สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

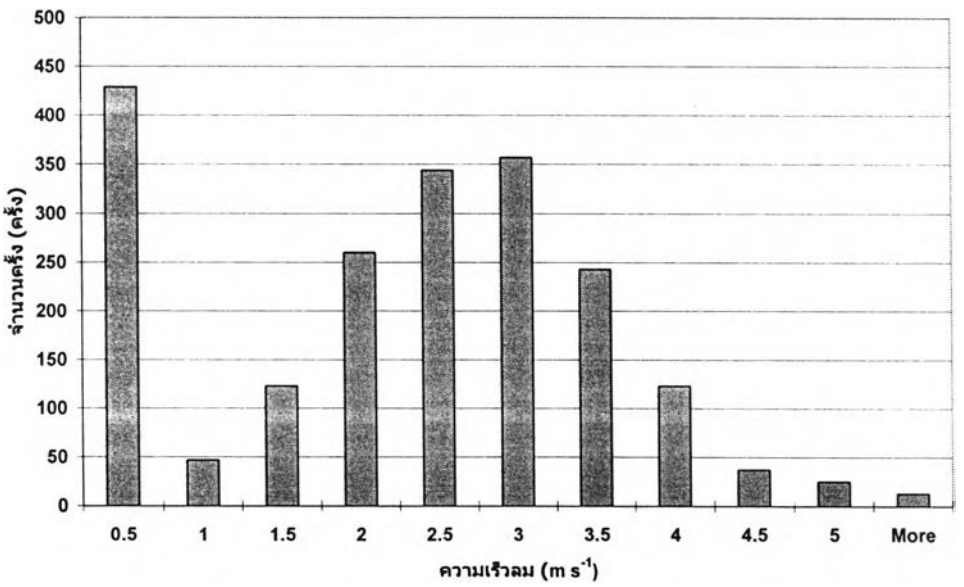
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

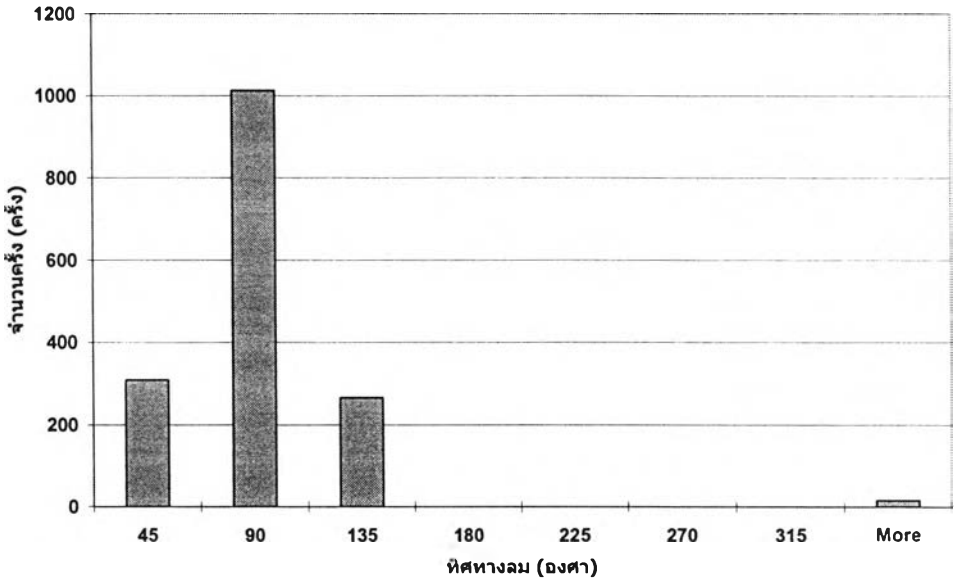
4.1 ข้อมูลเบื้องต้น

4.1.1 ลักษณะอุตุนิยมวิทยา

การเก็บตัวอย่าง ระหว่างวันที่ 14 ตุลาคม 2547 ถึงวันที่ 2 ธันวาคม 2547 พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าว มีค่าความเร็วลมเฉลี่ย 2.08±1.26 เมตรต่อวินาที ค่าความเร็วลมที่พบมากที่สุดคือ ความเร็วลมน้อยกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที โดยค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6.30 เมตรต่อวินาทีและมีค่าความเร็วลมต่ำสุด เท่ากับ ต่ำกว่า 0.50 เมตรต่อวินาที ส่วนทิศทางลมที่วัดได้อยู่ระหว่าง 0 - 355 องศา ทิศทางที่ลมพัดมา(blowing from) ส่วนมาก คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งทิศทางที่ลมพัดมามากที่สุด อยู่ในช่วง 45 - 90 องศา ความเร็วลมและทิศทางลมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 ความเร็วลมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 4.2 ทิศทางลมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

ในแต่ละวันที่ทำการศึกษาในช่วงวันที่ 14 ตุลาคม 2547 ถึงวันที่ 2 ธันวาคม 2547 พบว่า ความเร็วลมและทิศทางลมในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากัน โดย ในวันที่ 29 ตุลาคม 2547 มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยสูงที่สุด คือ 3.18 ± 0.86 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางลมเฉลี่ยเท่ากับ 72.02 ± 19.39 องศา ส่วนในวันที่ 30 พฤศจิกายน 2547 มีค่าความเร็วลมเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 1.01 ± 1.12 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางลมเฉลี่ยเท่ากับ 86.67 ± 78.14 องศา ข้อมูลความเร็วลมและทิศทางลมเฉลี่ยรายวันแสดงดังตารางในภาคผนวก ก ซึ่งความเร็วลมและทิศทางลมที่แตกต่างกัน จึงทำให้อัตราการระบายอากาศในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันไปด้วย

4.1.2 การระบายอากาศ (ventilation)

จากการเก็บตัวอย่างอัตราการระบายอากาศ (Air Exchange Rate : AER) จำนวนทั้งสิ้น 97 ตัวอย่าง จำแนกตามเงื่อนไขลักษณะภายในอาคาร คือ

1) การเปิดหน้าต่างหรือช่องเปิด จำนวน 1 – 6 บาน

2) การมีมุ้งลวดหรือไม่มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง

3) ทิศทางของหน้าต่างแต่ละบาน

ดังแสดงดังตารางที่ 3.1 บทที่ 3 พบว่า ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา อัตราการระบายอากาศเฉลี่ยมีค่า 23.2 ± 14.6 ต่อชั่วโมง (h^{-1}) ค่าอัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 57.2 ต่อชั่วโมง (h^{-1}) และค่าอัตราการระบายอากาศต่ำสุดเท่ากับ 1.5 ต่อชั่วโมง (h^{-1})

การเก็บตัวอย่างอัตราการระบายอากาศจำนวน 97 ตัวอย่าง สามารถแยกปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศได้เป็น 5 กลุ่ม คือ ความเร็วลม ระดับทิศทางลม จำนวนหน้าต่าง ทิศทางของหน้าต่าง และมุ้งลวดที่หน้าต่าง

4.1.2.1 ความเร็วลม (wind speed) พบว่า ช่วงที่ทำการเก็บตัวอย่างอัตราการระบายอากาศมีค่าความเร็วลมเฉลี่ย 2.1 ± 1.0 เมตรต่อวินาที มีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.3 เมตรต่อวินาที และค่าต่ำสุด เท่ากับน้อยกว่า 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอัตราการระบายอากาศ พบว่า ความเร็วลมมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับอัตราการระบายอากาศ คือ เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น

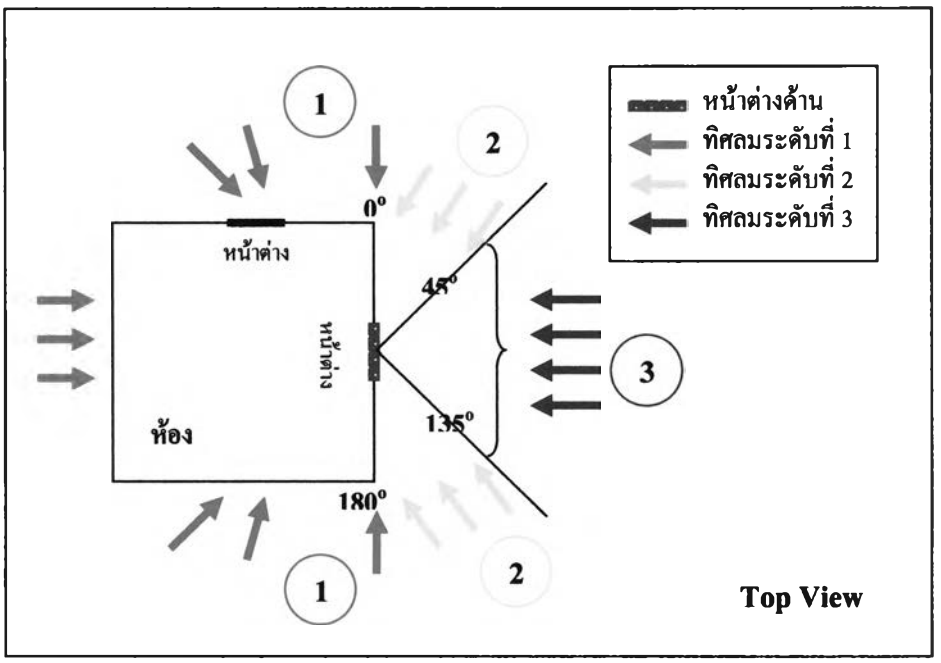
4.1.2.2 ระดับทิศทางลม (wind direct level) หมายถึง ทิศทางของลมจากภายนอกที่พัดเข้ากระทำต่อหน้าต่างหรือช่องเปิดรับลม เกิดจากการกำหนดค่าทิศทางลมจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาขึ้นใหม่ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดค่าระดับทิศทางลมขึ้น จากการพิจารณาจากทิศทางของลมที่กระทำต่อหน้าต่าง จากผลการศึกษาของมาลินี ศรีสุวรรณ (2543) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสลมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นในประเทศไทย พบว่า ทิศทางหน้าต่างควรตั้งฉากหรือทำมุมเพียงเล็กน้อยกับกระแสลมประจำปี เพื่อให้ได้รับกระแสลมอย่างเต็มที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดระดับทิศทางลมเป็น 3 ระดับ คือ

1) ระดับที่ 1 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดขนานกับบานหน้าต่าง หรือพัดทำมุม 0 องศาและ 180 องศา ซึ่งเป็นทิศทางที่ลมพัดไม่ตรงกับบานหน้าต่าง อากาศเคลื่อนที่เข้าภายในอาคารได้น้อย

2) ระดับที่ 2 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดทำมุมกับหน้าต่าง 0 ถึง < 45 องศา และพัดทำมุม > 135 ถึง < 180 องศา ซึ่งเป็นทิศทางที่ลมพัดทำมุมกับบานหน้าต่าง อากาศเคลื่อนที่เข้าภายในอาคารได้ปานกลาง

3) ระดับที่ 3 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดทำมุมกับหน้าต่าง 45 ถึง 135 องศา ซึ่งเป็นทิศทางที่ลมพัดเข้าตรงกับบานหน้าต่าง อากาศเคลื่อนที่เข้าภายในอาคารได้มาก

ในกรณีที่หน้าต่างมีมากกว่า 1 ด้าน ให้เลือกพิจารณาหน้าต่างเพียงด้านเดียวของผนังห้องให้เป็นด้านหลัก โดยเลือกจากหน้าต่างด้านที่ลมพัดทำมุมกับบานหน้าต่างในระดับที่ 3 แล้วจึงให้ค่าคะแนนทิศทางลมเท่ากับ 3 ถ้าหากพิจารณาแล้วเห็นว่าไม่มีหน้าต่างด้านใดเลยที่ทำมุมกับทิศทางลมในระดับที่ 3 จึงเลือกหน้าต่างด้านใดด้านหนึ่งที่ลมพัดทำมุมกับหน้าต่างในระดับที่ 2 แล้วให้ค่าคะแนนเท่ากับ 2 และถ้าหากพบว่า ไม่มีหน้าต่างด้านใดเลยที่ลมพัดทำมุมในระดับที่ 3 และ 2 ตามลำดับ จึงให้ค่าคะแนนระดับทิศทางลม เท่ากับ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ระดับคะแนนและทิศทางลมที่พัดกระทำต่อบานหน้าต่าง

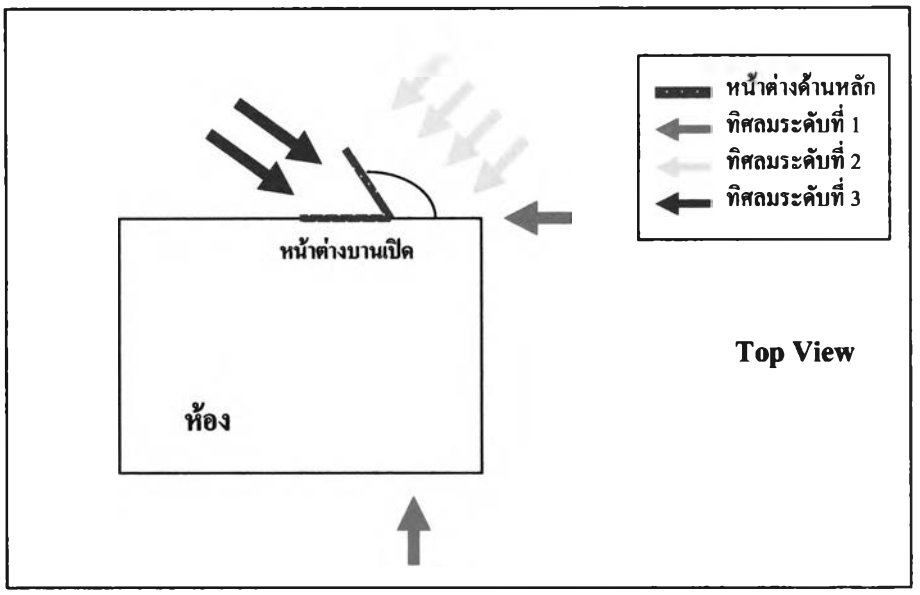
ในกรณีที่หน้าต่างเป็นบานเปิด ให้กำหนดระดับคะแนน ดังนี้

1) ระดับที่ 1 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดขนานกับบานหน้าต่าง หรือพัดทำมุม 0 องศาและ 180 องศา ซึ่งเป็นทิศทางที่ลมพัดไม่ตรงกับบานหน้าต่าง

2) ระดับที่ 2 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดทำมุมกับบานเปิดของหน้าต่าง ถึงผนังอาคาร เป็นทิศทางที่ลมพัดไม่เข้าบานหน้าต่างโดยตรง ซึ่งมีบานเปิดของหน้าต่างกีดขวางทางลมอยู่

3) ระดับที่ 3 หมายถึง ทิศทางของลมที่พัดทำเข้าช่องเปิดบานหน้าต่าง ซึ่งเป็นทิศทางที่ลมพัดเข้าบานหน้าต่างได้มาก

ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ระดับคะแนนและทิศทางลมที่พัดกระทำต่อหน้าต่างบานเปิด

ค่าเฉลี่ยระดับทิศทางลมในช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 2.3 ± 0.7 คะแนน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระดับทิศท างลมและค่าอัตราการระบายอากาศ พบว่า ระดับทิศทางลมมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับอัตราการระบายอากาศ คือ เมื่อระดับทิศทางลมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นด้วย

4.1.2.3 จำนวนหน้าต่าง (window number) หมายถึง จำนวนหน้าต่างที่สามารถเปิดออกสู่ภายนอกอาคาร ซึ่งในห้องที่ทำการศึกษามีจำนวนหน้าต่างทั้งสิ้น 6 บาน โดยมีหน้าต่างทั้ง 3 ด้านของผนังห้องเปิดสู่ภายนอกอาคาร เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน้าต่างและอัตราการระบายอากาศ พบว่า จำนวนหน้าต่างมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับอัตราการระบายอากาศ คือ เมื่อจำนวนหน้าต่างเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น

4.1.2.4 ทิศทางของหน้าต่าง (window direction) คือ การเปิดหน้าต่างแต่ละด้านของผนังห้อง เช่น เปิดหน้าต่างด้านเดียวกันของผนังห้อง เปิดหน้าต่างด้านตรงข้ามกัน หรือเปิดหน้าต่างทั้ง 3 ด้าน เป็นต้น โดยมาลินี ศรีสุวรรณ (2543) ได้ทำการศึกษาทิศทางของช่องเปิด (หน้าต่าง) พบว่า กรณีที่เปิดหน้าต่างด้านเดียว แม้จะมีหลายบานและอยู่ในทิศที่ลมเข้าปะทะโดยตรง ลมจะไม่เข้าภายในห้อง ทำให้ไม่มีการระบายอากาศ และการวางตำแหน่งหน้าต่างทางเข้าและทางออกของอาคารมีผลโดยตรงต่อการไหลของกระแสลม

ดังนั้นจึงแบ่งทิศทางการเปิดหน้าต่างออกเป็น 4 ระดับ คือ

1) ระดับที่ 1 หมายถึง การเปิดหน้าต่าง 1 ด้าน ของผนังห้อง ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 1

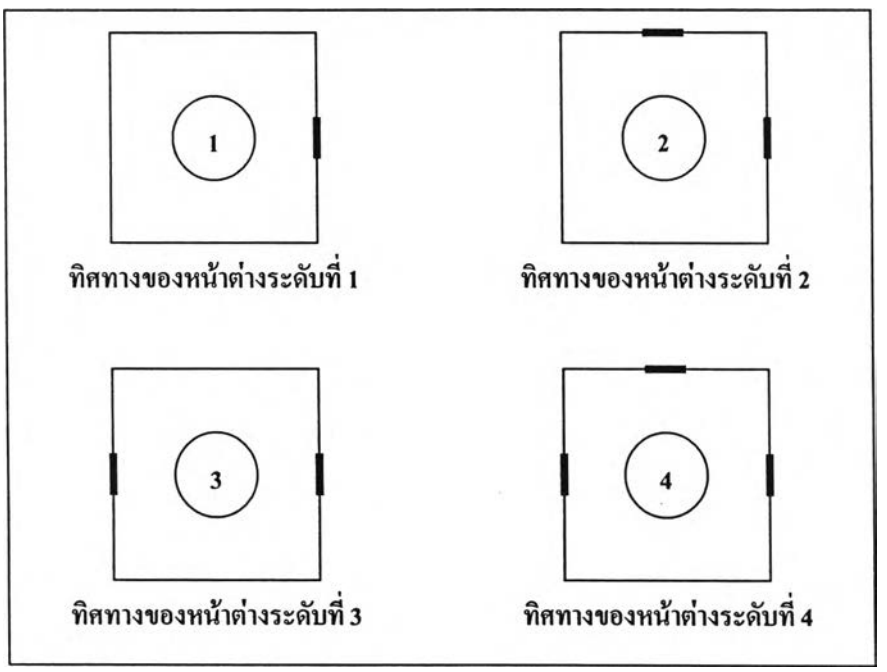
I22258099

2) ระดับที่ 2 หมายถึง การเปิดหน้าต่าง 2 ด้านของผนังห้องที่อยู่ตั้งฉากกัน (เฉียงกัน) ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 2

3) ระดับที่ 3 หมายถึง การเปิดหน้าต่าง 2 ด้านของผนังห้องที่อยู่ตรงข้ามกัน ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 3

4) ระดับที่ 4 หมายถึง การเปิดหน้าต่างสามด้านของผนังห้อง ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 4

ทิศทางการเปิดหน้าต่างทั้ง 4 ระดับ แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ระดับคะแนนและทิศทางของหน้าต่าง

ในแต่ละเงื่อนไขการเปิดหน้าต่างที่มีทิศทางของหน้าต่างแตกต่างกัน ทำให้ค่าการระบายอากาศต่างกันไปด้วย เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของหน้าต่างและอัตราการระบายอากาศ พบว่า มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อค่าคะแนนทิศทางของหน้าต่างเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น

4.1.2.5 มุ้งลวดที่หน้าต่าง (screen) หมายถึง หน้าต่างที่มีมุ้งลวดหรือหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวด โดย

1) มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 1

2) ไม่มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง ให้ค่าคะแนนเท่ากับ 2

เมื่อทำการศึกษาความแตกต่างระหว่างการเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวด กับการเปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวด ต่ออัตราการระบายอากาศ พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการระบายอากาศเมื่อเปิดหน้าต่างที่มีมุ้ง

ลวดเท่ากับ 17.8 ± 11.1 ต่อชั่วโมง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 40.5 ต่อชั่วโมง และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.5 ต่อชั่วโมง ส่วนค่าเฉลี่ยอัตราการระบายอากาศเมื่อเปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวดเท่ากับ 28.0 ± 15.3 ต่อชั่วโมง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 57.2 ต่อชั่วโมง และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.3 ต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของอัตราการระบายอากาศเมื่อเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวดและที่ไม่มีมุ้งลวด

ค่าทางสถิติ	อัตราการระบายอากาศ (h^{-1})	
	มีมุ้งลวด	ไม่มีมุ้งลวด
ค่าเฉลี่ย	17.8*	28.0*
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	11.1	15.3
ค่าสูงสุด	40.5	57.2
ค่าต่ำสุด	1.5	2.3

*หมายเหตุ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยอัตราการระบายอากาศเมื่อมีการเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวดและไม่มีมุ้งลวด ด้วยวิธีการทางสถิติ แบบ Independent-Samples T Test พบว่า อัตราการระบายอากาศทั้งสองกรณีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Katsoulas et al. (2006) ที่ศึกษาเรื่องผลกระทบของการเปิดช่องและมุ้งลวดต่อการระบายอากาศของเรือนกระจกสำหรับปลูกต้นไม้ ซึ่งแสดงว่า การมีมุ้งลวดเป็นสาเหตุให้อัตราการระบายอากาศลดลง 33% ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ คือ การมีมุ้งลวดทำให้อัตราการระบายอากาศลดต่ำลงเมื่อเทียบกับไม่มีมุ้งลวด

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับ แต่ละปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา คือ ความเร็วลม และระดับทิศทางลม กับรูปแบบการเปิดหน้าต่าง คือ จำนวนหน้าต่าง ทิศทางของหน้าต่างและการมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง โดยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation, R) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของแต่ละปัจจัย พบว่า ระดับทิศทางลมมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ เท่ากับ 0.70 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.49 ทิศทางการเปิดหน้าต่างมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ เท่ากับ 0.68 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.47 จำนวนหน้าต่างมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ เท่ากับ 0.38 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.15 การมีมุ้งลวดที่หน้าต่างมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ เท่ากับ 0.36 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.13 และความเร็วลมมีค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ เท่ากับ 0.24 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.06 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับแต่ละปัจจัยทั้งด้านอุตุนิยมวิทยาและรูปแบบการเปิดหน้าต่าง

	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ R	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2
ระดับทิศทางลม	0.70	0.49
ทิศทางการเปิดหน้าต่าง	0.68	0.47
จำนวนหน้าต่าง	0.38	0.15
การมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง	0.36	0.13
ความเร็วลม	0.24	0.06

เมื่อคำนวณทุกปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศพร้อมกัน คือ ความเร็วลม ระดับทิศทางลม จำนวนหน้าต่างและทิศทางการปิดหน้าต่าง ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (R) ที่มีค่าความสัมพันธ์มากขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation, R) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาและรูปแบบการเปิดหน้าต่าง

	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ R	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2
รวม	0.84	0.70
มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง	0.88	0.77
ไม่มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง	0.83	0.70

4.2 การประมาณค่าการระบายอากาศ

การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการระบายอากาศและปัจจัยทางกายภาพ (ตารางที่ 4.2 และ 4.3) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation, R) และค่าสัมประสิทธิ์

การตัดสินใจ (R^2) มีค่ามากขึ้นเมื่อคำนวณทุกตัวแปร (ความเร็วลม ระดับทิศทางลม จำนวนหน้าต่างและทิศทางการเปิดหน้าต่าง) ในการหาการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ แสดงว่าปัจจัยทั้งหมด มีผลต่ออัตราการระบายอากาศและสามารถใช้ตัวแปรทั้งหมดทำนายค่าอัตราการระบายอากาศได้ดี ดังนั้นสมมติฐานของสมการคณิตศาสตร์ประมาณค่าการระบายอากาศ คือ อัตราการระบายอากาศจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเร็วลม ทิศทางลมที่พัดกระทำต่อบานหน้าต่างหรือช่องเปิด ทิศทางหน้าต่าง จำนวนหน้าต่าง และการมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง

4.2.1 สมการคณิตศาสตร์ประมาณค่าการระบายอากาศ

การหาสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศจากความเร็วลม ระดับทิศทางลม จำนวนหน้าต่าง ทิศทางของหน้าต่างและการมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง ได้สมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ ดังนี้

$$a = 0.565WS + 2.784WD + 1.567N_w + 0.065N_d + 1.835SCN - 6.03 \qquad 4.1$$

เมื่อ a คือ อัตราการระบายอากาศ (ต่อชั่วโมง : h^{-1})

WS คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที : $m\ s^{-1}$)

WD คือ ระดับทิศทางลม คือ ทิศทางลมที่พัดเข้าสู่หน้าต่าง

N_w คือ จำนวนหน้าต่าง (บาน)

N_d คือ ทิศทางของหน้าต่าง คือ ด้านเดียวกัน ทำมุมตั้งฉากกัน (เฉียงกัน) ตรงข้าม และเปิด 3 ด้าน

SCN คือ การมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง

4.2.2 ผลการทดสอบ (validation)

การทดสอบสมการที่ใช้ประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ โดยใช้ค่า Factor of Two เทียบกับข้อมูลการตรวจวัดในการวิเคราะห์ ซึ่งการคำนวณค่า Factor of Two ดังสมการ (Chang และ Hanna, 2004)

$$FAC2 = 0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0 \qquad 4.2$$

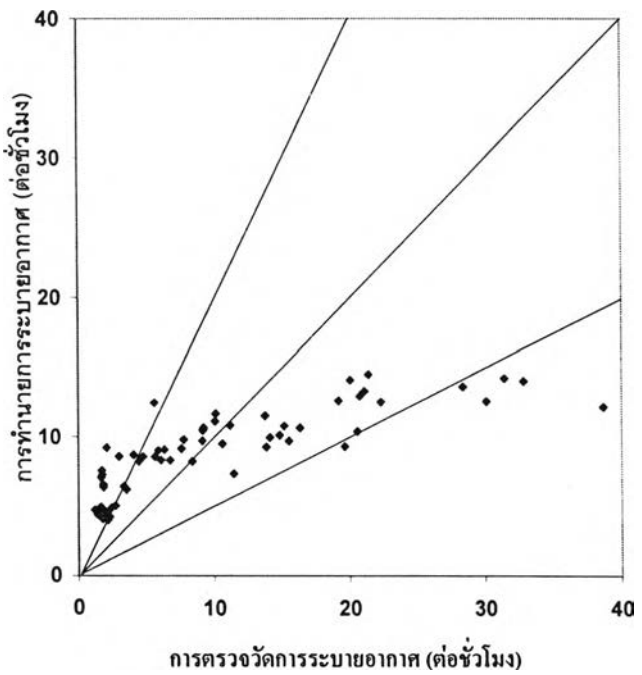
โดยที่

C_p = ผลที่ได้จากสมการ

C_o = ผลที่ได้จากการตรวจวัด

Factor of two เป็นการคำนวณถึงอัตราส่วนความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัด และค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง หาก Factor of two อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 แสดงว่าผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัด ซึ่งวิธีของ Factor of two เป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากไม่มีอิทธิพลของข้อมูลที่มีค่าสูงมากหรือต่ำมากเข้ามาเกี่ยวข้อง (Chang และ Hanna, 2004)

ผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัดและอัตราการระบายอากาศจากสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ พบว่า ค่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มีค่า 62.30% ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ผลเปรียบเทียบค่าอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัดกับค่าอัตราการระบายอากาศจากการประมาณ

ข้อจำกัดของสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1) ข้อจำกัดของการพัฒนาสมการ เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดจริง ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วลมและทิศทางลมได้ ดังนั้น ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ อาจไม่ครบคลุมทุกค่าความเร็วลมและทิศทางลม

2) ข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้สมการ โดยสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศจะทำนายได้ดีในกรณีที่ห้องมีหน้าต่างด้านเดียว หรือสองด้าน เฉียงกัน (62.30%) ส่วนกรณีที่ห้องมีหน้าต่างสองด้านตรงข้ามกันหรือ มีหน้าต่างสามด้าน ไม่ได้มีการตรวจสอบความถูกต้อง เนื่องจากห้องที่ใช้ทดสอบไม่มีหน้าต่างทิศทางตรงข้ามหรือมีหน้าต่างทั้งสามด้านของผนังห้อง

4.3 ความเข้มข้นฝุ่นละออง

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในและภายนอกอาคาร

จากการตรวจวัดความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารและภายนอกอาคาร ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาระหว่างวันที่ 14 ตุลาคม 2547 ถึงวันที่ 2 ธันวาคม 2547 พบว่า ฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดใหญ่ (TSP) มีค่าเฉลี่ย 73.6 ± 43.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM_{10}) มีค่า 44.0 ± 19.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ($PM_{2.5}$) มีค่า 9.3 ± 3.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายนอกอาคาร ขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ย 23.0 ± 8.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรมีค่า 19.5 ± 7.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่า 7.7 ± 3.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการตรวจวัดแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในและภายนอกอาคาร

สถิติ	ภายในอาคาร (Indoor) ($\mu g\ m^{-3}$)			ภายนอกอาคาร (Outdoor) ($\mu g\ m^{-3}$)		
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$
$\bar{X}$	73.6	44.0	9.3	23.0	19.5	7.7
S.D.	43.5	19.0	3.9	8.9	7.1	3.5
Max	528.0	196.0	28.0	157.0	129.0	23.0
Min	14.0	11.0	3.0	7.0	6.0	2.0

จากตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร (Indoor) มีค่าเฉลี่ยมากกว่าฝุ่นละอองภายนอกอาคาร (Outdoor) เมื่อหาค่าสัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารต่อภายนอกอาคาร (I/O) พบว่า ฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าสัดส่วนฝุ่นภายในอาคารต่อภายนอกอาคาร เท่ากับ 3.3 : 1 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 2.3 : 1 และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับ 1.4 : 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร

ฝุ่นละอองภายใน/ภายนอกอาคาร (I/O)		
TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$
3.3:1	2.3:1	1.4:1

สัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคารมีค่าเท่ากันกับปริมาณฝุ่นละอองภายนอกอาคาร ถ้าสัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคารมีมากกว่าภายนอกอาคาร และถ้าสัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคารมีน้อยกว่าฝุ่นละอองภายนอกอาคาร

ผลการตรวจวัดฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารของงานวิจัยนี้และจากงานวิจัยอื่นๆ สรุปได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร (I/O) จากงานวิจัยอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง	สถานที่	ขนาด(μm)	I/O ratio	เงื่อนไข
Chao และ Wong(2002)	ฮ่องกง	$PM_{2.5}$ PM_{10}	0.92 0.88	อัตราการระบายอากาศสูง (<3.5 h^{-1})
		$PM_{2.5}$ PM_{10}	1.09 1.04	อัตราการระบายอากาศต่ำ (>3.5 h^{-1})
Fisher et al. (2000)	เนเธอแลนด์	$PM_{2.5}$ PM_{10}	0.86 0.68	บ้านที่มีการจราจรหนาแน่น
		$PM_{2.5}$ PM_{10}	0.8 0.58	บ้านที่มีการจราจรต่ำ
Funasaka et al. (2000)	ญี่ปุ่น	PM_{10} PM_{10}	0.62 0.86	บ้านที่อยู่ติดถนนในฤดูหนาว บ้านพื้นฐานในฤดูหนาว
Jones et al. (2000)	สหราชอาณาจักร (UK)	PM_{10} $PM_{2.5}$	1.58 2.13 2.46 1.0	บ้านที่อยู่ติดถนน แฟลตในเมือง บ้านในชนบท บ้านที่อยู่ติดถนน
Kingham et al. (2000)	สหราชอาณาจักร (UK)	PM_{10} $PM_{2.5}$	0.12-3.28 0.15-5.22	อาคารที่ไม่มีผู้สูบบุหรี่
Koistinen et al. (2001)	ฟินแลนด์	$PM_{2.5}$	2.2 0.86	บ้านผู้สูบบุหรี่ บ้านผู้ที่ไม่สูบบุหรี่
Lachenmyer และ Hidy (2000)*	สหรัฐอเมริกา	$PM_{2.5}$	0.61 0.92	ฤดูร้อน ฤดูหนาว
Lee และ Chang (2000)	ฮ่องกง	PM_{10}	0.63 0.82 0.75-1.3	โรงเรียนที่เปิดหน้าต่างระบายอากาศ โรงเรียนที่เปิดเครื่องปรับอากาศกลาง (central air-conditioning) โรงเรียนที่มีพัดลมเพดาน
Monn et al. (1997)	สวิสเซอแลนด์	PM_{10} $PM_{2.5}$	0.7 >1 1.2-2.0 0.54 1.23	ไม่มีแหล่งกำเนิดหรือกิจกรรมในอาคาร เมื่อมีกิจกรรมของคน สูบบุหรี่หรือจุดเตาแก๊สหุงต้ม ไม่มีแหล่งกำเนิดหรือกิจกรรมในอาคาร มีกิจกรรมของคน
Pellizzari et al. (1999)	สหรัฐอเมริกา	PM_{10} $PM_{2.5}$	0.98 1.2	บ้านที่อยู่อาศัย
Roorda-Knape et al. (1998)	เนเธอแลนด์	PM_{10}	2	ฤดูร้อน ในห้องเรียน

* อ้างอิงใน Li และ Chen (2003)

เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า สัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารเฉลี่ย ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (เท่ากับ 2.3) มีค่าใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Jones และคณะ (2000) ที่วัดสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารในแฟลตในเมืองและบ้านในชนบทได้ 2.13 และ 2.46 ตามลำดับ และมีค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kingham และคณะ (2000) ที่วัดสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรภายในต่อภายนอกอาคารในอาคารที่ไม่มีผู้สูบบุหรี่ได้ 0.12-3.28 และวัดสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตรได้ 0.12-5.22 โดยงานวิจัยนี้วัดค่าสัดส่วนฝุ่นภายในต่อภายนอกเฉลี่ยของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร ได้เท่ากับ 1.4

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศและความเข้มข้นฝุ่นละอองตามลักษณะภายในอาคาร

จากการตรวจวัดฝุ่นละอองภายในอาคารตามการเปิดหน้าต่างแบบต่างๆ ทั้งหมด 94 ตัวอย่าง พบว่า ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ย 60.8 ± 26.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 240.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 20.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรมีค่าเฉลี่ย 37.7 ± 12.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 124.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 13.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 8.0 ± 2.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 17.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังตารางที่ 4.7 โดยสามารถจำแนกฝุ่นละอองภายในอาคารตามลักษณะการเปิดหน้าต่างได้ 3 กลุ่ม คือ การจำแนกตามจำนวนการเปิดหน้าต่าง การจำแนกตามการเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวด และจำแนกตามทิศทางการเปิดหน้าต่าง

4.3.2.1 การจำแนกความเข้มข้นฝุ่นละอองตามจำนวนหน้าต่าง ดังตารางที่ 4.7 พบว่า

1) การเปิดหน้าต่าง 1 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 49.7 ± 17.3 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 108.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 20.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 32.3 ± 9.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 62.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 13.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 7.0 ± 1.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 11.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) การเปิดหน้าต่าง 2 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 69.0 ± 21.3 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 167.0 ไมโครกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 27.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 42.3 ± 8.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 75.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 22.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 10.2 ± 3.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 17.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 6.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3) การเปิดหน้าต่าง 3 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 54.5 ± 21.3 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 164.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 24.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 33.6 ± 9.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 76.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 18.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 6.7 ± 2.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 16.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4) การเปิดหน้าต่าง 4 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 75.2 ± 40.0 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 240.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 25.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 43.9 ± 17.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 124.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 18.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 8.5 ± 3.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 17.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5) การเปิดหน้าต่าง 5 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 71.0 ± 29.6 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 163.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 26.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 45.8 ± 16.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 91.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 22.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 8.9 ± 2.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 14.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

6) การเปิดหน้าต่าง 6 บาน ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 65.4 ± 22.1 ไมโคกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 126.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 35.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาด

เล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 39.4 ± 8.8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 68.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 28.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 9.5 ± 0.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 12.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 8.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร รวมและจำแนกตามขนาดอนุภาคและจำนวนหน้าต่าง

จำนวนหน้าต่าง (บาน)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร											
	TSP ($\mu g\ m^{-3}$)				PM_{10} ($\mu g\ m^{-3}$)				$PM_{2.5}$ ($\mu g\ m^{-3}$)			
	$\bar{X}$	S.D.	max	min	$\bar{X}$	S.D.	max	min	$\bar{X}$	S.D.	max	min
รวม	60.8	26.6	240.0	20.0	37.7	12.6	124.0	13.0	8.0	2.9	17.0	4.0
1	49.7	17.3	108.0	20.0	32.3	9.3	62.0	13.0	7.0	1.6	11.0	5.0
2	69.0	21.3	167.0	27.0	42.6	8.3	75.0	22.0	10.2	3.6	17.0	6.0
3	54.5	21.3	164.0	24.0	33.6	9.5	76.0	18.0	6.7	2.2	16.0	4.0
4	75.2	40.0	240.0	25.0	43.9	17.7	124.0	18.0	8.5	3.4	17.0	4.0
5	71.0	29.6	163.0	26.0	45.8	16.3	91.0	22.0	8.9	2.2	14.0	4.0
6	65.4	22.1	126.0	35.0	39.4	8.8	68.0	28.0	9.5	0.9	12.0	8.0

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร จำแนกตามจำนวนการเปิดหน้าต่าง ดังตารางที่ 4.8 พบว่า

1) การเปิดหน้าต่าง 1 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 2.8 ± 0.9 ค่าสูงสุดเท่ากับ 6.1 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.1 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.1 ± 0.4 ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.8 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.2 ± 0.1 ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.6 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0

2) การเปิดหน้าต่าง 2 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.2 ± 1.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 11.9 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.3 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.3 ± 0.8 ค่าสูงสุดเท่ากับ 6.3 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.3 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.3 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0

3) การเปิดหน้าต่าง 3 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.2 ± 1.3 ค่าสูงสุดเท่ากับ 13.9 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.3 ± 0.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 6.3 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.2 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.9

4) การเปิดหน้าต่าง 4 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.7 ± 1.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 9.5 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.5 ± 0.7 ค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.6 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.6

5) การเปิดหน้าต่าง 5 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.5 ± 1.1 ค่าสูงสุดเท่ากับ 8.7 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.4 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.6 ± 0.5 ค่าสูงสุดเท่ากับ 4.4 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.4 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.4 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.8 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0

6) การเปิดหน้าต่าง 6 บาน ความเข้มข้นฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 2.9 ± 1.0 ค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.8 ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.9 ± 0.4 ค่าสูงสุดเท่ากับ 3.1 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.8 ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.2 ± 0.1 ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.4 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.75

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร จำแนกตามจำนวนหน้าต่าง

จำนวนหน้าต่าง (บาน)	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารต่อภายนอกอาคาร (I/O)											
	TSP				PM_{10}				$PM_{2.5}$			
	$\overline{X}$	S.D.	max	min	$\overline{X}$	S.D.	max	Min	$\overline{X}$	S.D.	max	min
1	2.8	0.9	6.1	1.1	2.1	0.4	3.8	1.0	1.2	0.1	1.6	1.0
2	3.2	1.6	11.9	1.3	2.3	0.8	6.3	1.3	1.3	0.2	2.3	1.0
3	3.2	1.3	13.9	1.0	2.3	0.6	6.3	1.2	1.3	0.2	2.0	0.9
4	3.7	1.6	9.5	1.0	2.5	0.7	5.0	0.6	1.3	0.2	2.0	0.6
5	3.5	1.1	8.7	1.4	2.6	0.5	4.4	1.4	1.4	0.2	1.8	1.0
6	2.9	1.0	5.0	0.8	1.9	0.4	3.1	0.8	1.2	0.1	1.4	0.8

4.3.2.2 การจำแนกผลการตรวจวัดฝุ่นละออง ตามการมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 47 ตัวอย่าง คือ การเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวด และการเปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวด พบว่า

1) เปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวดมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ เท่ากับ 64.0 ± 28.8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เท่ากับ 39.2 ± 13.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เท่ากับ 8.0 ± 2.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) เปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวดมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดใหญ่ เท่ากับ 56.4 ± 22.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เท่ากับ 35.6 ± 11.3 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เท่ากับ 8.2 ± 3.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร เมื่อเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวดและไม่มีมุ้งลวด

	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)		
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$
มีมุ้งลวด	64.0 ± 28.8	39.2 ± 13.3	8.0 ± 2.3
ไม่มีมุ้งลวด	56.4 ± 22.4	35.6 ± 11.3	8.2 ± 3.5

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนฝุ่นภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นขนาดใหญ่ ขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร และขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร พบว่า เมื่อเปิดหน้าต่างแบบมีมุ้งลวด ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดใหญ่ เท่ากับ 3.3 : 1 ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เท่ากับ 2.4 : 1 ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เท่ากับ 1.3 : 1 เมื่อเปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวด ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดใหญ่ เท่ากับ 3.0 : 1 ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร เท่ากับ 2.2 : 1 และ ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เท่ากับ 1.3 : 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร เมื่อเปิดหน้าต่างแบบมีมุ้งลวดและไม่มีมุ้งลวดที่หน้าต่าง

	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารต่อภายนอกอาคาร (I/O)		
	TSP	PM_{10}	$PM_{2.5}$
มีมุ้งลวด	3.3 : 1	2.4 : 1	1.3 : 1
ไม่มีมุ้งลวด	3.0 : 1	2.2 : 1	1.3 : 1

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่า การมีมุ้งลวดที่หน้าต่างมีผลต่อความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร โดยเมื่อมีการเปิดหน้าต่างที่มีมุ้งลวดจะทำให้ความเข้มข้นฝุ่น

ละอองภายในอาคารและค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารมีค่าสูงกว่า เมื่อมีการเปิดหน้าต่างที่ไม่มีมุ้งลวด

4.3.2.3 การจำแนกความเข้มข้นฝุ่นละอองตามทิศทางการเปิดหน้าต่าง ดังตารางที่ 4.11 พบว่า

1) เมื่อเปิดหน้าต่างด้านเดียวกัน ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 52.1 ± 19.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 167.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 20.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 33.0 ± 9.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 75.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 13.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 7.1 ± 1.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 15.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) เมื่อเปิดหน้าต่างในทิศทางที่ตั้งฉากกัน (เฉียงกัน) ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 75.4 ± 29.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 240.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 26.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 45.7 ± 12.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 124.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 22.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 9.7 ± 3.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 17.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3) เมื่อเปิดหน้าต่างด้านตรงข้ามกัน ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 63.6 ± 29.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 240.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 25.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 39.1 ± 19.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 119.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 18.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 9.1 ± 3.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 17.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4) เมื่อเปิดหน้าต่างทั้ง 3 ด้านของผนังห้อง ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 68.6 ± 29.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 200.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 28.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 41.7 ± 14.8 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 91.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 18.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 7.8 ± 2.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสูงสุดเท่ากับ 14.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร จำแนกตามขนาดอนุภาคและทิศทางการเปิดหน้าต่าง

ทิศทางการเปิดหน้าต่าง	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร											
	TSP ($\mu g\ m^{-3}$)				PM_{10} ($\mu g\ m^{-3}$)				$PM_{2.5}$ ($\mu g\ m^{-3}$)			
	$\overline{X}$	S.D.	max	min	$\overline{X}$	S.D.	max	min	$\overline{X}$	S.D.	max	min
ด้านเดียว	52.1	19.2	167.0	20.0	33.0	9.1	75.0	13.0	7.1	1.9	15.0	5.0
เฉียงกัน	75.4	29.1	240.0	26.0	45.7	12.5	124.0	22.0	9.7	3.4	17.0	5.0
ตรงข้าม	63.6	29.2	240.0	25.0	39.1	13.7	119.0	18.0	9.1	3.9	17.0	4.0
3 ด้าน	68.3	29.1	200.0	28.0	41.7	14.8	91.0	18.0	7.8	2.6	14.0	4.0

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร จำแนกตามทิศทางการเปิดหน้าต่าง ดังตารางที่ 4.12 พบว่า

1) เมื่อเปิดหน้าต่างด้านเดียวกัน ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.0 ± 1.6 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 14.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.2 ± 0.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 6.3 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.6 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0

2) เมื่อเปิดหน้าต่างในทิศทางที่ตั้งฉากกัน (เฉียงกัน) ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.3 ± 1.2 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.7 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.3 ± 0.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 4.8 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.6 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 1.8 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.6

3) เมื่อเปิดหน้าต่างด้านตรงข้ามกัน ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.1 ± 1.3 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.2 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.2 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.3 ± 0.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 5.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.3 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.0

4) เมื่อเปิดหน้าต่างทั้ง 3 ด้านของผนังห้อง ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารของฝุ่นละอองขนาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ย 3.6 ± 1.3 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.5 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.8 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.5 ± 0.6 ค่าสูงสุดเท่ากับ 4.5 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.8 ความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร มีค่าเฉลี่ย 1.3 ± 0.2 ค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.8

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัดส่วนความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร จำแนกตามขนาดอนุภาคและทิศทางการเปิดหน้าต่าง

ทิศทางการเปิดหน้าต่าง	ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร (I/O)											
	TSP ($\mu g\ m^{-3}$)				PM_{10} ($\mu g\ m^{-3}$)				$PM_{2.5}$ ($\mu g\ m^{-3}$)			
	$\bar{X}$	S.D.	max	min	$\bar{X}$	S.D.	max	min	$\bar{X}$	S.D.	max	min
ด้านเดียว	3.02	1.35	13.91	1.00	2.23	0.64	6.30	1.00	1.26	0.17	2.25	1.00
เฉียงกัน	3.26	1.17	8.67	0.98	2.34	0.59	4.77	0.60	1.25	0.15	1.75	0.64
ตรงข้าม	3.19	1.28	8.22	1.20	2.26	0.59	4.96	1.34	1.25	0.16	2.00	1.00
3 ด้าน	3.56	1.33	9.52	0.78	2.53	0.60	4.50	0.80	1.33	0.19	2.00	0.75

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร พบว่า ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศกับความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร

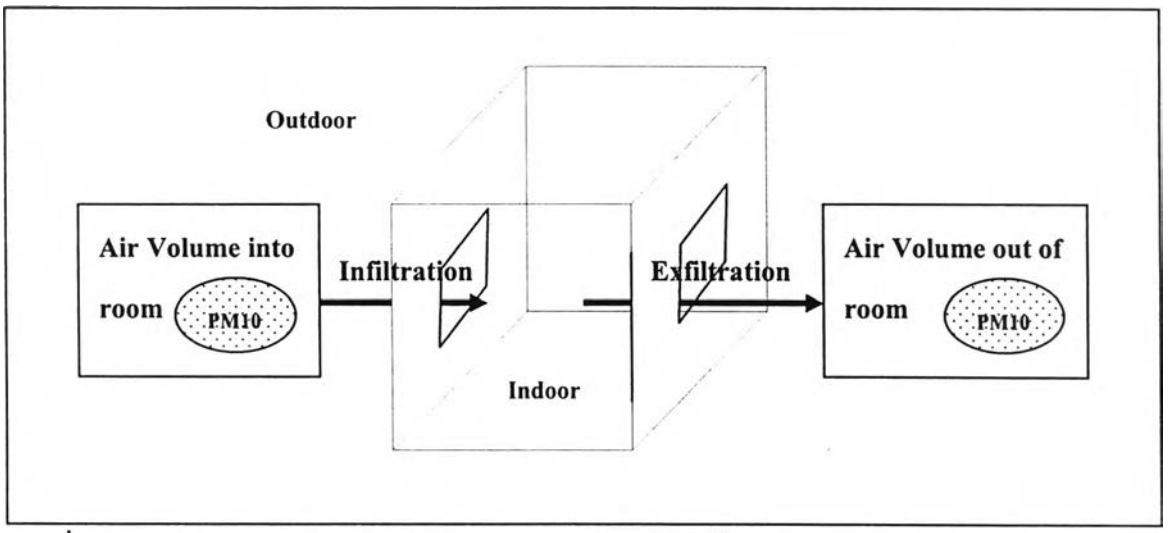
4.4 แบบจำลองความเข้มข้นของฝุ่นละอองภายในอาคาร

4.4.1 สมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

จากทฤษฎี box model ซึ่งเป็นโมเดลที่มีพื้นฐานจากสมดุลมวล โดยมีสมมติว่า ความเข้มข้นมลพิษเป็นเนื้อเดียวกันตลอดในขอบเขตที่สนใจ มลพิษที่ปลดปล่อยออกมาคงที่และมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันตลอดในขอบเขตหรือกล่องที่สนใจ โดยมีความเร็วลมคงที่ (Schnelle และ Dey, 2000) และหลักการระบายอากาศ ซึ่งหมายถึง การที่อากาศจากภายนอกอาคารไหลเข้าแทนที่อากาศที่อยู่ภายอาคาร โดยค่าอัตราการระบายอากาศมีหน่วย ต่อชั่วโมง เช่น อัตราการระบายอากาศเท่ากับ 3 ต่อชั่วโมง หมายความว่า ภายในเวลา 1 ชั่วโมง จะมีอากาศจากภายนอกไหลเข้าแทนที่อากาศที่อยู่ภายในห้องเป็นจำนวน 3 เท่าของปริมาตรห้อง

ดังนั้น ปริมาณฝุ่นละอองจากภายนอกอาคารที่แขวนลอยในอากาศจะเข้าสู่ภายในอาคารโดยถูกพัดพามาพร้อมกับปริมาตรอากาศภายนอกอาคารที่เข้าสู่ภายในอาคาร (Infiltration) ใน

ขณะเดียวกัน ปริมาณฝุ่นละอองภายในอาคารจะถูกพัดพาออกไปนอกอาคาร กับปริมาตรอากาศที่ถูกพัดออกไป (Exfiltration) ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 การพัดพาของฝุ่นละอองและการระบายอากาศของห้อง

การคำนวณหาความเข้มข้นฝุ่นละอองจากภายนอกที่เข้าสู่ภายในอาคาร(มีหน่วยเป็นมวลต่อปริมาตรอากาศ : $\mu g\ m^{-3}$) คำนวณจากความเข้มข้นฝุ่นละอองที่ถูกพัดพาสู่ในอาคารจากการระบายอากาศ (มีหน่วยต่อชั่วโมง : h^{-1}) ดังนั้น ปริมาณฝุ่นละอองจากภายนอกที่เข้าสู่ภายในอาคาร เป็นดังสมการที่ 4.3

$$C_{out}a = aC_{out} \qquad (\mu g)(m^{-3})(m^3)(h^{-1}) = (\mu g)(h^{-1}) \qquad 4.3$$

เมื่อ C_{out} คือ ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายนอกอาคาร(ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร : $\mu g\ m^{-3}$)

a คือ อัตราการระบายอากาศ (ต่อชั่วโมง : h^{-1})

ปริมาณฝุ่นละอองจากภายนอกที่เข้าสู่อาคาร มีหน่วยเป็นมวลต่อเวลา (ไมโครกรัมต่อชั่วโมง : $\mu g\ h^{-1}$) เมื่อต้องการทราบความเข้มข้นฝุ่นละออง ทำได้โดยนำปริมาตรห้องไปหารมวลของฝุ่น จะได้ความเข้มข้นฝุ่นในช่วงเวลานั้นๆ (1 ชั่วโมง) ดังสมการ 4.4

$$C_{outdoor} = \frac{aC_{out}}{V} \qquad (\mu g)(m^{-3}h^{-1}) = (\mu g)(h^{-1}m^{-3}) \qquad 4.4$$

เมื่อ $C_{outdoor}$ คือ ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากภายนอกที่เข้าสู่อาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

V คือ ปริมาตรห้อง (ลูกบาศก์เมตร : m^3)

จากสมมติฐาน ที่ว่า การทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารสามารถคำนวณได้จาก ความเข้มข้นฝุ่นละอองจากภายนอกอาคารที่แพร่เข้ามาจากอัตราการระบายอากาศ รวมกับความเข้มข้นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากภายในอาคารและความเข้มข้นฝุ่นละอองที่มีอยู่แล้วภายในอาคาร และลดลงเนื่องจากความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารที่ถูกพัดออกไปรวมกับความเข้มข้นฝุ่นละอองที่ตกลง ดังสมการ ที่ 4.5

$$C_{in} = C_{out-in} + C_0 + C_G - C_d - C_{in-out} \qquad 4.5$$

เมื่อ C_{in} = ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

C_{out-in} = ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายนอกอาคารที่พัดเข้ามาในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

C_0 = ความเข้มข้นฝุ่นละอองพื้นฐาน (background) ในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

C_G = ความเข้มข้นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

C_d = ความเข้มข้นฝุ่นละอองที่ตกตะกอน (deposition) ($\mu g\ m^{-3}$)

C_{in-out} = ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารที่ออกไปนอกอาคารกับการระบายอากาศ ($\mu g\ m^{-3}$)

โดยที่ มวลของฝุ่นละอองภายนอกอาคารที่พัดเข้ามาในอาคาร (C_{MO-I}) ในการศึกษานี้จะคิดใน 1 นาที ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4.6

$$C_{MO-I} = C_{out} \times V \times a \qquad (\mu g) = (\mu g)(m^{-3})(m^3)(h^{-1})(\min) \qquad 4.6$$

เมื่อ C_{MO-I} = มวลของฝุ่นละอองภายนอกอาคารที่พัดเข้ามาในอาคาร (ไมโครกรัม : μg)

C_{out} = ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายนอกอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

V = ปริมาตรห้อง (m^3)

a = อัตราการระบายอากาศ (h^{-1})

มวลของฝุ่นละอองพื้นฐานหรือมวลที่เวลาเริ่มต้นในอาคารสามารถคำนวณได้จาก

$$C_{M0} = C_0 \times V \qquad (\mu g) = (\mu g)(m^{-3})(m^3) \qquad 4.7$$

เมื่อ C_{M0} = มวลฝุ่นละอองพื้นฐานที่มีอยู่ในอาคาร (μg)

C_0 = ความเข้มข้นฝุ่นละอองพื้นฐานที่มีอยู่ในอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

มวลของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในอาคาร (C_{MG}) คำนวณได้จาก

$$C_{MG} = C_s \times V \times t \qquad (\mu g) = (\mu g)(m^{-3}\,\mathrm{min}^{-1})(m^3)(\mathrm{min}) \qquad 4.8$$

เมื่อ C_{MG} = มวลของฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในอาคารจากกิจกรรมต่างๆ (µg)

C_s = ความเข้มข้นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในอาคารต่อเวลา (µg $m^{-3}min^{-1}$)

t = เวลาที่ก่อให้เกิดความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร (min)

แต่ในการศึกษาครั้งนี้ ให้ค่าฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในอาคารเท่ากับศูนย์

มวลของฝุ่นละอองที่ตกตะกอนในอาคาร (C_{Md}) ในการศึกษานี้จะคิดใน 1 นาที ซึ่งคำนวณจาก

$$C_{Md} = C_0 \times V \times k \qquad (\mu g) = (\mu g)(m^{-3})(m^3)(h^{-1})(\mathrm{min}) \qquad 4.9$$

เมื่อ C_{Md} = มวลของฝุ่นละอองที่ตกตะกอนในอาคาร (µg)

C_0 = ความเข้มข้นฝุ่นละอองพื้นฐานที่มีอยู่ในอาคาร (µg m^{-3})

k = ค่าคงที่อัตราการตกตะกอน (deposition rate) (h^{-1})

มวลของฝุ่นละอองภายในอาคารที่ออกไปนอกอาคารกับการระบายอากาศ (C_{MI-O}) ในการศึกษานี้จะคิดใน 1 นาที ซึ่งคำนวณจาก

$$C_{MI-O} = C_0 \times V \times a \qquad (\mu g) = (\mu g)(m^{-3})(m^3)(h^{-1})(\mathrm{min}) \qquad 4.10$$

เมื่อ C_{MI-O} = มวลของฝุ่นละอองภายในอาคารที่ออกไปนอกอาคาร (µg)

เมื่อนำมวลของฝุ่นที่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองภายในอาคารมารวมกัน ดังสมการ

$$VC_{in} = C_{MO-I} + C_{M0} + C_{MG} - C_{Md} - C_{MI-O} \qquad 4.11$$
$$(m^3)(\mu g)(m^{-3}) = (\mu g) + (\mu g) + (\mu g) - (\mu g) - (\mu g)$$

จากสมการที่ 4.11 เมื่อนำปริมาตรห้องหารทั้งสองข้างของสมการจะได้ ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

4.4.2 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบสมการนี้ มีสมมติฐานว่าไม่มีการเกิดฝุ่นละอองภายในอาคารขึ้นขณะทำการตรวจวัดฝุ่นละอองหรือมีค่าเท่ากับศูนย์

ดังนั้นสมการที่ใช้ในการทดสอบ จึงเป็นดังนี้

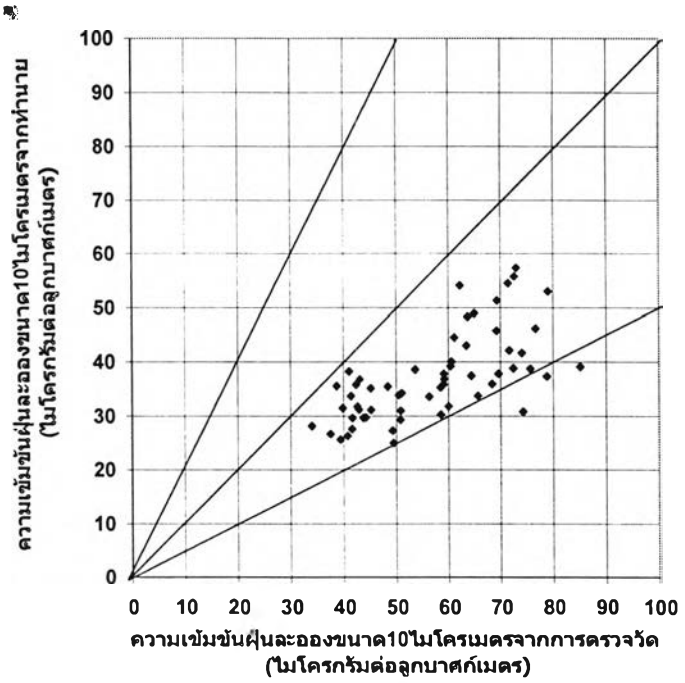
$$VC_{in} = C_{MO-I} + C_{M0} - C_{Md} - C_{MI-O} \qquad 4.12$$

$$(m^3)(\mu g)(m^{-3}) = (\mu g) + (\mu g) - (\mu g) - (\mu g)$$

การทดสอบสมการที่ใช้ทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร ใช้ค่า Factor of Two ในการวิเคราะห์ โดยพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร ได้แก่ ห้องขนาด 3.06 x 3.74 x 2.68 ลูกบาศก์เมตร มีหน้าต่าง 2 ด้าน จำนวน 4 บาน โดยหน้าต่างเป็นบานเปิดทั้งหมด (พื้นที่หน้าต่างขนาด 0.47 x 1.18 ตารางเมตร) ห้องที่ทำการศึกษาอยู่ชั้นที่สองของบ้านเดี่ยวที่มีผู้อยู่อาศัย ในหมู่บ้านปรีชา 1 ถ.พัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร ซึ่งตัวบ้านอยู่ห่างจากถนนสายหลักประมาณ 300 เมตร ซึ่งเป็นพื้นที่เดียวกับที่ใช้ทดสอบสมการที่ใช้ทำนายอัตราการระบายอากาศ ดังภาพที่ 3.2

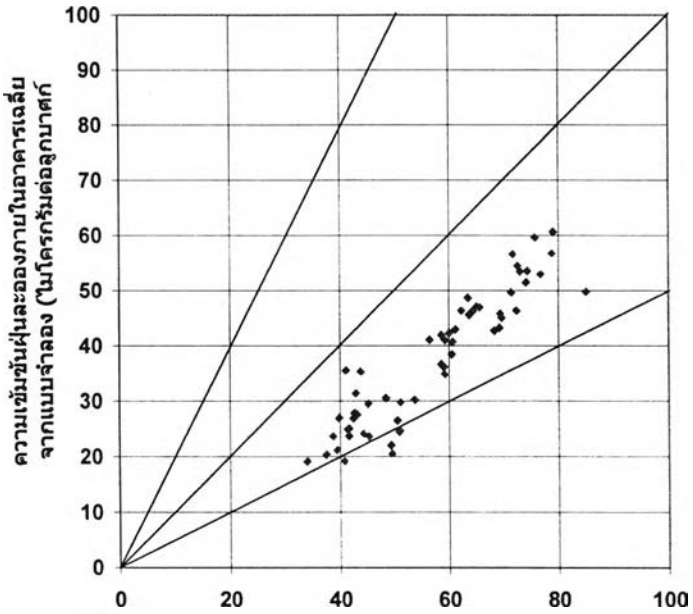
ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารจากการตรวจวัด และความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารจากสมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร เป็นดังนี้

4.4.2.1 เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและข้อมูลอัตราการระบายอากาศที่ได้จากการตรวจวัดมาใช้ในการคำนวณ พบว่า ค่า Factor of Two ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มีค่า 94.83% ดังภาพที่ 4.8



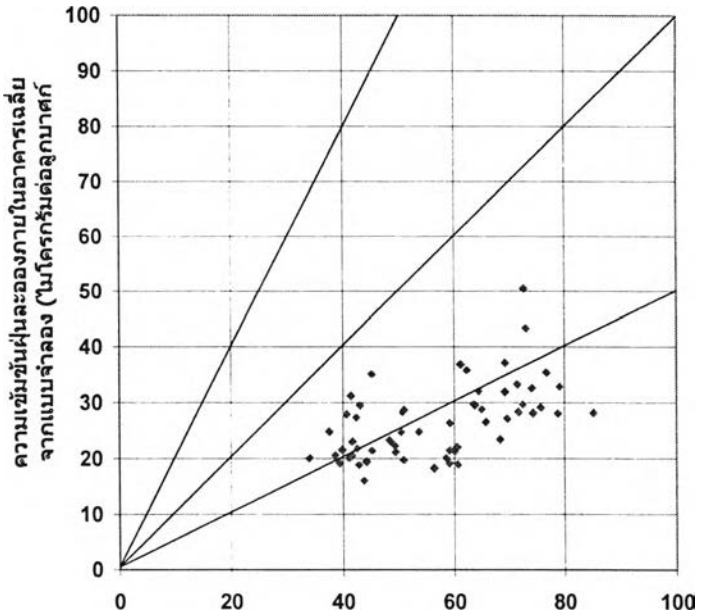
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรกับค่าที่ได้จากสมการทำนายฝุ่นละออง เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองและอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัด

4.4.2.2 เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากการตรวจวัดและข้อมูลอัตราการระบายอากาศที่ได้สมการทำนายอัตราการระบายอากาศมาใช้ในการคำนวณ พบว่า ค่า Factor of Two ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มีค่า 91.38% ดังภาพที่ 4.9



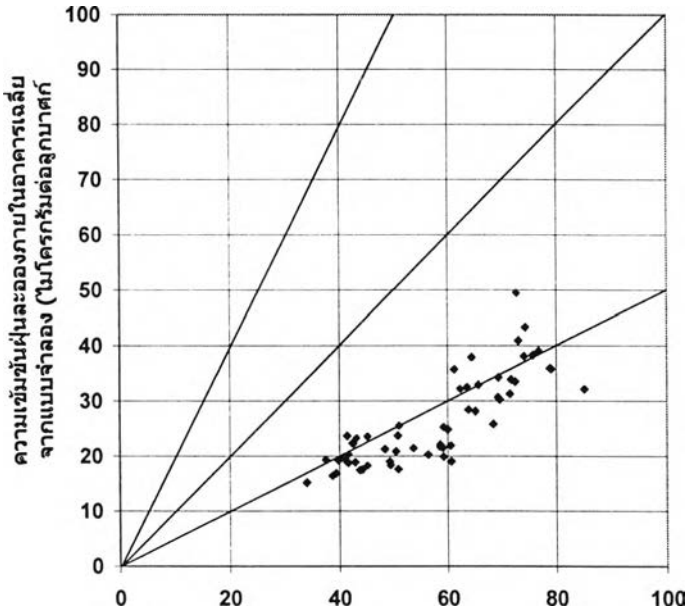
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรกับค่าที่ได้จากสมการทำนายฝุ่นละออง เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองจากการตรวจวัดและอัตราการระบายอากาศจากสมการทำนายค่าอัตราการระบายอากาศ

4.4.2.3 เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร (I/O) และข้อมูลอัตราการระบายอากาศที่ได้จากการตรวจวัดมาใช้ในการคำนวณ พบว่า ค่า Factor of Two ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มีค่า 31.04% ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้ค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารที่เวลาเริ่มต้นซึ่งได้จากค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารที่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริงมาก จึงทำให้การทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารทำนายได้ต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริงมาก ดังภาพที่ 4.10



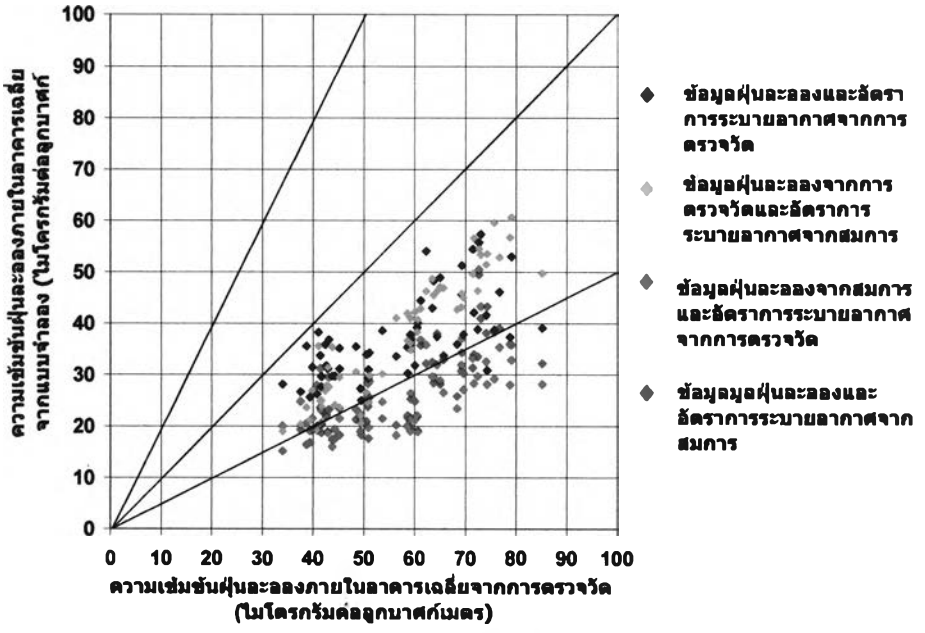
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรกับค่าที่ได้จากสมการทำนายฝุ่นละออง เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองจากสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร และอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัด

4.4.2.4 เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร (I/O) และข้อมูลอัตราการระบายอากาศที่ได้สมการทำนายอัตราการระบายอากาศมาใช้ในการคำนวณ พบว่า ค่า Factor of Two ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 มีค่า 31.04% ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้ค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารที่เวลาเริ่มต้นซึ่งได้จากค่าสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารที่มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริงมาก จึงทำให้การทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารทำนายได้ต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดจริงมาก ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรกับค่าที่ได้จากสมการทำนายฝุ่นละออง เมื่อใช้ข้อมูลฝุ่นละอองจากสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารและอัตราการระบายอากาศจากสมการทำนายค่าอัตราการระบายอากาศ

ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารจากการตรวจวัดกับความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารจากสมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารทั้งสี่เงื่อนไข คือ เมื่อใช้ค่าฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรและค่าอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัดจริง เมื่อใช้ค่าฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากการตรวจวัดจริงและใช้ค่าอัตราการระบายอากาศจากสมการทำนาย เมื่อใช้ค่าฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารและใช้ค่าอัตราการระบายอากาศจากการตรวจวัดจริง และเมื่อใช้ค่าฝุ่นละอองภายในอาคารขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรจากสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคารและค่าอัตราการระบายอากาศจากสมการทำนาย แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตรวจวัดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรกับค่าที่ได้จากสมการทำนายฝุ่นละออง เมื่อรวมทั้ง 4 เงื่อนไข

Schneider et al. (2004) ศึกษาการทำนายความเข้มข้นของอนุภาคขนาด 0.5-4 ไมโครเมตรภายในอาคารที่มาจากแหล่งกำเนิดภายนอกอาคารในอพาตเม้นท์ พบว่า ปัจจัยทางด้าน ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกอาคารและการแลกเปลี่ยนอากาศ มีผลต่อการทำนายฝุ่นละอองภายในอาคาร และแนะนำว่า ปัจจัยต่าง เช่น องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาค รูปแบบการถ่ายเทอากาศของอาคาร และลักษณะนิสัยของผู้อยู่อาศัยควรมีการกำหนดให้ชัดเจนและควรศึกษาเพิ่มเติมเพื่อรวมเข้าไว้ในแบบจำลองการทำนาย

4.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองความเข้มข้นของฝุ่นละอองภายในอาคาร

จากสมการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศและสมการทำนายฝุ่นละออง สามารถเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณฝุ่นละอองภายในอาคารได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.13

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณฝุ่นละอองภายในอาคารจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณด้วยโปรแกรม (input) กระบวนการทำงานของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร (process) และการรายงานผลของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร (output)

4.5.1 ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ข้อมูลทั่วไปและข้อมูลการระบายอากาศ

4.5.1.1 ข้อมูลทั่วไป

4.5.1.1.1 ข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ภายนอกอาคาร ($\mu g\ m^{-3}$)

4.5.1.1.2 ข้อมูลความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ที่มีอยู่แล้วภายในอาคาร (ความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารที่เวลาเริ่มต้น : C_0) ถ้าไม่ทราบค่า โปรแกรมจะคำนวณให้โดยแทนค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองภายนอกอาคารที่ใส่ไว้แล้วลงในสัดส่วนฝุ่นละอองภายในต่อภายนอกอาคาร (Indoor/Outdoor) ที่กำหนดไว้ให้ ($\mu g\ m^{-3}$)

4.5.1.1.3 ปริมาตรห้อง (m^3)

4.5.1.1.4 เวลาที่ต้องการทำนายฝุ่นละอองไปล่วงหน้า ซึ่งโปรแกรมจะสามารถคำนวณได้ไม่เกิน 99 นาที (min)

4.5.1.1.5 อัตราการตกตะกอนของฝุ่นขนาด 10 ไมโครเมตร ถ้าไม่ทราบค่า โปรแกรมจะคำนวณจากค่าที่กำหนดให้ (h^{-1})

4.5.1.2 ข้อมูลการระบายอากาศ

การระบายอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละอองในครั้งนี้ โดยมีสมมติฐานว่า ฝุ่นละอองจากภายนอกจะพัดพาเข้าสู่ภายในอาคารกับการระบายอากาศและฝุ่นละอองจากภายในอาคารจะถูกพัดพาออกไปกับการระบายอากาศ ดังนั้นข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ

4.5.1.2.1 อัตราการระบายอากาศของห้อง (h^{-1})

4.5.1.2.2 ในกรณีที่ไม่ทราบค่าอัตราการระบายอากาศ จะสามารถประมาณค่าการกระบายอากาศให้ได้ แต่จะต้องใส่ข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) จำนวนหน้าต่าง (number)

2) ความเร็วลม ($m\ s^{-1}$) อยู่ในช่วง 0.5-7.4 เมตรต่อวินาที

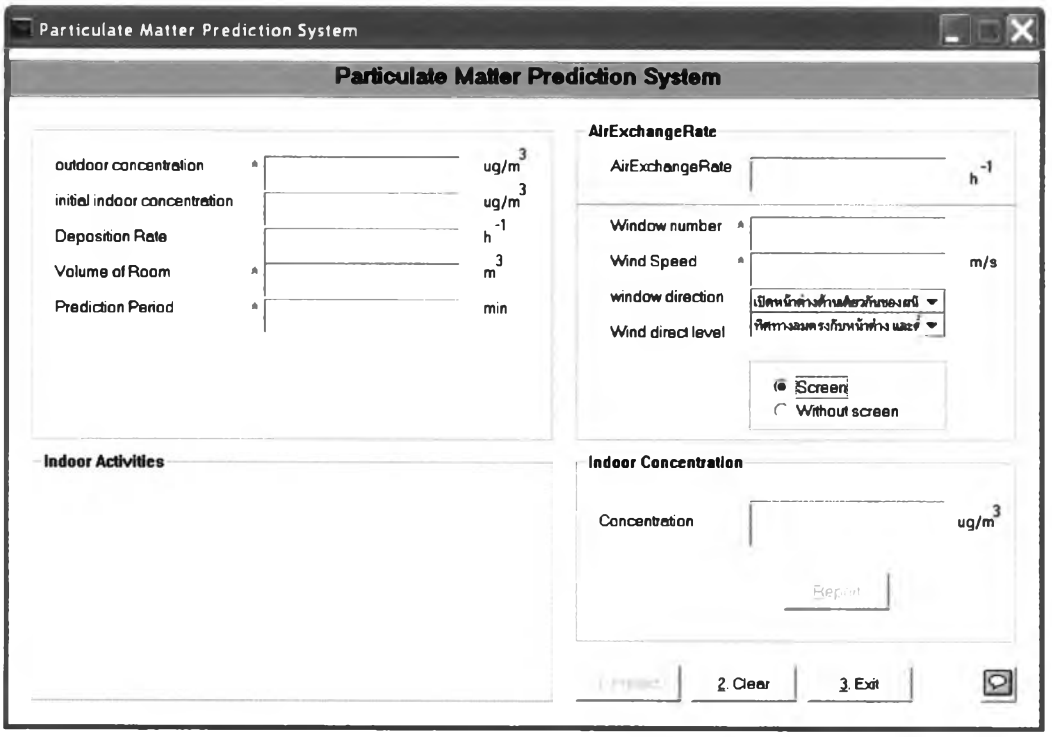
3) ทิศทางลมที่กระทำต่อหน้าต่าง

4) ทิศทางการเปิดหน้าต่าง

5) การมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง

โดยในส่วนของจำนวนหน้าต่างและความเร็วลมผู้ใช้โปรแกรมจำเป็นต้องใส่ข้อมูลตัวเลขลงไป ส่วนทิศทางลมที่กระทำต่อหน้าต่าง ทิศทางการเปิดหน้าต่าง และการมีมุ้งลวดที่หน้าต่าง ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องเลือกว่าห้องที่ต้องการทราบอัตราการระบายอากาศ (ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นฝุ่นละออง) นั้นมีลักษณะอย่างไร โดยถ้าไม่เลือก โปรแกรมจะกำหนดค่าไว้ให้ แต่การประมาณอัตราการระบายอากาศอาจไม่ถูกต้อง

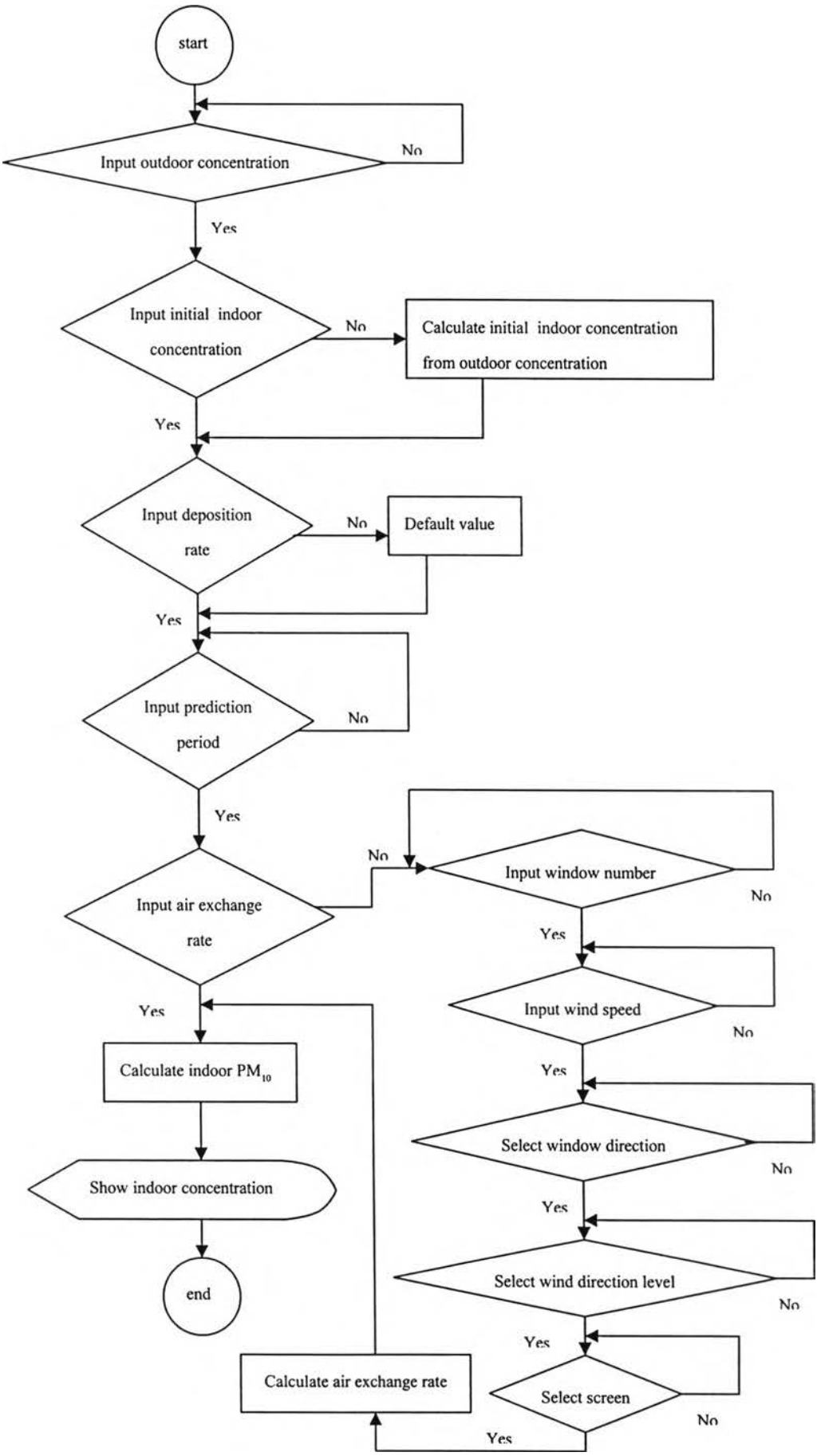
ในส่วนของ Indoor Activities อาจถูกพัฒนาขึ้นจากงานวิจัยต่อๆ ไป



ภาพที่ 4.13 หน้าจอโปรแกรมคำนวณความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

4.5.2 กระบวนการทำงานของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

กระบวนการทำงานของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร สามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

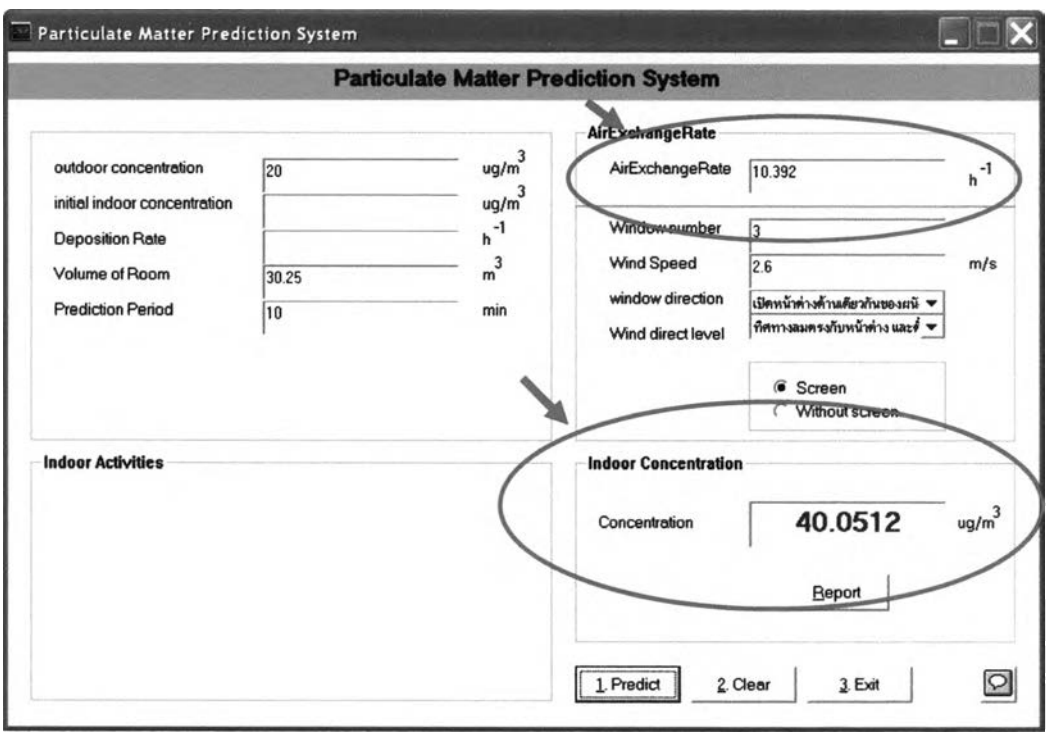
4.5.3 การรายงานผลของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

การรายงานผลของโปรแกรมการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.5.3.1 การรายงานผลที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบ่งได้ 2 ส่วนคือ

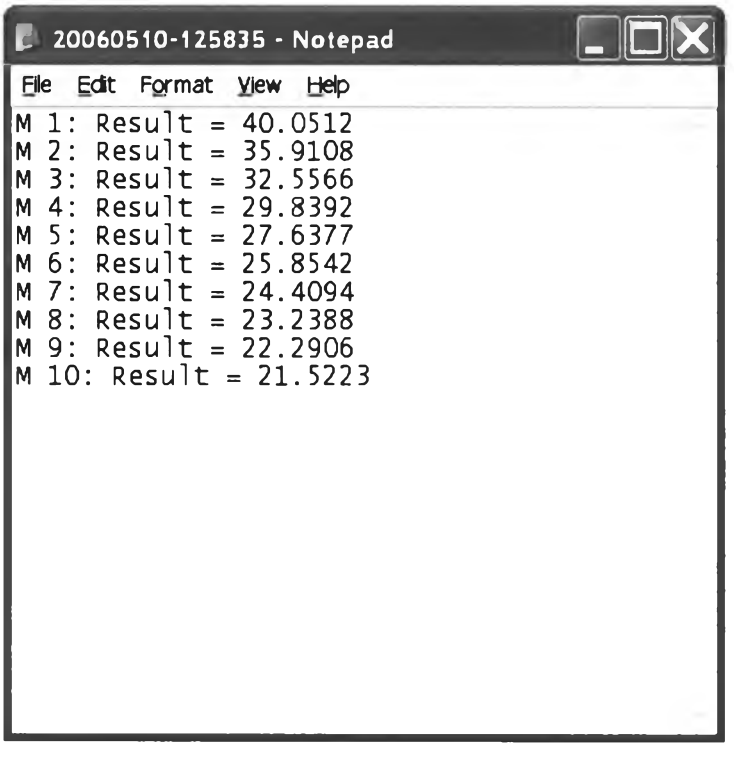
4.5.3.1.1 การรายงานผลความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร เป็นการรายงานผลความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารในนาทีแรกของการทำนายความเข้มข้นฝุ่นละออง ดังภาพที่ 4.15

4.5.3.1.2 การรายงานผลการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ เป็นการรายงานค่าอัตราการระบายอากาศ ในกรณีที่ผู้ใช้โปรแกรมไม่ทราบค่าอัตราการระบายอากาศ ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าอัตราการระบายอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 14.5 หน้าจอแสดงผลความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารของโปรแกรมทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร

4.5.3.2 การรายงานผลในรูปของแฟ้มเอกสาร (text file) โดยจะรายงานผลความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารเป็นรายนาที ตั้งแต่นาทีแรกจนถึงนาทีที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดไว้ ซึ่งจะไม่เกิน 99 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 การแสดงผลความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคารรายนาทีในรูปของแฟ้มเอกสารของโปรแกรมทำนายความเข้มข้นฝุ่นละอองภายในอาคาร