet ไว้เหมือนเดิม โดยมีขนาด 2800x3400x4100 มิลลิเมตร สร้างจาก Spaceclaim

เริ่มจากสร้างสี่เหลี่ยมแล้วextrudeมันขึ้นมา



รูปที่ 9 สร้างห้องจำลอง

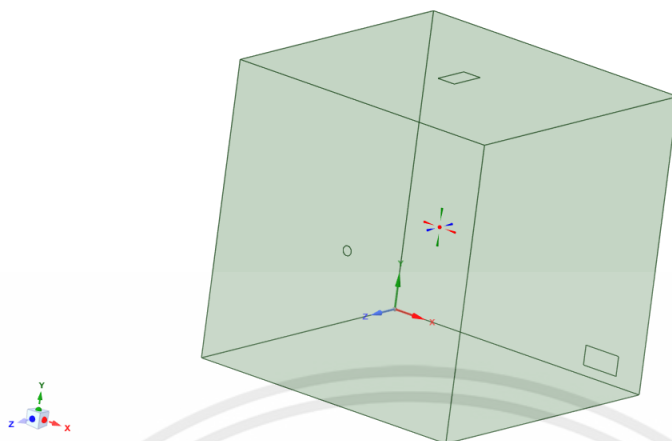
แล้วสร้างรูปทรงตามขนาดที่ต้องการมาแปะไว้แล้วลบเพื่อเจาะรูจนครบทุกรูก็ได้โมเดลที่เราใช้



รูปที่ 10 เจาะรูแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.



รูปที่ 11 ห้องจำลองของการทดลองเสร็จสมบูรณ์

3.4 Mesh

Meshing เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการจำลองทางวิศวกรรมที่แบ่งรูปทรงเรขาคณิตที่มีความซับซ้อน ให้กลายเป็นองค์ประกอบง่ายๆ ที่สามารถใช้เป็นค่าประมาณแบบไม่ต่อเนื่องของโดเมนขนาดใหญ่ โดยยังมีความละเอียดมากเท่าไร โมเดลยิ่งมีความแม่นยำมากขึ้น แต่อาจจะใช้เวลาในการจำลองนานตามไปด้วย

เราพบว่าการตั้งตามค่าเริ่มต้นยังไม่ละเอียดพอสำหรับโมเดลของเรา ดังนั้นจึงหาค่า mesh ต่างๆ ที่เหมาะกับการคำนวณทำให้ได้ค่าที่แม่นยำและรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ดังต่อไปนี้คือ

3.4.1 Mesh Default

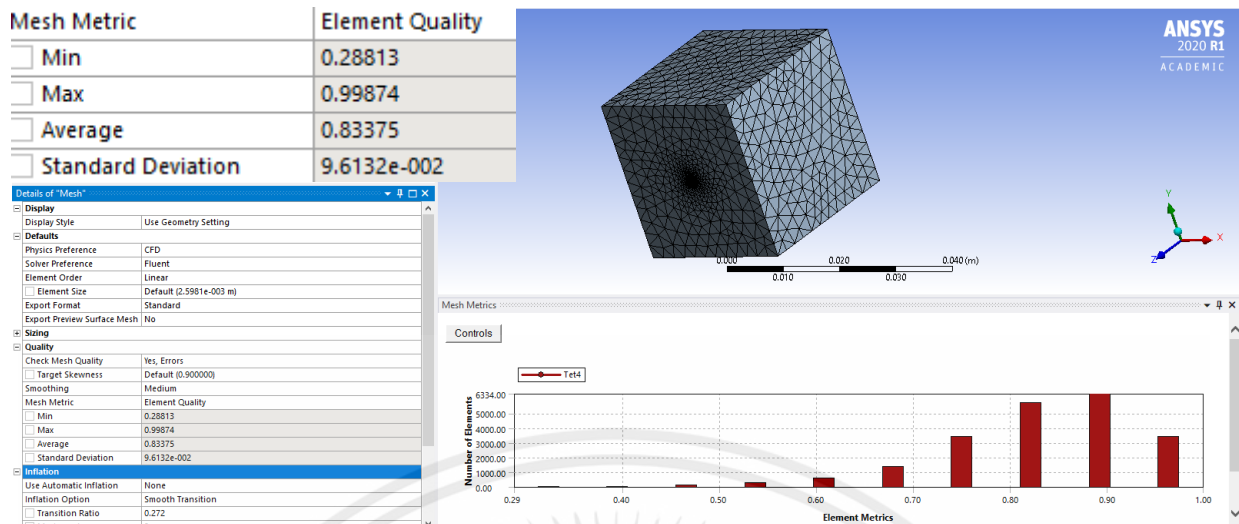
3.4.2 Mesh Sizing

3.4.3 Mesh Quality

3.4.4 Mesh Inflation

3.4.5 Mesh Statistics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 mesh จากการตั้งค่าตามค่าเริ่มต้น

โดยสามารถอธิบายวิธีการดำเนินการได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 Mesh Default

สามารถอธิบายค่าต่าง ๆ ได้ตามรูปด้านล่างนี้

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	6.0 cm
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No

รูปที่ 13 ค่าต่าง ๆ ใน Mesh Default

คำอธิบายต่าง ๆ ใน Mesh Defaults

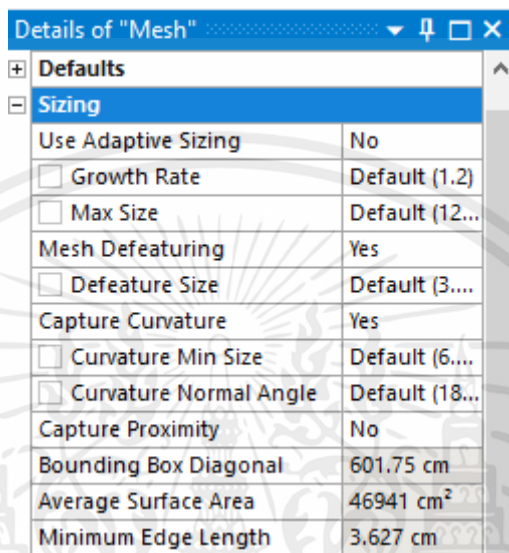
- Physics Preference - คือการเลือกชนิดของการจำลอง ในที่นี้ให้เลือกเป็นแบบ CFD
- Solver Preference - คือการเลือกรูปแบบของการจำลอง ในที่นี้เลือกเป็นแบบ Fluent
- Element Order - เลือกเป็นแบบ Linear
- Element Size - คือการกำหนดขนาดของ Element ในที่นี้กำหนดขนาดเป็น 6.0 cm เนื่องจากถ้าขนาดของ Element เล็กกว่านี้ จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน ซึ่งขนาดของ Element ที่เลือกเพียงพอต่อผลลัพธ์ที่ต้องการแล้ว
- Export Format- เลือกเป็นแบบ Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Export Preview Surface Mesh- เลือก No

3.4.2 Mesh Sizing

Mesh sizing คือ ขนาดของ mesh รวมไปถึง รูปร่าง และขอบมุมต่างๆ ที่โยงใยเป็นตาข่าย ตามลักษณะของ mesh และ Geometry ที่เราทำจำลอง โดยมีค่าต่างๆตามรูปด้านล่างนี้



Details of "Mesh"	
Defaults	
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (12...)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3....)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (6....)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18...)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	601.75 cm
Average Surface Area	46941 cm ²
Minimum Edge Length	3.627 cm

รูปที่ 14 การตั้งค่า Mesh Sizing

เราสามารถอธิบาย แต่ละค่าในส่วนของ Sizing ได้ดังนี้

- Growth Rate คือ อัตราการเติบโตของ mesh (ใช้ค่าเริ่มต้น)
- Max size คือ ขนาดสูงสุดของ element ที่สามารถขยายได้ภายในปริมาตรของ mesh
- Mesh Defeaturing คือ ฟีเจอร์หนึ่งในโปรแกรม Ansys Workbench ซึ่งใช้สำหรับ Geometry ที่มีความซับซ้อน
- Capture Curvature คือ การตรวจจับความโค้งใน mesh
- Curvature Min Size คือ ขนาดความโค้งเล็กสุด ใน mesh
- Curvature Normal Angle คือ มุมโค้งปกติของ mesh (ใช้ค่าเริ่มต้น)
- Capture Proximity คือ เป็น Option หนึ่งในโปรแกรม Workbench ถ้าต้องการ จำลอง ให้เลือก Activate แล้วกด No
- Bounding Box Diagonal คือ ความยาวเส้นทแยงมุมใน Bounding Box ที่มีความสัมพันธ์กับ Boundary Conditions (ใช้ค่าเริ่มต้น)
- Average Surface Area คือ ขนาดพื้นที่เฉลี่ยของพื้นผิว (ใช้ค่าเริ่มต้น)
- Minimum Edge Length คือ ความยาวขอบต่ำสุดใน mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเลือก mesh sizing ของโมเดล เราได้ใช้ตามค่าเริ่มต้น เนื่องจากมันมีผลไม่มากในการจำลอง แต่ผู้วิจัยจะได้ไปลง detail ในส่วนของ mesh quality แทน

3.4.3 Mesh Quality

คือการปรับเปลี่ยนคุณภาพภายใน mesh ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามรูปด้านล่างนี้

+ Sizing	
- Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900...
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
+ Inflation	
+ Assembly Meshing	
+ Advanced	
+ Statistics	

รูปที่ 15 การตั้งค่า Mesh Quality

คำอธิบายค่าต่าง ๆ ใน Mesh Quality

- Check Mesh Quality คือ การตรวจคุณภาพของ mesh (Yes, Errors คือ เปิดใช้งานเมื่อเจอส่วนที่ผิดพลาด จะขึ้น Errors)
- Target Skewness คือ การเลือกตำแหน่งที่เบ้ใน mesh (ไม่ต้องใช้)
- Smoothing คือ ความละเอียดของชิ้นงาน (ใช้เป็น Medium เนื่องจากถ้าใช้ High ชิ้นงานจะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน)
- Mesh Metric คือ เมตริกซ์ใน mesh (เลือก None)

3.4.4 Mesh Inflation

คือ การขยายตัวของ mesh เพื่อให้ element โตขึ้นซึ่งอาจช่วยลดจำนวน element ได้ ซึ่งอาจทำให้ใช้เวลาคำนวณน้อยลง แต่ได้ค่า mesh quality ที่น้อยลงเพราะรูปร่าง mesh อาจทำให้คำนวณยากขึ้นโดยมีค่าต่างๆที่สามารถปรับเปลี่ยน inflation แสดงได้ตามรูปด้านล่างนี้

Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Contr...
Inflation Option	Smooth Transi...
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.1
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	10
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

รูปที่ 16 ค่าต่าง ๆ ใน Mesh Inflation

ค่าต่าง ๆ ใน Inflation

- Use Automatic Inflation คือ การทำให้โปรแกรมขยาย mesh โดยอัตโนมัติ (เลือก Program Control)
- Inflation Option คือ การเลือกรูปแบบการขยายตัวของ mesh (เลือกรูปแบบ Smooth transition)
- Transition Ratio คือ สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของ mesh (ใช้ 0.1)
- Maximum Layers คือ จำนวนชั้นสูงสุดของการ Inflation (ใช้ 10 ชั้น)
- Growth Rate คือ อัตราการเติบโตของการ Inflation (ใช้ 1.2)
- Inflation Algorithm คือ ชุดคำสั่งการทำงานของ Inflation ซึ่งมีให้เลือกว่า จะใช้ Pre(ก่อน) หรือ Post(หลัง)
- View advance options คือ การใช้ตัวเลือกขั้นสูง (เลือก No)
- ในส่วนของ 3.4.5 Assembly Meshing และ 3.4.6 Advanced
- ใช้ค่าตั้งต้นของโปรแกรมจึงจะขอข้ามไปพูดถึงในส่วนของ Statistics

3.4.5 Mesh statics

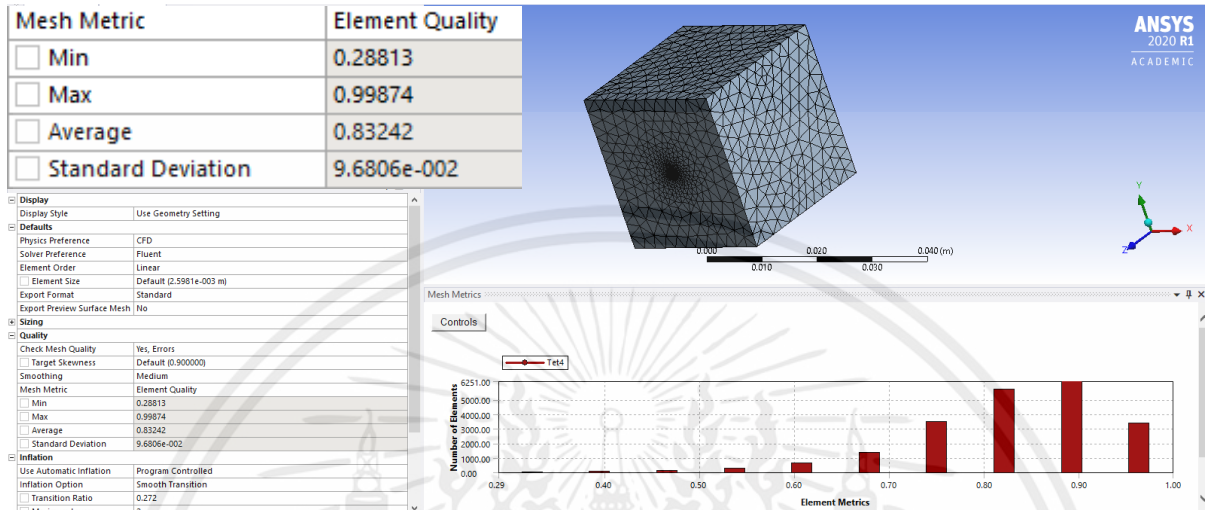
เป็นการบอกจำนวน Node และ Element ใน mesh ของเรา ซึ่งมีค่าดังแสดงในรูปด้านล่างนี้

+ Assembly Meshing	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	92950
<input type="checkbox"/> Elements	490740

รูปที่ 17 จำนวน Node และ Element ใน Mesh Statistics

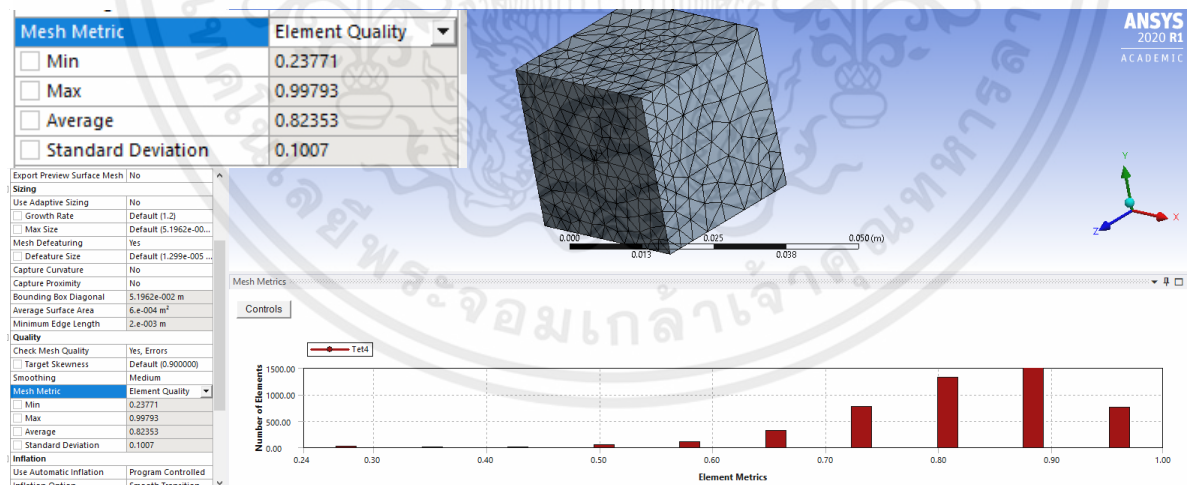
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองรันโปรแกรม จำนวน Element ที่ใช้ได้ ต้องมีค่าไม่เกิน 512,000 cells ซึ่งจำนวน Element จะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของ Element Size (3.4.1 ใช้ 6 cm) ซึ่งจำนวน Element ของเรามีจำนวน 490,740 cells ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้งานได้



รูปที่ 18 mesh จากการใช้ inflation

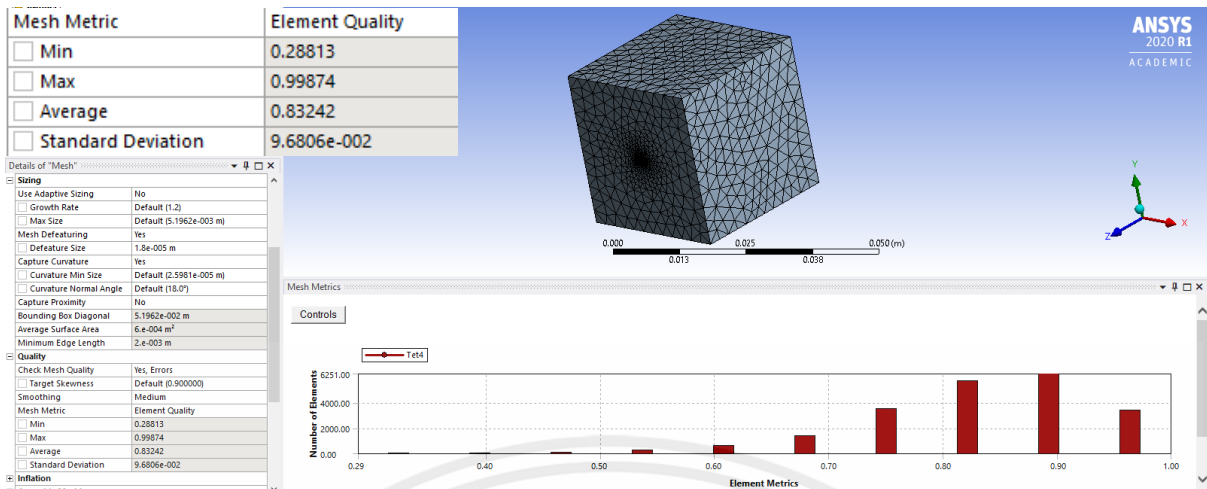
เราลองเพิ่มขนาด ในส่วนที่มีพื้นที่มากและเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งเราคิดว่าช่วยลดจำนวน element ได้และอาจไม่กระทบรูปร่างมากแต่ก็ยังได้ค่า mesh quality น้อยกว่าแบบใช้ค่าเริ่มต้น



รูปที่ 19 mesh จากการลองเพิ่มขนาด

เราลองเพิ่มขนาดของ mesh defeaturing จาก 1.299×10^{-5} เป็น 1.8×10^{-5} ซึ่งตัดพวกส่วนโค้ง หรือ รูขนาดเล็ก (ไม่เกินที่ตั้งไว้) ที่ไม่จำเป็นออก แต่ก็ยังได้ค่า mesh quality น้อยกว่าแบบใช้ค่าเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

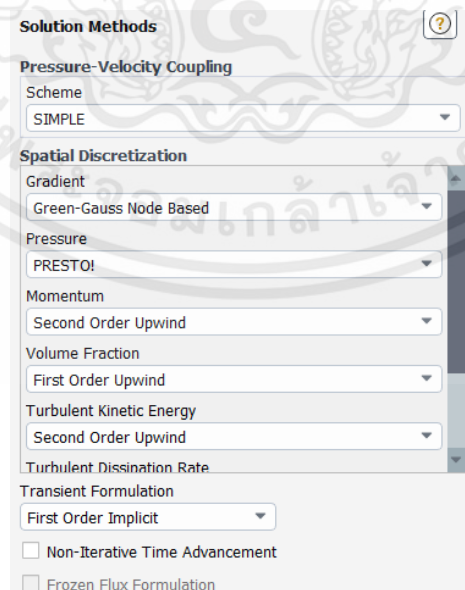


รูปที่ 20 mesh จากการใช้ mesh defeating

3.5 Setup

3.5.1 Setup การคำนวณ

เราแบ่งแยกแต่ละสารออกเป็น phase โดยใช้ multiphase model. เราตั้งค่าการคำนวณต่าง ๆ ตามงานวิจัยคือใช้ Pressure-Velocity Coupling scheme แบบ Simple, ใช้ spatial discretization แบบ PRESTO, ใช้ momentum, turbulent kinetic energy, turbulent dissipation rate แบบ second order upwind, gradient ใช้แบบ Green-Gauss node-based และ Transient formulation ใช้แบบ first order implicit



รูปที่ 21 หน้าตั้งค่าการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 setup แต่ละสาร

เนื่องจากแต่ละสารมีค่าความหนาแน่นเฉพาะตัวของมันของมัน เช่น PG มีความหนาแน่นเท่ากับ 1036kg/m^3 เราจึงใช้ Volume Fraction หรือที่เรียกว่าสัดส่วนปริมาตรของสารสารนั้นต่อสารทั้งหมด โดยเราใช้ discrete random walk model ในการติดตามแต่ละสารตามงานวิจัย กำหนดให้แต่ละสารเป็น droplet ขนาด PM 2.5 หรือ 2.5×10^{-6} เมตร สำหรับอัตราการไหลเราเลือกค่า ACH (air change per hour) จากงานวิจัยมาค่าหนึ่งคือ 6.81 ซึ่งค่านี้หมายความว่า ใน 1 ชั่วโมงมีอากาศที่ไหลเข้ามาแทนที่เป็นที่เท่าของ ปริมาตรทั้งหมด ดังนั้นเราสามารถหา CFM (Cubic feet per Minutes) ได้จากปริมาตรของเราคือ $2.8\text{m} \times 3.4\text{m} \times 4.1\text{m} = 39.032\text{ m}^3$ และได้อัตราการไหลคือ $6.81 \times 3.4 \times 2.8 \times 4.1 / 60 = 4.43\text{ m}^3/\text{min}$ และให้ความหนาแน่นของแต่ละสารเป็นดังต่อไปนี้คือ PG = 1040 kg/m^3 , Nicotine = 1010 kg/m^3 , Glycerol = 1261 kg/m^3 ซึ่งได้อัตราการไหลของมวลเป็น PG = $1040 \times 5.1075 \times 10^{-8} = 5.312 \times 10^{-5}\text{ kg/s}$, Nicotine = $1010 \times 5.1075 \times 10^{-8} = 5.159 \times 10^{-5}\text{ kg/s}$, Glycerol = $1.261 \times 5.1075 \times 10^{-8} = 6.441 \times 10^{-5}\text{ kg/s}$ เราให้พื้นที่ของ inlet คือ $0.14875 \times 0.2975\text{ m}^2$ และได้ความเร็วในการไหลเข้าคือ $4.43 / (0.14875 \times 0.2975 \times 60) = 1.668482\text{ m/s}$ โดยได้ทำการวัดอัตราเร็วในการเป่าควันบุหรี่ ออกมาได้ 0.6 m/s โดยกำหนดอัตราเร็วของพัดลม 1 m/s

รูปที่ 22 หน้าการตั้งค่าแต่ละสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2

Percent composition of e-liquid and aerosol.

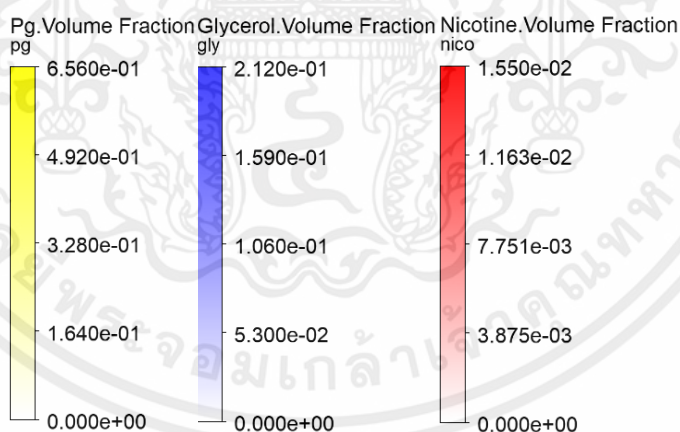
	Glycerin (%)	Propylene glycol (%)	Water (%)	Nicotine (%)	Flavor ^a (%)
<i>e-Liquid composition</i>					
blu Classic Tobacco Disposable	82	-	9	2	7
blu Magnificent Menthol Disposable	75	-	18	2	5
blu Cherry Crush High Premium	77	-	14	2	7
SKYCIG Classic Tobacco Bold	24	67	6	2	1
SKYCIG Crown Menthol Bold	21	66	7	2	4
<i>e-Cigarette aerosol composition^b</i>					
blu Classic Tobacco Disposable	73	-	15	1	11
blu Magnificent Menthol Disposable	80	-	18	2	-
blu Cherry Crush High Premium	70	-	19	1	10
SKYCIG Classic Tobacco Bold	24	61	10.4	1.4	3
SKYCIG Crown Menthol Bold	21	59	12	2	6

^a Flavor content is estimated by difference.^b Aerosol % composition calculated based on the ACM delivery as analyte yield (mg)/ACM (mg) × 100.

รูปที่ 23 แสดงสัดส่วนโดยมวลของสารในน้ำยาบุหรี่ไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงมาจากผลิตภัณฑ์จริง (อ้างอิงจากงานวิจัย)

3.5.3 setup การแสดงผล

ในการแสดงผลเราจะใช้แม่สี 3 สีในการบอกปริมาณของสารแต่ละสารในควันบุหรี่ในแต่ละบริเวณที่เราจำลองออกมา และเราได้ทำการ Normalized ค่าของแต่ละสารเทียบกับค่าสูงสุดของมัน เพื่อจะให้เห็นได้ชัดเจนขึ้น (ถ้าไม่ทำจะเห็นแต่สีเหลืองเป็นส่วนใหญ่) สีและค่า Volume Fraction สูงสุดที่ได้จากการ Normalized แล้วของสารแต่ละสารจะแสดงดังในรูปที่ 23



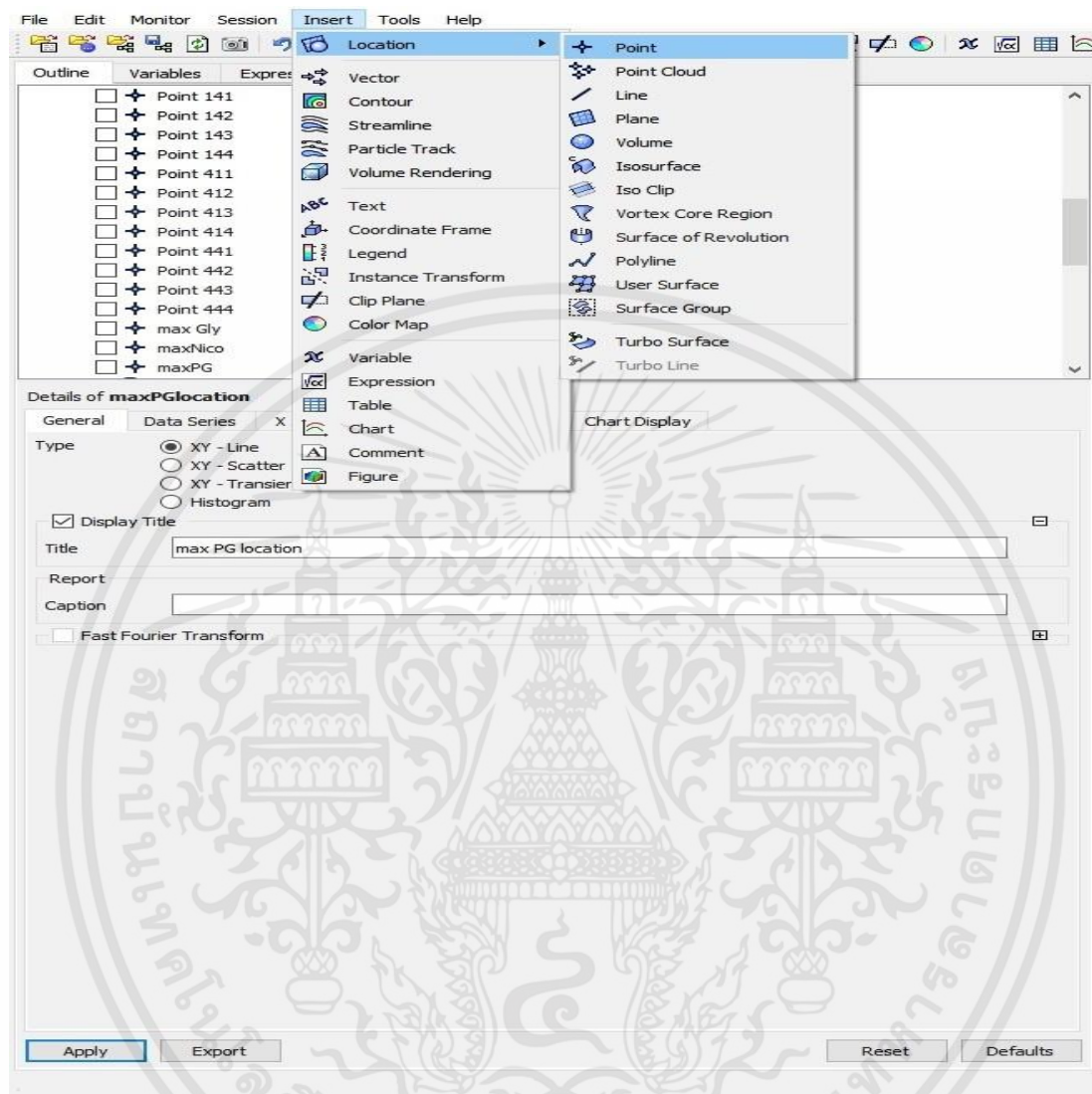
รูปที่ 24 Volume Fractions ของสารแต่ละชนิดโดยเทียบจากสีเรียงตามระดับความเข้ม

สีเหลืองคือ Propylene Glycol หรือเรียกย่อ ๆ ว่า PG สีแดง คือ Nicotine และ สีน้ำเงิน คือ Glycerol โดยสีของสารทั้งสามตัวนี้ถือเป็นแม่สี ดังนั้นกล่าวได้ว่า สีที่เกิดจากการผสม PG + Nicotine + Glycerol จะได้ สีดำ ออกมา และขอเรียกการรวมตัวของสารทั้งหมดนี้ว่า “ของผสม”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การระบุตำแหน่งปริมาณสารสูงสุดและกราฟ

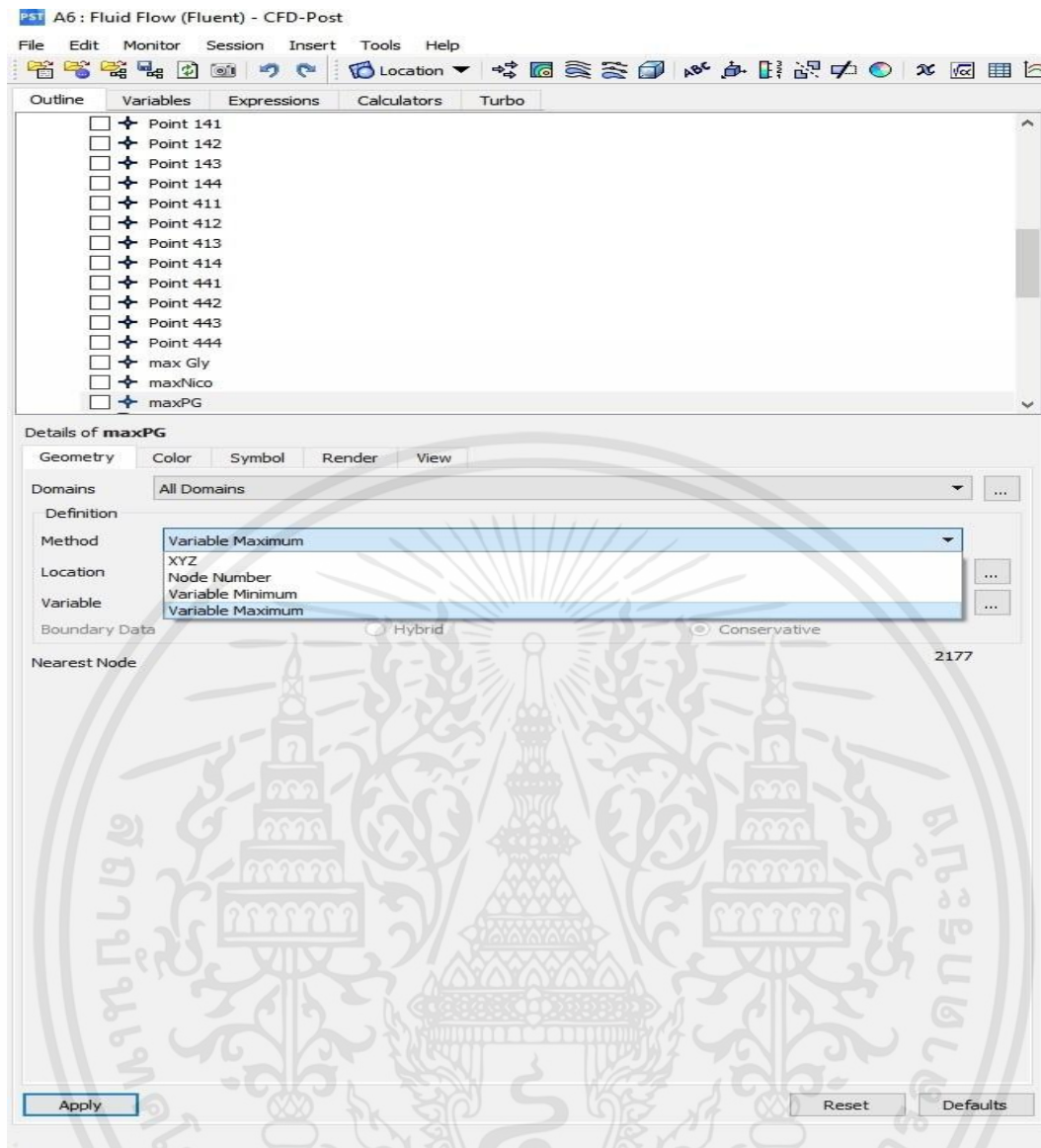
3.6.1 การสร้างจุด



รูปที่ 25 หน้าต่างการ set up จุด

การจะสร้างกราฟหรือตำแหน่งที่ระบุปริมาณสาร เราต้องกำหนดจุดเพื่อกำหนด steam line แล้วจึงทำการพลอตกราฟได้ โดยเริ่มจากไปที่ Insert -> Location -> point -> Apply

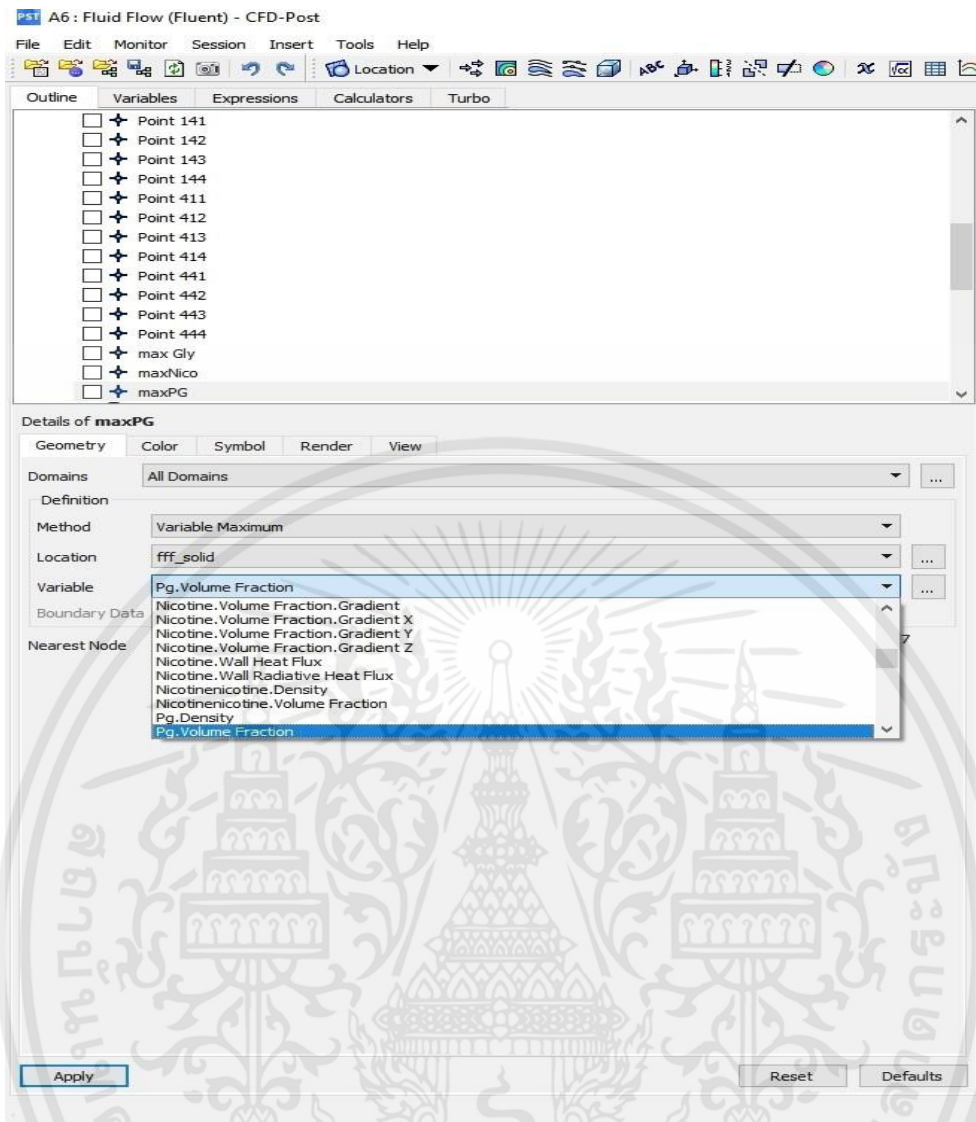
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 26 การกำหนด Geometry แต่ละสาร

เมื่อทำการสร้างจุดแล้ว ต้องทำการเลือกคุณสมบัติที่ต้องการแสดงของสาร โดยทำการเลือก Geometry -> Method -> Variable Maximum (โดยในที่นี้จะทำการหาปริมาณสูงสุดของแต่ละสาร) -> Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

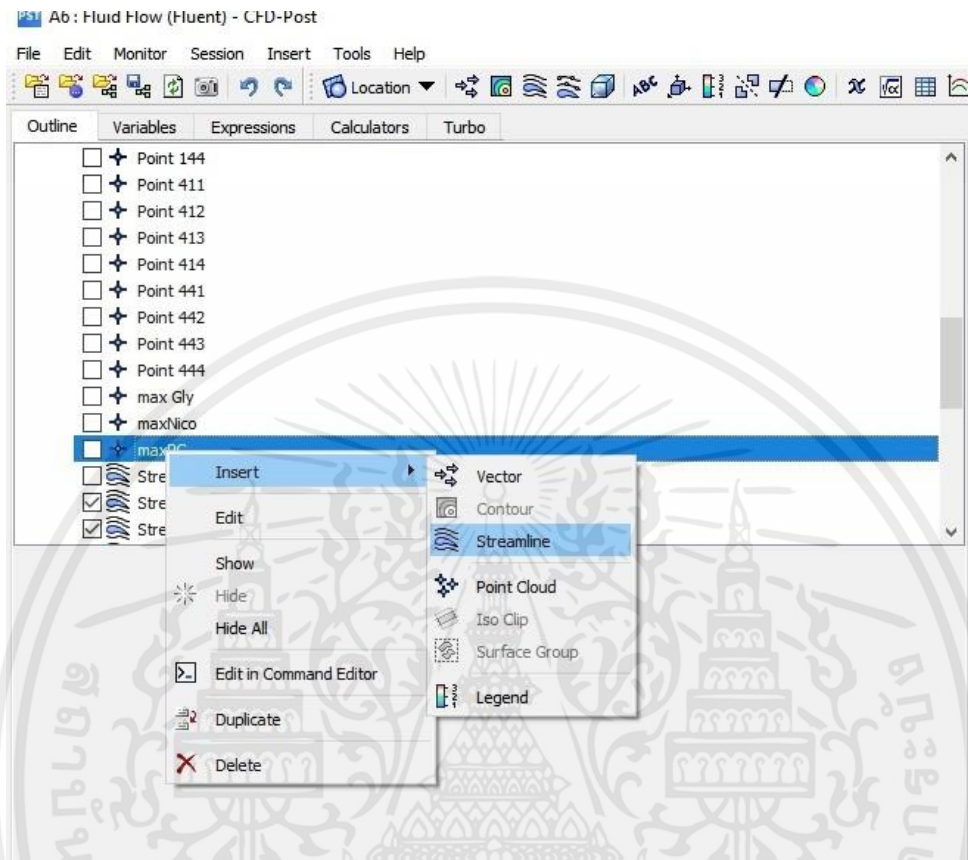


รูปที่ 27 การกำหนดชนิด Variable ที่ต้องการ

เมื่อทำการเลือก Method เสร็จแล้ว ต้องการเลือกชนิดของปริมาณที่ต้องการ โดยไปที่ Geometry -> Variable -> Pg.volume Fraction (แล้วแต่ชนิดของสารที่ต้องการเลือก) -> Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

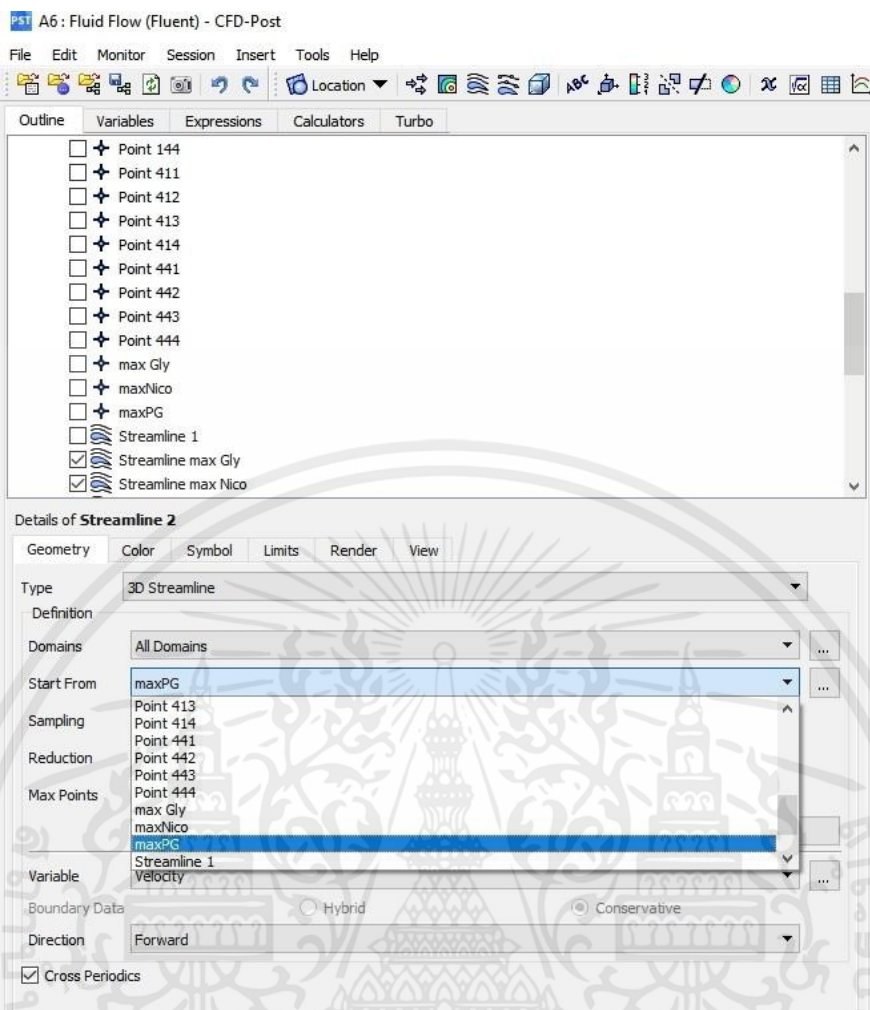
3.6.2 การสร้าง Steam line



รูปที่ 28 การเพิ่ม Steam line ให้แก่สารที่ต้องการสร้างกราฟ

เนื่องจากขั้นตอนของการสร้างจุด ในโปรแกรมไม่ได้กำหนด Steam line มาให้ จึงต้องทำการสร้าง steam line ให้แต่ละจุด โดยเลือกสารที่ต้องการแสดงผล ดังนี้เลือกสารที่ต้องการ (ในที่นี้เลือก maxPG) -> Insert -> Steam line -> Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 29 การกำหนดจุดเริ่มให้แก่สาร ที่ต้องการสร้าง Steam line

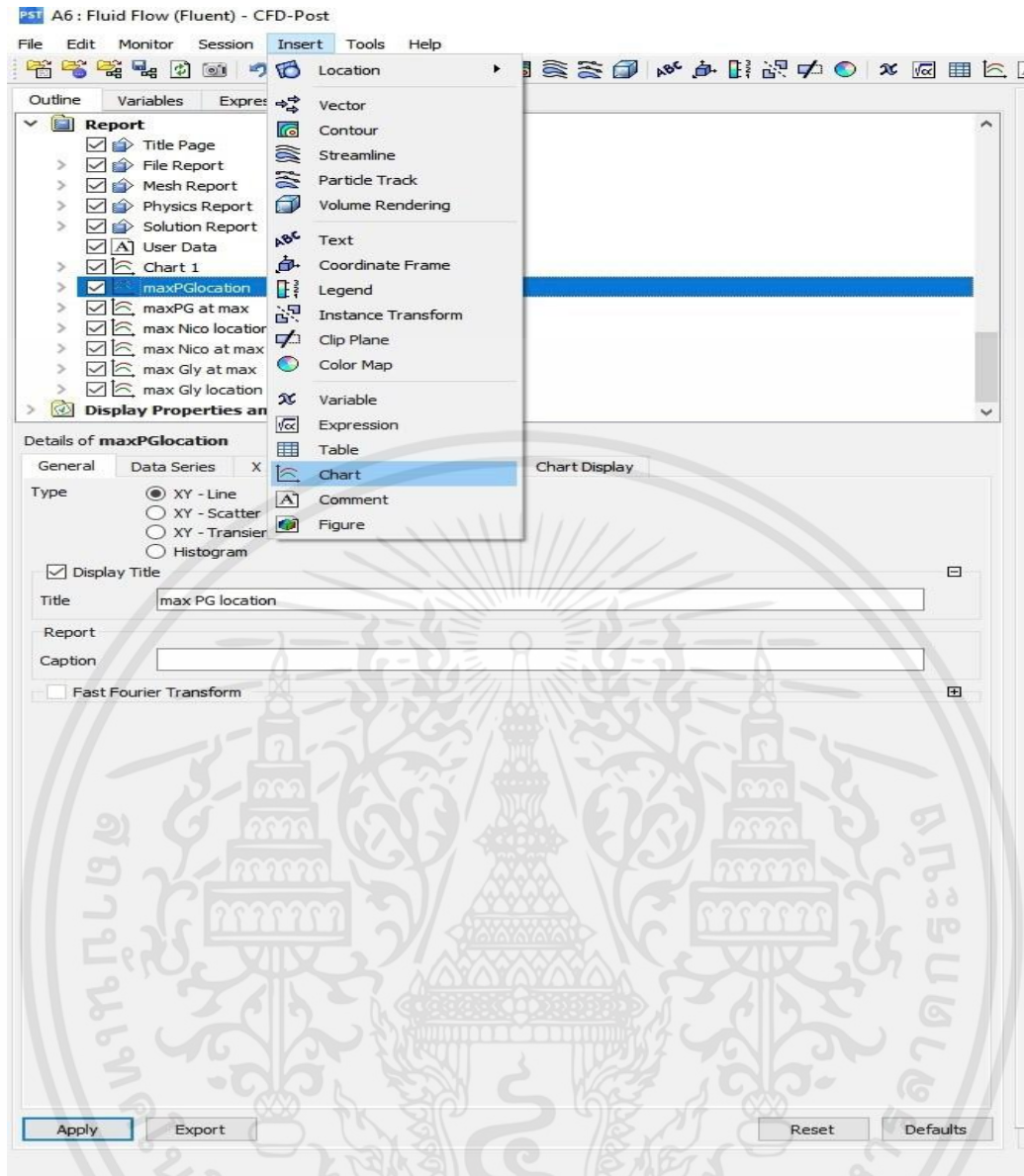
เมื่อทำการสร้าง Steam line ที่ต้องการแล้ว ให้ทำการเลือกจุดเริ่มต้นการเกิด Steam line โดยไปที่ Steam line (ที่ต้องการ) -> Geometry -> Start From -> maxPG (เลือกจุดที่ต้องการ) -> Apply

3.6.3 การสร้างกราฟ

3.6.3.1 การสร้างกราฟเพื่อระบุตำแหน่งปริมาณสารสูงสุด

ในขั้นตอนนี้ เป็นการสร้างกราฟเพื่อบอกตำแหน่งปริมาณสารสูงสุดที่ต้องการในแต่ละเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นตำแหน่งที่มีปริมาณสูงสุดในแต่ละเวลาที่กำหนด โดยสามารถทำได้ตามรูปด้านล่าง ดังนี้

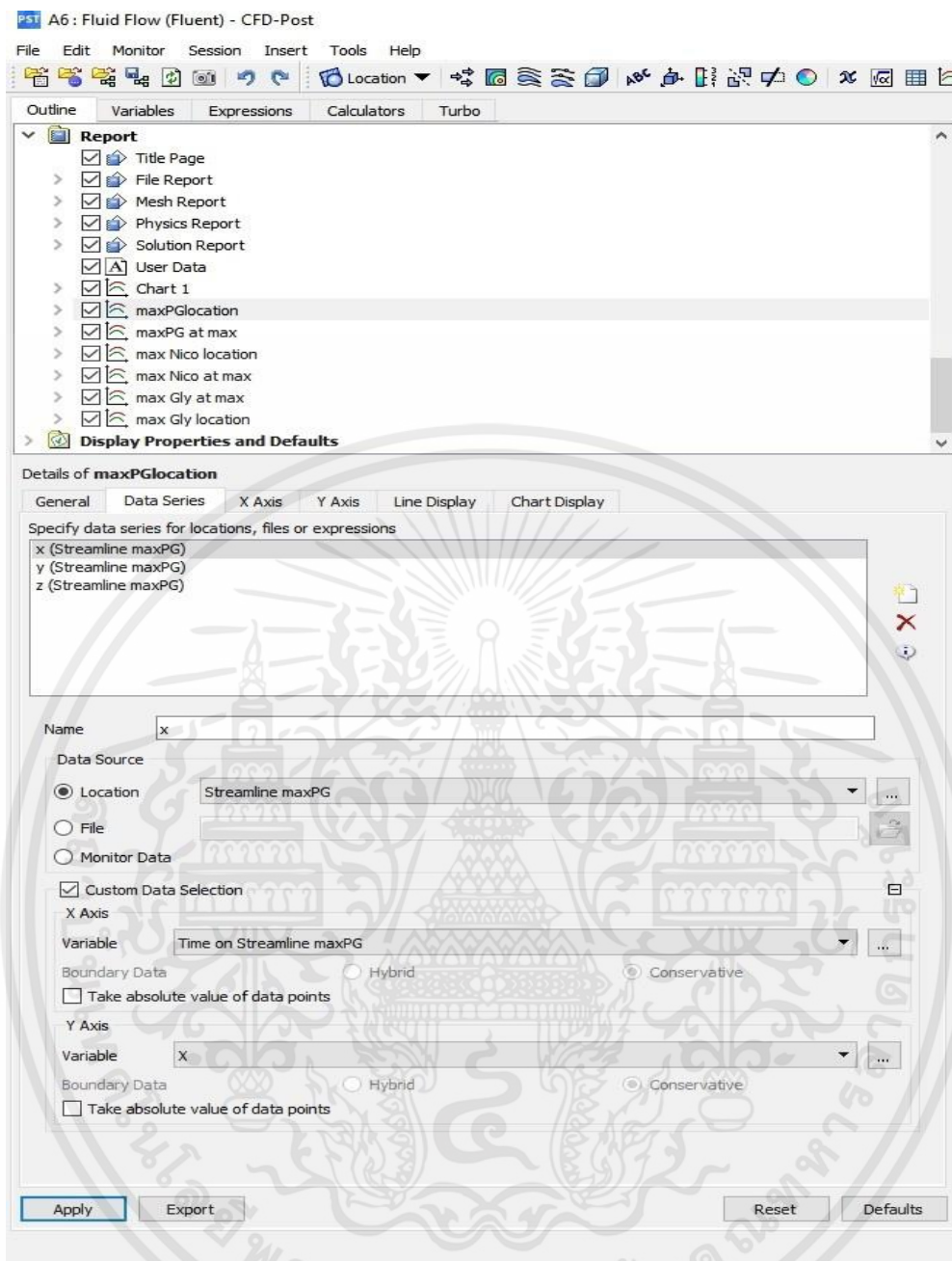
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 30 การเพิ่มกราฟ

เมื่อทำการสร้าง Steam line เสร็จแล้ว จะปรากฏชื่อของ Steam line ที่สร้างตรง Outline จากนั้นทำการเพิ่มกราฟ โดยไปที่ Insert -> Chart -> Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



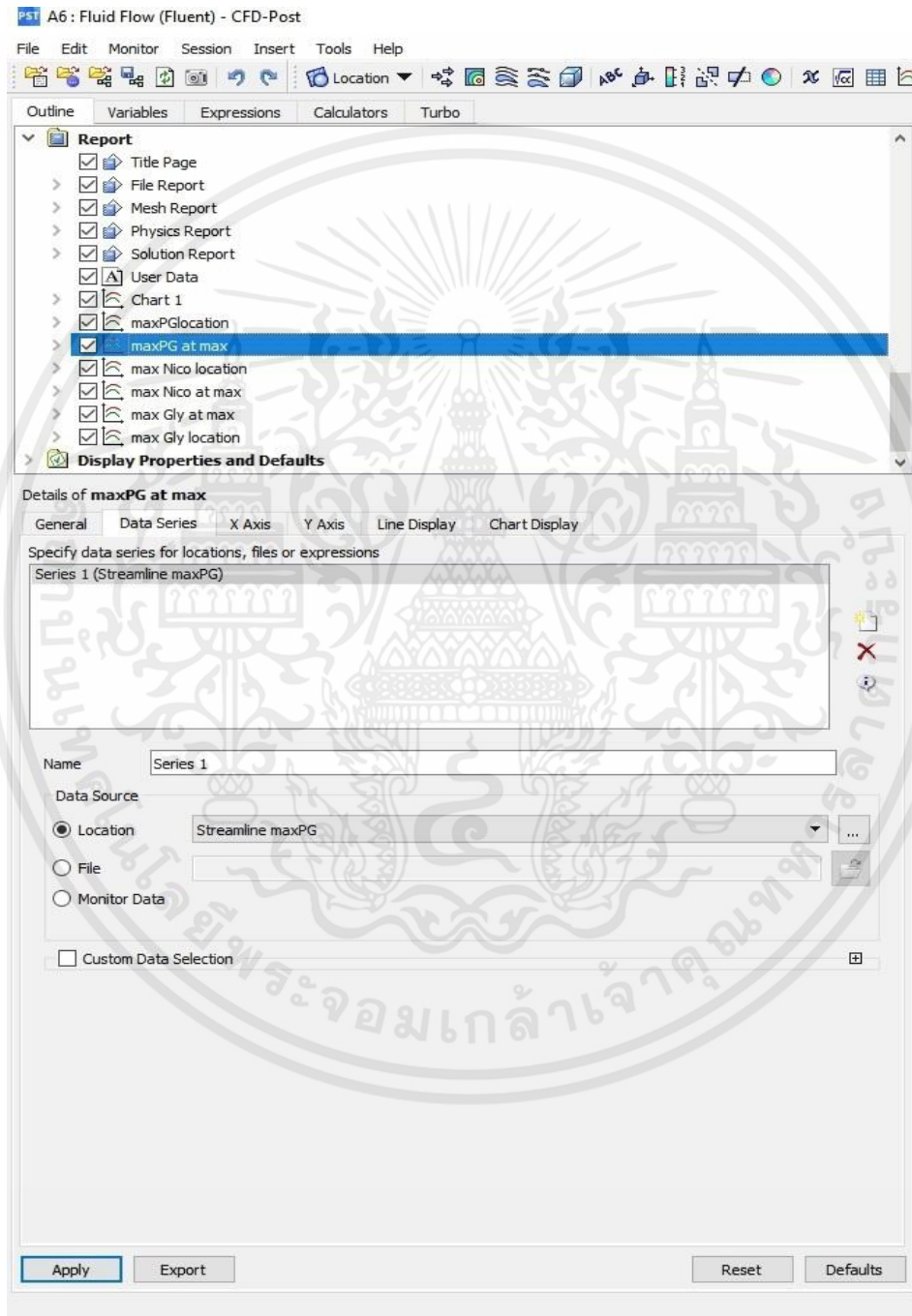
รูปที่ 31 การระบุแกนของกราฟเพื่อหาตำแหน่งของสารที่ต้องการ

เมื่อได้กราฟแล้วต้องทำการกำหนดชนิดแกนของกราฟ โดยไปที่ Outline -> Report -> MaxPGlocation (ในที่นี้คือการเลือกสารที่กำหนด Steam line มาแล้ว) -> Data Series -> X Axis (เลือกแกน) -> Variable (ในที่นี้กำหนดให้ให้แกน X คือ time on Steam line) -> Y Axis (ในที่นี้ เลือก X คือให้แปรผันตามเวลา) -> Apply เป็นอันเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3.2 การสร้างกราฟเพื่อหาปริมาณสารสูงสุดในช่วงเวลาที่กำหนด

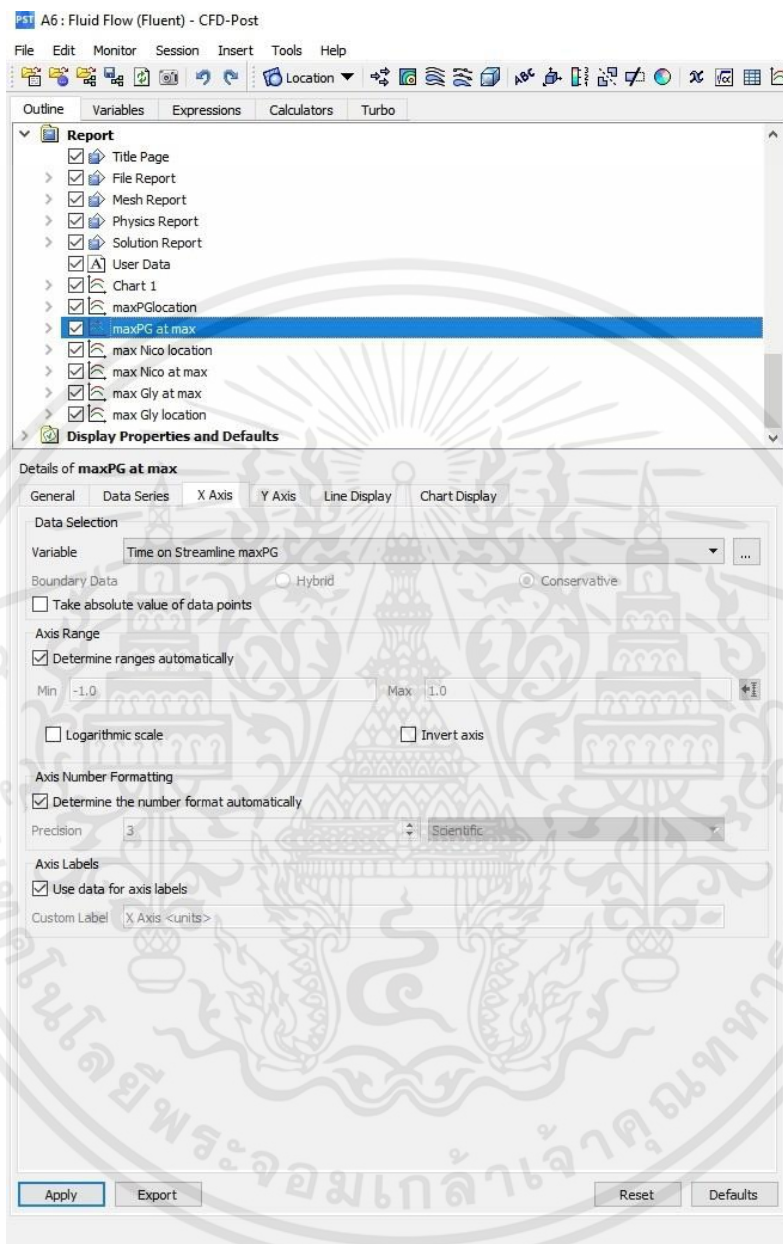
ในขั้นตอนนี้ เป็นการสร้างกราฟเพื่อหาปริมาณสารสูงสุดที่ต้องการในแต่ละเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นปริมาณสูงสุดในแต่ละเวลาที่กำหนด โดยสามารถทำได้ตามรูปด้านล่าง ดังนี้



รูปที่ 32 ขั้นตอนการเลือกสารที่ต้องการแสดงปริมาณสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

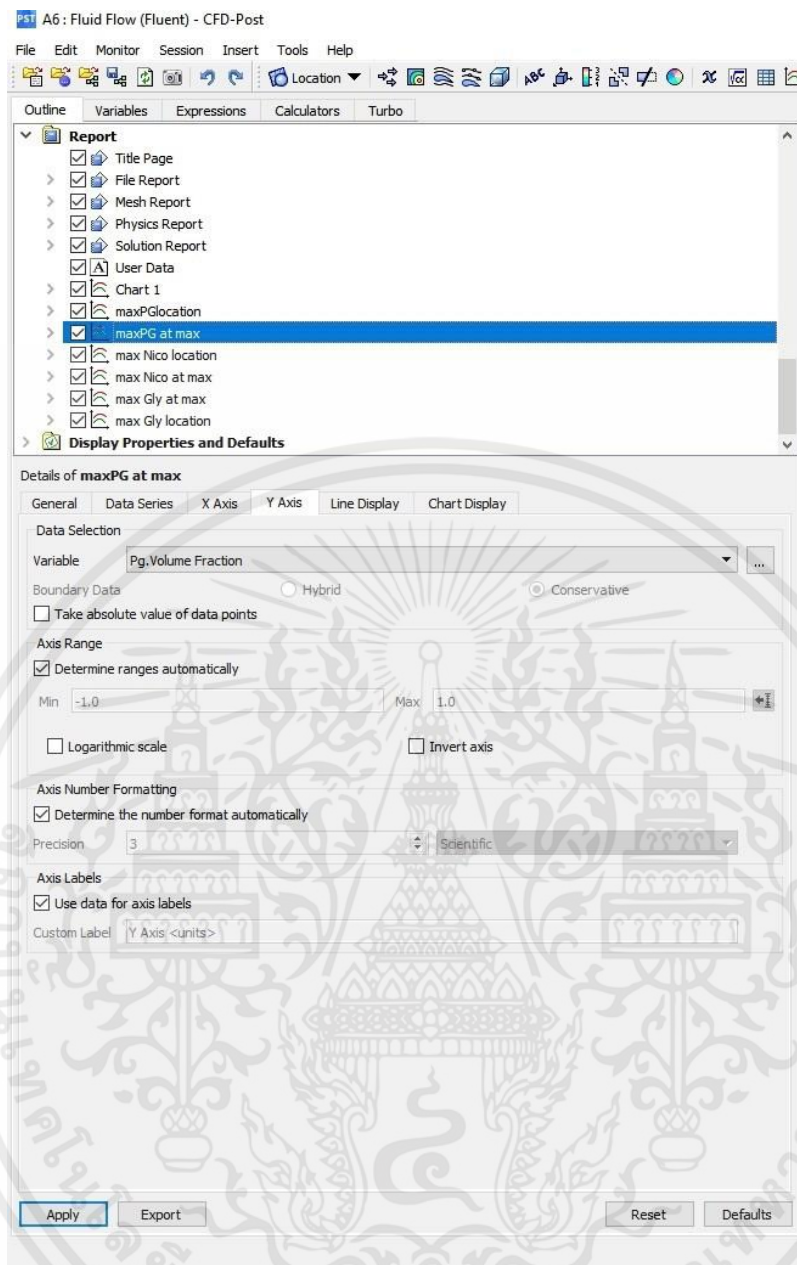
จากรูปที่ 32 จะเห็นว่า ต้องทำการเลือก Outline -> Report -> maxPG at max (เลือกสาร) -> Location -> Apply



รูปที่ 33 การปรับค่าในแกน X ของสารที่กำหนด

เมื่อทำการเลือกสารที่ต้องการแสดงผลแล้ว ให้ทำดังนี้คือ X axis (เลือกแกน) -> Variable (ในที่นี้เลือกให้แกน X เป็น Time on Steam line maxPG -> Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 การปรับค่าในแกน Y ของสารที่กำหนด

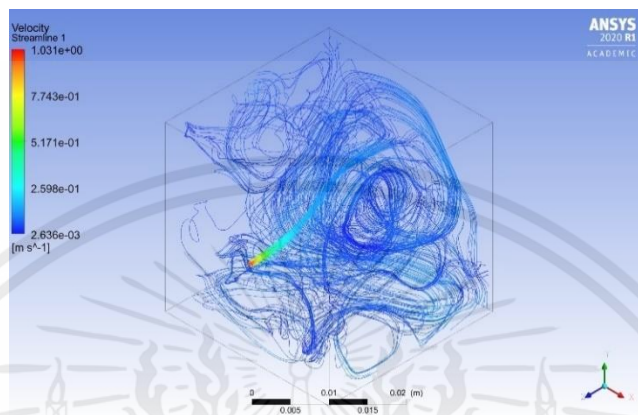
สามารถปรับค่าได้ดังนี้ Y axis (เลือกแกน) -> Variable (ในที่นี้เลือกให้แกน Y เป็น Volume Fraction เพื่อบ่งบอกถึงสัดส่วนโดยปริมาตรของสาร) -> Apply เป็นอันเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

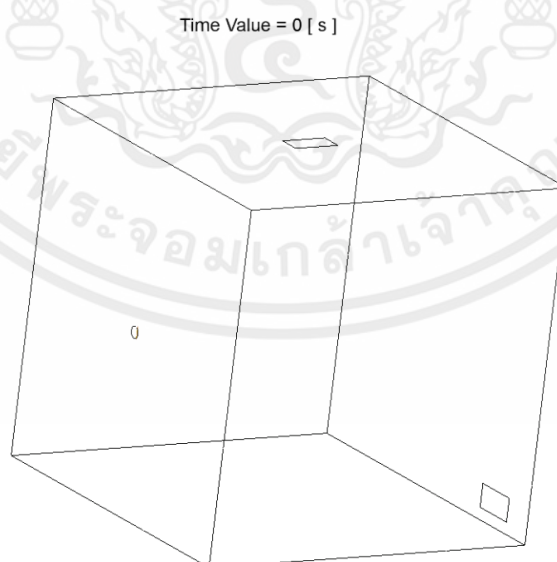
4.1 ทดสอบแบบจำลองที่ได้กับการไหลของอากาศธรรมชาติ



รูปที่ 35 ภาพจำลองการไหลของอากาศ (Stream line)

เริ่มแรกได้จำลองการเคลื่อนที่ของอากาศในสภาวะปกติ พบว่ามีการกระจายตัวแบบมีทิศทางไม่แน่นอน ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับความเป็นจริง

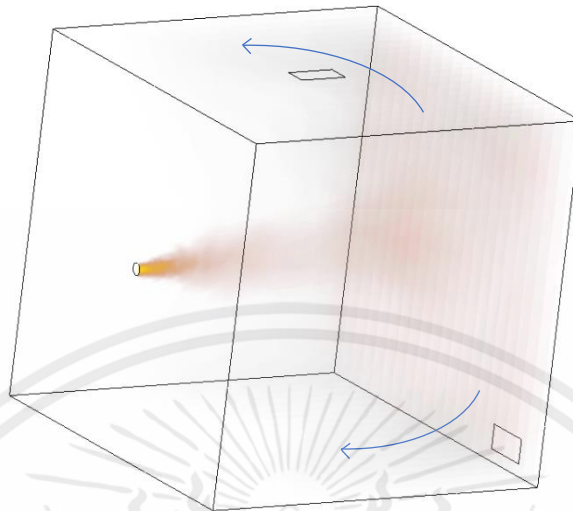
4.2 การกระจายตัวของสารชนิดต่าง ๆ ในควันทูบหรือไฟฟ้า



รูปที่ 36 ที่เวลา 0 วินาที ยังไม่ได้ทำการใส่สารเข้าไปในห้องจำลอง

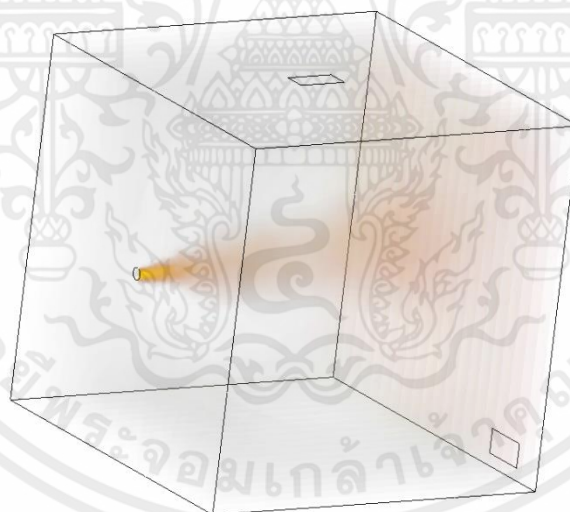
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time Value = 1.00006 [s]



รูปที่ 37 ที่เวลา 1 วินาที พบว่า PG (สีเหลือง) ยังกระจุกตัวอยู่ใกล้ทางเข้า ส่วน Nicotine (สีแดง) แผ่กระจายคลุมทั่วผนังของห้องจำลอง ส่วนของผสมที่มี Nicotine ปนอยู่น้อย(สีด้าออกเขียว) เริ่มกระจายไปตามลูกศร

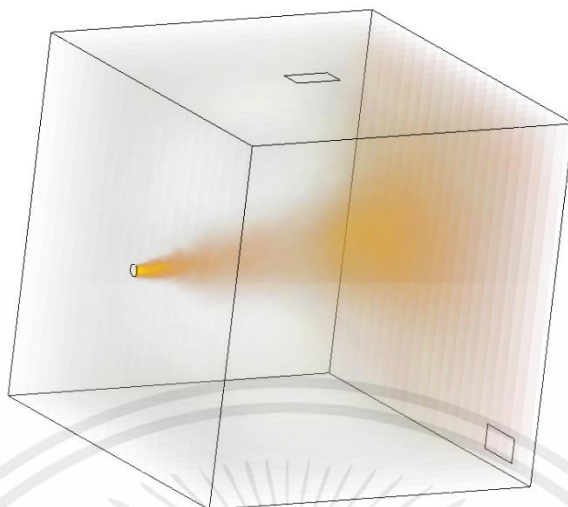
Time Value = 2.0001 [s]



รูปที่ 38 ที่ 2 วินาที พบว่า PG (สีเหลือง) เริ่มแพร่กระจายไปตาม Nicotine มากขึ้น สังเกตได้จากสีที่เริ่มเปลี่ยนเป็นสีส้มมากขึ้น (เกิดจากสีเหลืองของ PG + สีแดงของ Nicotine) ในขณะที่ของผสมที่มี Nicotine ปนอยู่น้อย (สีด้าออกเขียว) แพร่กระจายออกไปทั่วห้องแล้ว

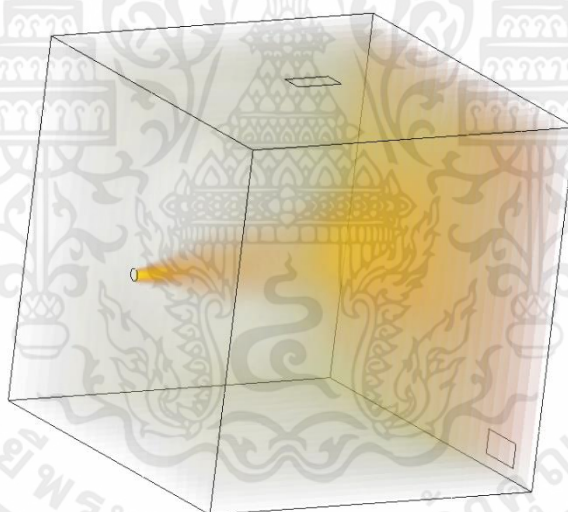
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time Value = 3.00007 [s]



รูปที่ 39 ที่ 3 วินาที มีสารไหลออกมาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ PG (สีเหลือง)

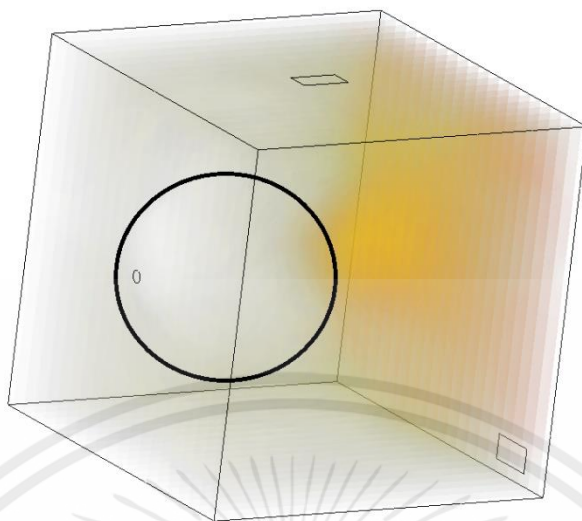
Time Value = 5 [s]



รูปที่ 40 รูปที่เวลา 5 วินาที ซึ่งจะเห็นของผสม(สีดำออกเขียว) เยอะขึ้น เนื่องจาก Nicotine ที่มีสีแดงน้อยลง และเป็นเวลาสุดท้ายที่ปล่อยสารเข้าไป

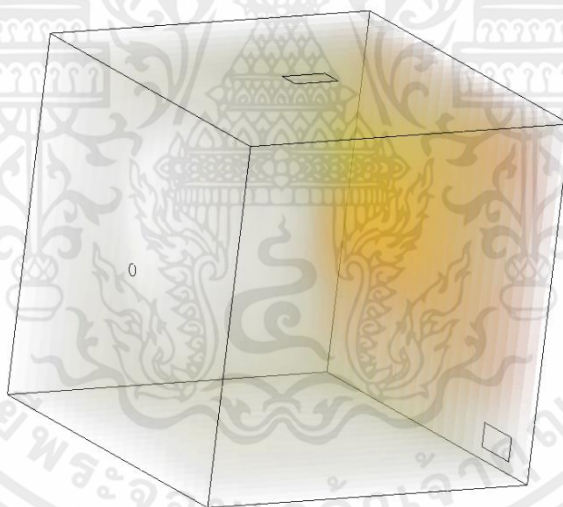
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time Value = 10 [s]



รูปที่ 41 ที่ 10 วินาที ในวงกลมสีดำเริ่มถูกแทนที่ด้วยอากาศ

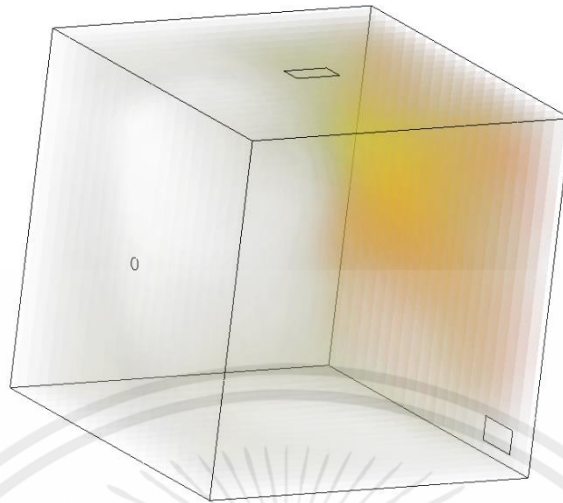
Time Value = 30.0001 [s]



รูปที่ 42 ที่ 30 วินาที บริเวณช่องทางออกด้านล่างเริ่มมีสารน้อยลง

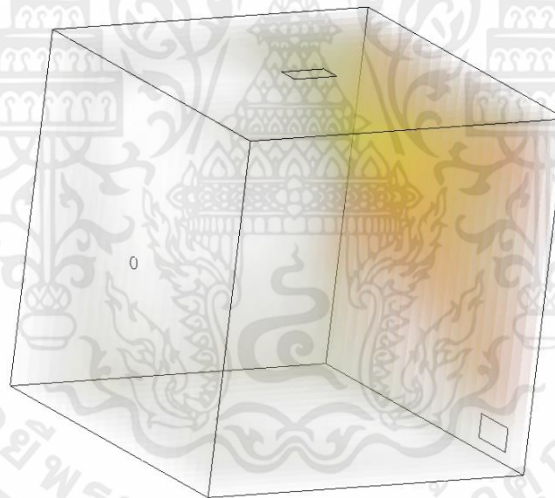
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time Value = 60.0001 [s]



รูปที่ 43 ที่ 60 วินาที สารต่าง ๆ เริ่มไหลขึ้นทางออกด้านบน

Time Value = 100 [s]

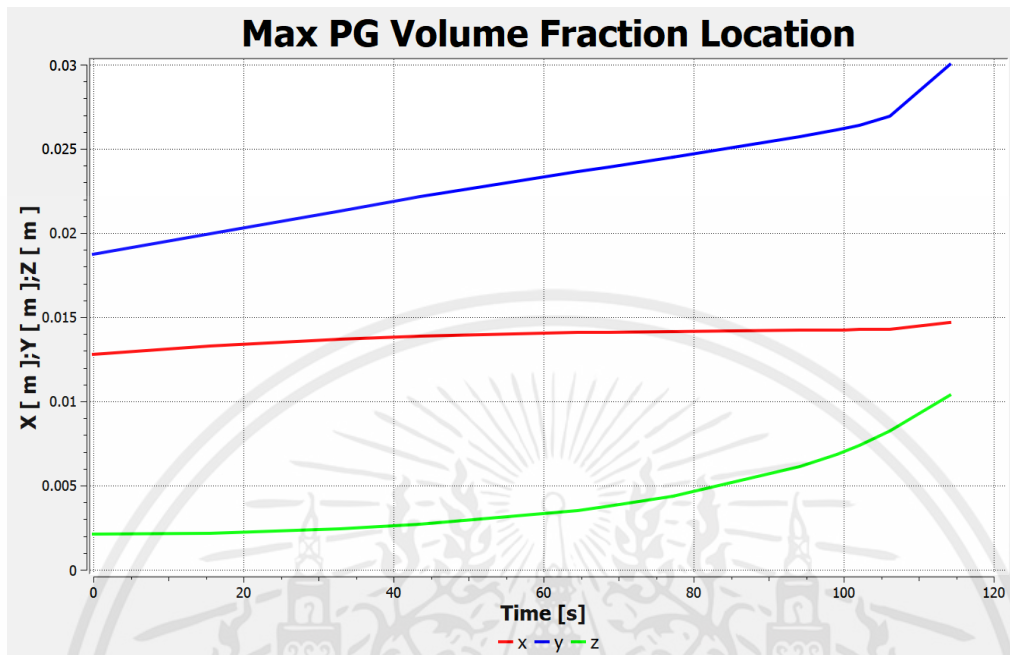


รูปที่ 44 ที่เวลา 100 วินาที เป็นช่วงเวลาสุดท้ายของการคำนวณ สารไปกระจุกตัวอยู่ที่มุมตรงข้ามกับทางเข้ามากที่สุด

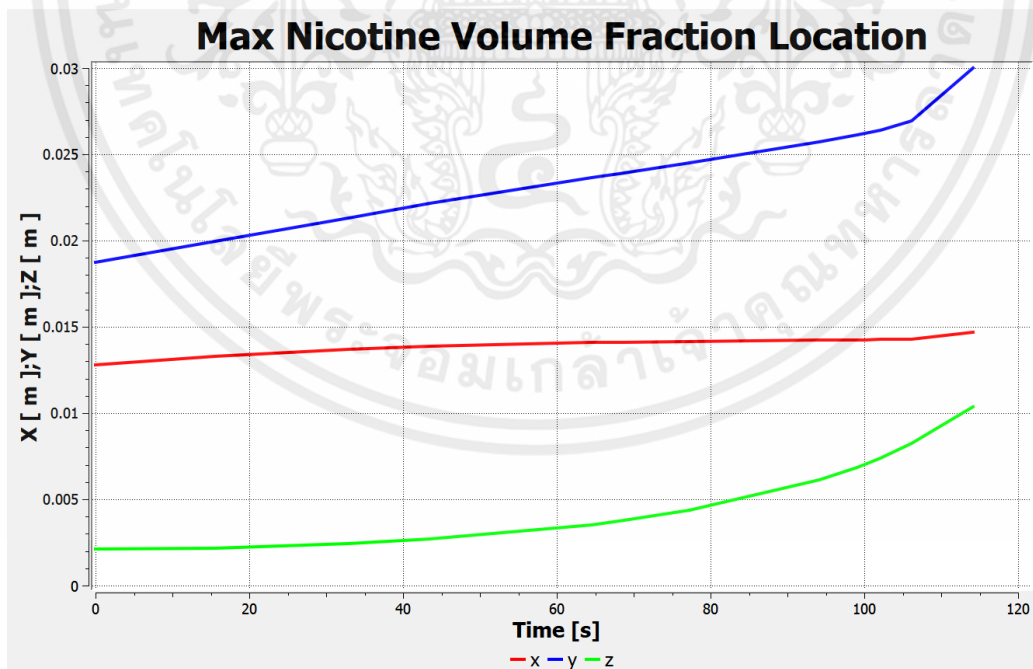
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กราฟ

4.3.1 กราฟแสดงตำแหน่งของสารชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา

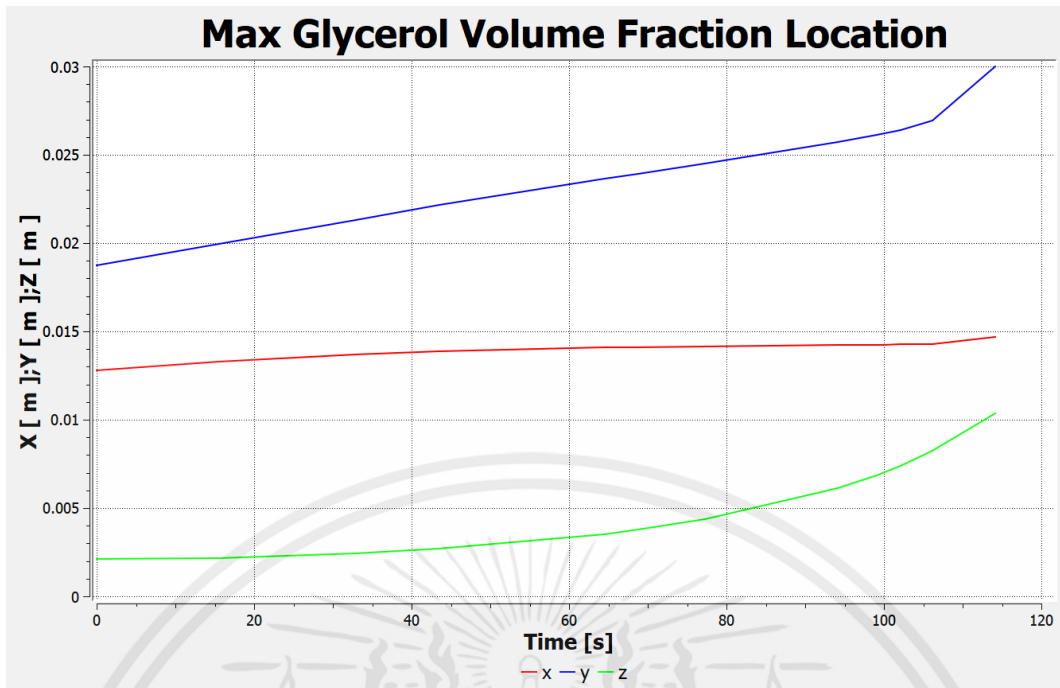


รูปที่ 45 กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ PG ในแต่ละช่วงเวลา โดยเส้นสีแดง คือพิกัดแกน X เส้นสีน้ำเงิน คือแกน Y และเส้นสีเขียว คือแกน Z หน่วยเป็น เมตร ในระบบพิกัดฉาก



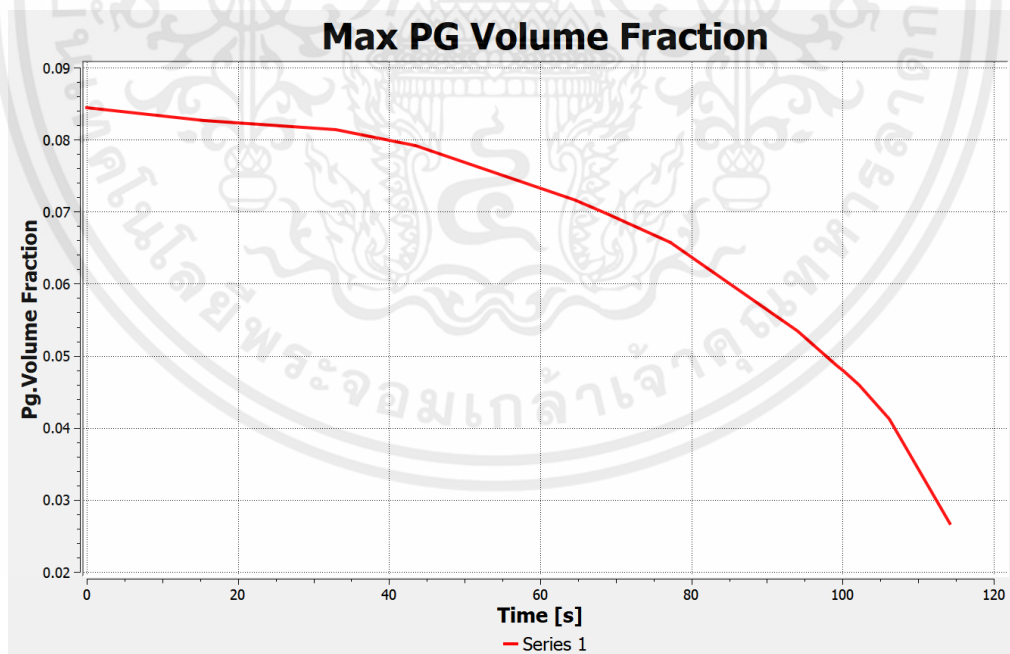
รูปที่ 46 กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ Nicotin ในแต่ละช่วงเวลาโดยเส้นสีแดง คือพิกัดแกน X เส้นสีน้ำเงิน คือแกน Y และเส้นสีเขียว คือแกน Z หน่วยเป็น เมตร ในระบบพิกัดฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



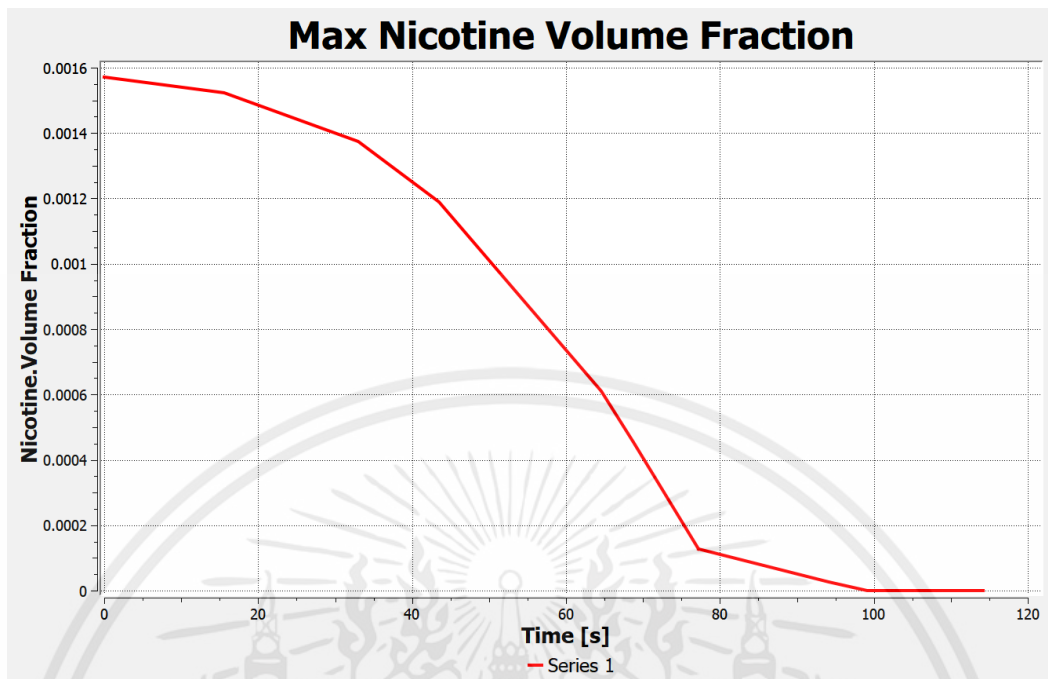
รูปที่ 47 กราฟแสดงตำแหน่งปริมาณสูงสุดของ Glycerol ในแต่ละช่วงเวลา

4.3.2 กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของสารชนิดต่างๆ ในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนด

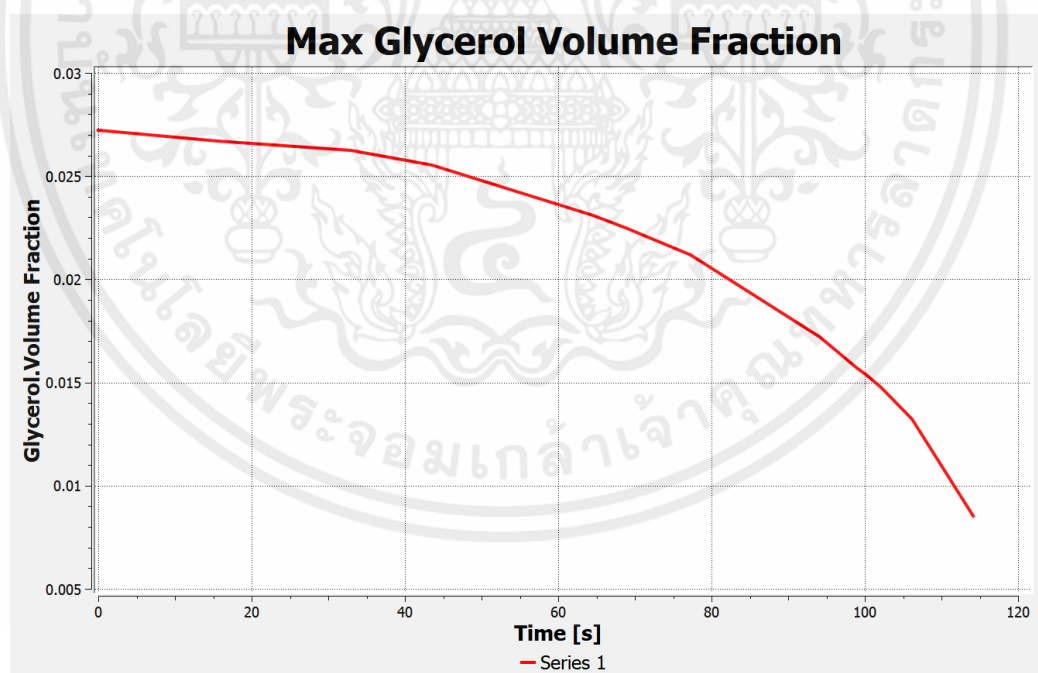


รูปที่ 48 กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ PG ในแต่ละช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 49 กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ Nicotin ในแต่ละช่วงเวลา

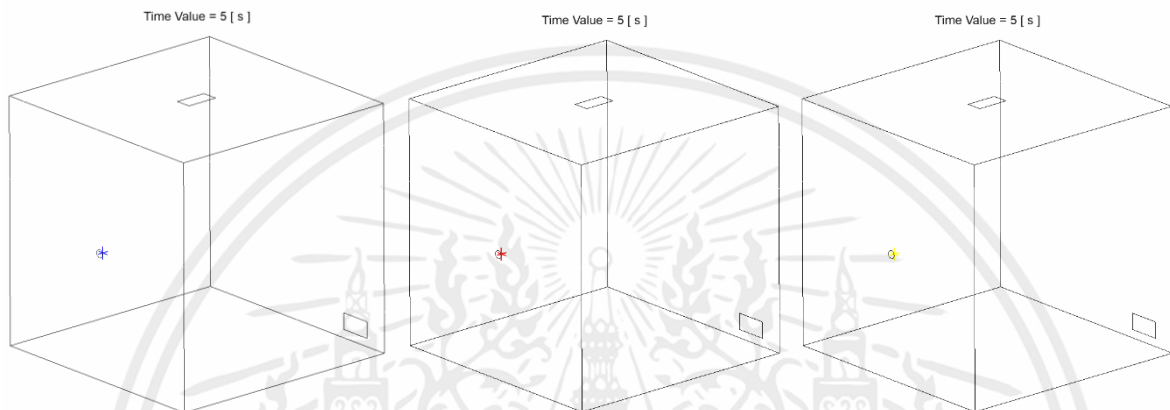


รูปที่ 50 กราฟแสดงปริมาณสูงสุดของ Glycerol ในแต่ละช่วงเวลา

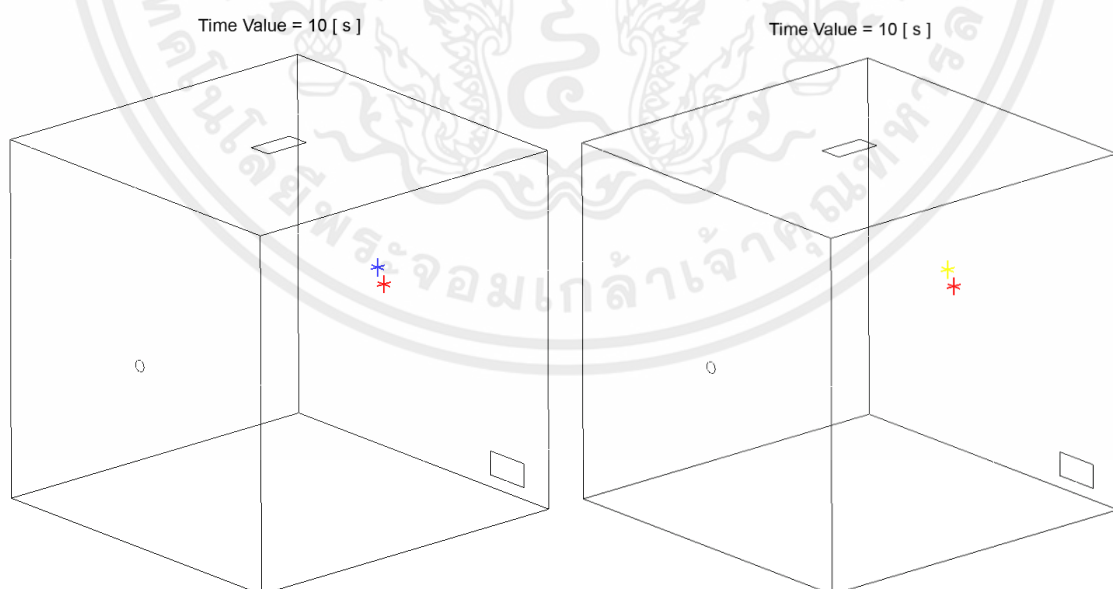
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่ปริมาณสารสูงสุด

ในแผนภาพจะใช้สีจากรูปที่ 24 คือ PG เป็นสีเหลือง, Nicotine เป็นสีแดง และ Glycerol เป็นสีน้ำเงิน และในบางเวลา ตำแหน่งที่ปริมาณสารสูงสุดจะอยู่ที่จุดเดียวกันจึงเห็นว่ามันซ้อนกันเป็นจุดเดียว เช่น ณ วินาทีที่ 5, 60 และ 100 ทั้งนี้สามารถหาตำแหน่งของปริมาณสารสูงสุดแต่ละชนิดในเวลาที่แตกต่างกันได้ในบทที่ 3 และ 4 ของการทดลอง

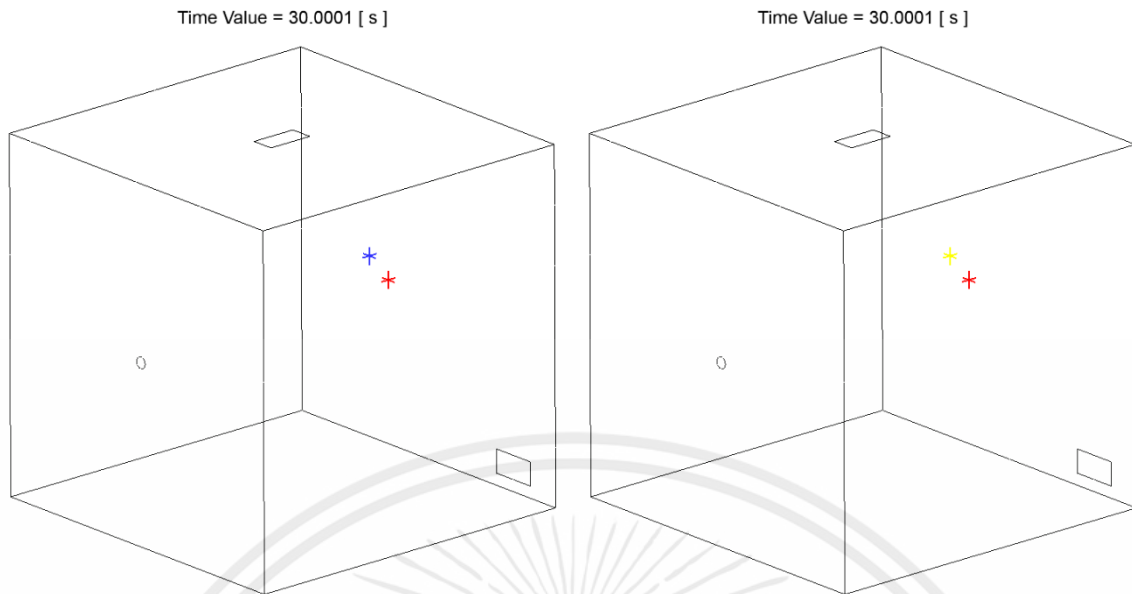


รูปที่ 51 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 5 แยกรูปให้เห็นว่ามีสารทั้ง 3 สารซ้อนกันอยู่

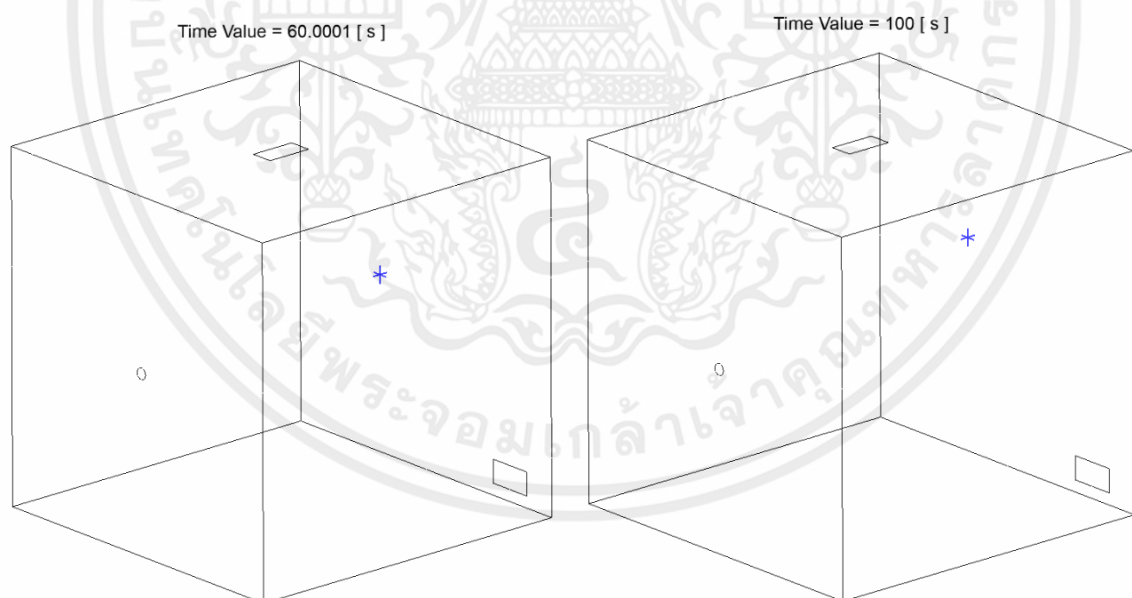


รูปที่ 52 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่ 10 แยกรูปให้เห็นว่า Glycerol กับ PG ซ้อนกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 53 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่30 แยกรูปให้เห็นว่าGlycerol กับ PG ซ้อนกันอยู่

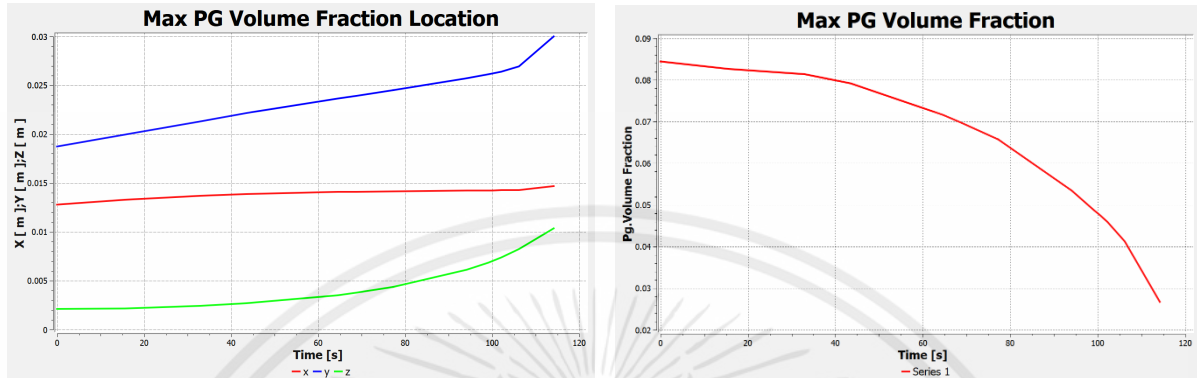


รูปที่ 54 แผนภาพจำลองแสดงตำแหน่งที่วินาทีที่60 และ 100 ทั้ง3สารซ้อนกันเลยเห็นเป็นจุดเดียว

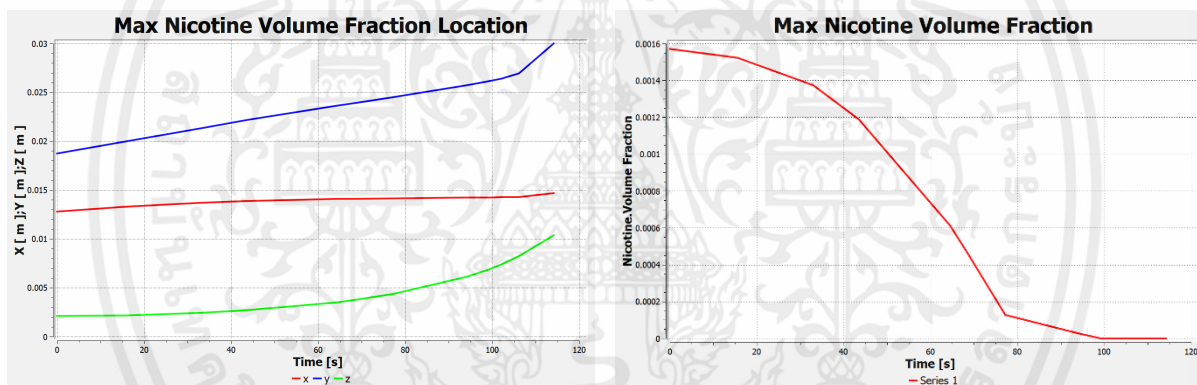
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟ

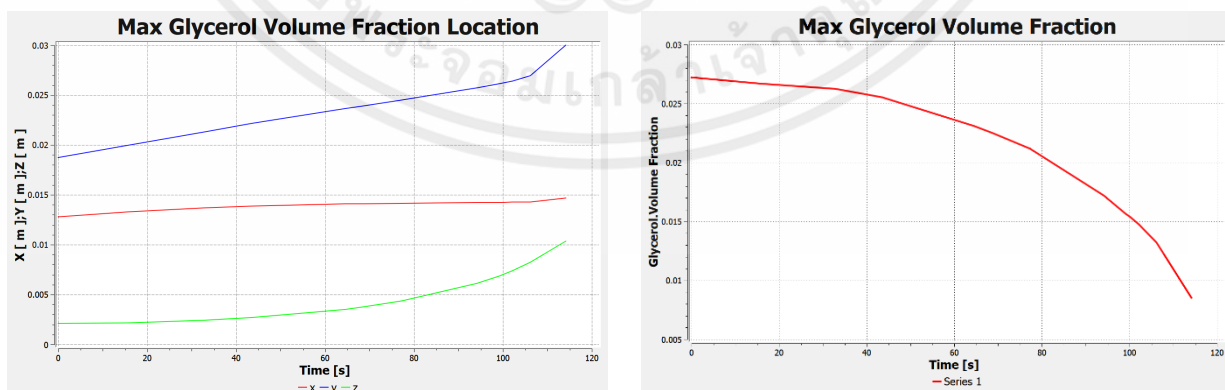
4.5.1 การระบุตำแหน่งและปริมาณสารของ PG



รูปที่ 55 กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร PG



รูปที่ 56 กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร Nicotin



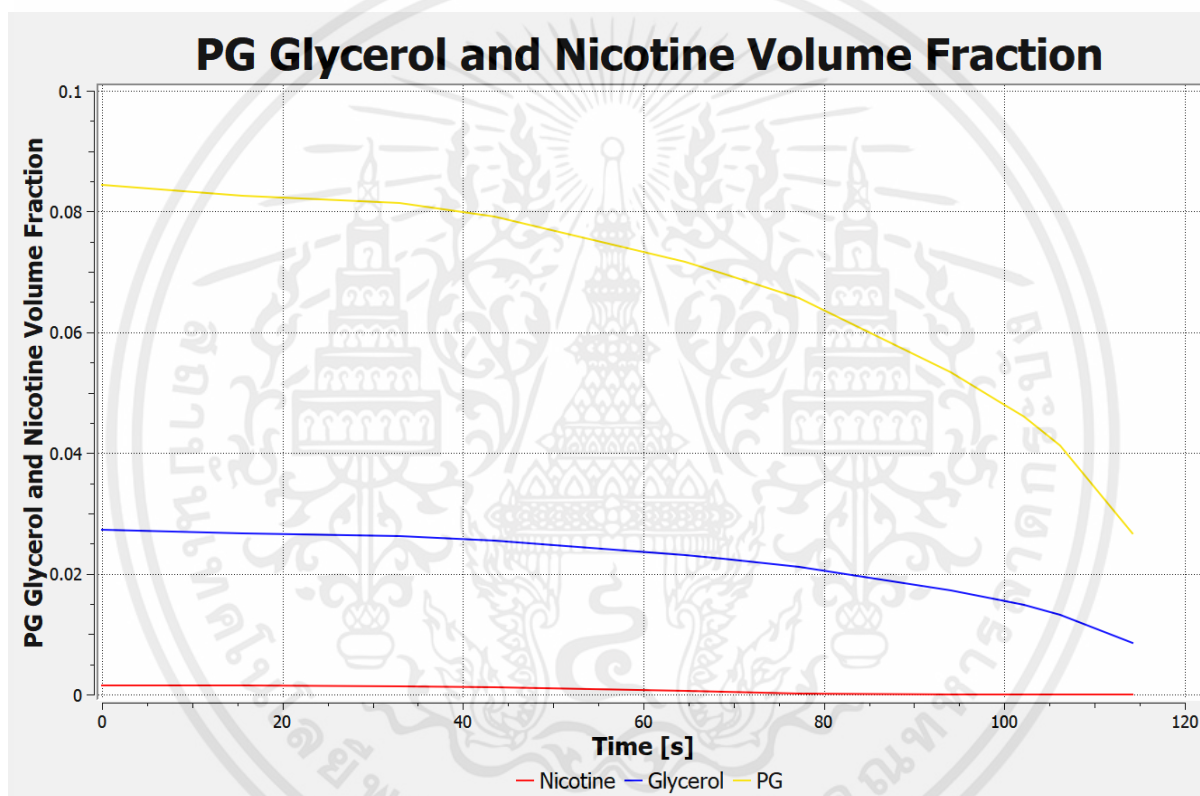
รูปที่ 57 กราฟตำแหน่งและปริมาณสาร Glycerol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟตำแหน่งและปริมาณของ PG Nicotine และ Glycerol จะเห็นว่า ปริมาณสารสูงสุดคืออยู่ในช่วง 0-20 วินาทีแรก และอยู่ในตำแหน่งพิกัด (0.013,0.019,0.002) m ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนโดยมวลแตกต่างกัน ดังนี้คือ 0.084 0.00157 และ 0.00153 ตามลำดับ

4.5.2 การกระจายตัวของสารต่างๆ

เราสามารถดูจาก Volume Fraction ของสารได้ โดยถ้า Volume Fraction ของสารมากก็แปลว่าในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรยังมีสารอยู่มาก หรือก็คือสารยังรวมตัวกันมากหรือกระจายตัวน้อยนั่นเอง โดยแสดง Volume Fraction ของสารทั้งสามชนิดได้ดังกราฟ



รูปที่ 58 กราฟแสดงปริมาณของทั้ง3สารชนิดในแต่ละช่วงเวลา โดยเส้นสีแดง คือ Nicotin สีน้ำเงินคือ Glycerol และสีเหลือง คือ PG

จากกราฟจะเห็นได้ว่า PG และ Glycerol มีการกระจายตัวได้ดีกว่า Nicotine โดยดูได้จากความชันของกราฟ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า เส้นสีเหลืองคือ PG มีความชันสูงที่สุด จะมีการกระจายตัวมากที่สุด รองลงมาคือเส้นสีน้ำเงิน หรือ Glycerol มีความชันสูงเป็นอันดับสอง มีการกระจายตัวรองลงมาจาก PG และสุดท้ายคือเส้นสีแดง หรือ Nicotine มีความชันต่ำที่สุด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าการกระจายตัวต่ำที่สุด

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการงานการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 จากบุหรี่ไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหล หรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยนำเสนอรูปแบบการกระจายตัวของสารในบุหรี่ไฟฟ้า ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Ansys เป็นหลัก อีกทั้งยังได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง มาจากการสูบบุหรี่ไฟฟ้าจริง โดยใช้เครื่องวัด PM 2.5 สองเครื่องคือ Xiaomi Smart Mi และ Formaldehyde Collector เพื่อทำการหาค่าที่แม่นยำที่สุด และมีการใช้ค่าบางตัวจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์ไปแล้ว เนื่องจากอุปกรณ์ในการวัดไม่เพียงพอ อีกทั้งยังเป็นการเปรียบเทียบเพื่อสร้างความแม่นยำในการจำลองขึ้นมา ให้เหมือนจริงมากที่สุด

การทดลองในส่วนแรกคือ การทดลองทางปฏิบัติจริงเพื่อหาค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรมคือ อัตราเร็วของอากาศ อัตราเร็วของควันบุหรี่ไฟฟ้า และปริมาณของฝุ่น PM 2.5 จากเครื่องวัดฝุ่นที่กล่าวไปข้างต้น โดยทำการเป่าใส่ห้องปิด และวัดค่าที่ได้ตามมา ผลที่ได้จากการทดลอง ได้นำไปใช้ในการทดลอง ในส่วนที่สองคือการสร้างแบบจำลองขึ้นมา โดยมี ขนาดของห้องอยู่ที่ 30x30x30 มิลลิเมตร โดยเริ่มแรกได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศก่อน เพื่อดูความสมเหตุสมผล จากนั้นจึงลงมือสร้างแบบจำลอง ค่าต่าง ๆ ตามงานวิจัยที่ตีพิมพ์เพื่ออ้างอิงความถูกต้องและแม่นยำ และสนใจเพียง PM 2.5 ที่เกิดขึ้นเท่านั้น ผลปรากฏว่า สารที่ทำให้เกิด PM 2.5 มีอยู่ สามชนิดหลักๆ คือ PG, Nicotine และ Glycerol ซึ่งเมื่อจำลองแล้ว เห็นเป็นภาพที่ชัดเจนว่า ลำดับการกระจายตัวของ PM 2.5 ในบุหรี่ไฟฟ้าเป็นอย่างไร เริ่มจาก PG และ Glycerol มีการกระจายมากกว่า Nicotine อีกทั้งจากแบบจำลองเห็นได้ว่า สารที่แพร่กระจายได้ทั่วถึงห้องได้คือ PG ซึ่งผสมกับ Glycerol ในตอนแรกเริ่ม และในช่วงสุดท้ายสารไปกระจุกอยู่ที่มุมตรงข้ามกับทางเข้ามากที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟตำแหน่งของสารที่กระจุกตัวมากที่สุดในช่วงสุดท้ายของการทดลอง จะพบว่า สารทั้งสามชนิดกระจายตัวอยู่ที่บริเวณพิกัด (0.015,0.03,0.01)m ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากบริเวณที่สารทั้งสามชนิดมีปริมาณสูงสุดในช่วงแรกคือเป็นช่วงที่เริ่มทำการปล่อยควันเข้าไป ซึ่งตรงกับพิกัด(0.013,0.019,0.002)m ซึ่งเป็นจุดที่กำหนดให้ควันเริ่มแพร่เข้าไปในห้องจำลอง

จากภาพที่ได้จากการทดลองโครงการงานการศึกษานี้ เราไม่สามารถคาดการณ์ตำแหน่งที่สารไปกองที่จุดนั้นๆ ได้ล่วงหน้าเนื่องจากการกระจายตัวของควันบุหรี่ไฟฟ้ามืดทึบทางไม่แน่นอน แต่ในการจำลอง เราสามารถระบุตำแหน่งที่สารนั้นมีการกระจายตัวผ่านไปแล้วได้ ทำให้ทราบจุดที่สารนั้นกองอยู่ในแต่ละตำแหน่งตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จนถึงเวลาสุดท้ายที่กำหนดได้ทำให้ผู้ที่สนใจได้หรือผู้ที่ต้องการทราบปริมาณของสารแต่ละชนิดและหาตำแหน่งการแพร่กระจายของสารหรือมลพิษต่าง ๆ สามารถติดตั้งระบบปรับอากาศหรือเครื่องกรองอากาศได้ตรงจุดเพื่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์และการกำจัดควันได้ทันทั่วทั้งที่และยังสามารถมองเห็นภาพของการกระจายตัวของสาร PM 2.5 ในบุหรี่ไฟฟ้า และจำแนกได้ด้วยโปรแกรมแบบจำลอง ซึ่งสามารถศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปรับเปลี่ยนได้ตามสภาพแวดล้อม หรือปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งนำไปต่อยอดโครงการการศึกษาอื่นได้ต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เรื่องการยืมอุปกรณ์วัดฝุ่น PM 2.5 DUSTTRAK II

เนื่องจากทางมหาวิทยาลัยมีอุปกรณ์ในการวัดฝุ่น PM 2.5 ที่ได้มาตรฐานแต่น่าเสียดายที่ทางมหาวิทยาลัยไม่ได้ให้การยืมอุปกรณ์ชุดนี้ โดยทาง SCiRA ที่เป็นหน่วยงานดูแลเครื่องวัดฝุ่น DUSTTRAK II ได้บอกเหตุผลว่า สามารถใช้ได้เฉพาะเพียงวัดฝุ่น PM ในอากาศภายนอกอาคารเท่านั้น ซึ่งผู้วิจัยได้ไปศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องวัดฝุ่น DUSTTRAK II นี้ ซึ่งทราบว่าตัวเครื่องนี้มีความสมบูรณ์ในการตรวจวัดความเข้มข้นของอนุภาคในบรรยากาศแบบอ่านค่าได้ทันทีโดยสามารถรายงานผลค่าปริมาณฝุ่นในสถานประกอบการและสิ่งแวดล้อมได้ทันที ช่วยในการแก้ไขหน้างานได้อย่างรวดเร็วไม่ต้องรอผลการวิเคราะห์ ตรวจวัดได้ทั้ง Dust, Smoke, Fume, Mist สามารถทำงานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผู้วิจัยเสียเวลาในการยืมอุปกรณ์ถึงสองสัปดาห์ อีกทั้งเสียกำลังใจ ที่ผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในการใช้อุปกรณ์เครื่องนี้ดี ไม่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนงานวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาตรีของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงมีความเห็นให้หน่วยงาน SCiRA คอยช่วยเหลือให้นักศึกษารุ่นถัดไปหากนักศึกษารุ่นถัดไปต้องการใช้เครื่องวัด PM 2.5 DUSTTRAK II เพื่อความสะดวกในการทำการทดลองของนักศึกษา และควรให้คำแนะนำนักศึกษาในการทดลอง

5.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสร้างแบบจำลอง

เนื่องจากการสร้างโมเดลในการจำลองการกระจายตัวของฝุ่น PM 2.5 จากบูหรี่ไฟฟ้าขึ้นมานั้น มีความละเอียดและบางค่า อุปกรณ์ที่ผู้วิจัยใช้ในการวัดปริมาณฝุ่น PM 2.5 ไม่สามารถแสดงรายละเอียดได้ทั้งหมด ผู้วิจัยจึงได้เทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งถูกตีพิมพ์แล้ว เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali A.Rostamia, Samuel Agyenmangb, Yezdi B.Pithawalla (2018). A distributed computational model for estimating room air level of constituents due to aerosol emission from e-vapor product use, [online]
HRL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691518302229>
- [2] Ansys Fluent 12.0 Theory (2010).Volume Fraction Equation.ค้นเมื่อ 9 กันยายน 2563,[online]
HRL: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node321.htm>
- [3] Erdinc Nayir, Burak Karacabey,Onder Kirca,Mustafa Ozdogan (2016). Electronic cigarette (e-cigarette),[online]
HRL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452336416300188>
- [4] Th.unionpedia.org (2020).สมการนาเวียร์-สโตกส์.ค้นเมื่อ 11 กันยายน 2563,[online]
HRL : <https://th.unionpedia.org/สมการนาเวียร์-สโตกส์>
- [5] Top Rated Store (2019) ดิจิตอล PM 2.5 Air เครื่องตรวจจับ HCHO TVOC PM 1.0 PM 10 Formaldehyde เครื่องตรวจจับเครื่องวิเคราะห์ก๊าซคร่าวเรือน 1.0 2.5 10 air monitor , [online]
HRL : <https://th.aliexpress.com/item/32826635479.html>
- [6] Xiaomi Thailand (2019). เครื่องวัดฝุ่น Xiaomi Smart Mi PM 2.5 Monitor, [online]
HRL : <https://shopee.co.th/product/12857317/1949011705>