การพัฒนาระบบระบายอากาศชนิดไหลในแนวดิ่งอย่างสม่ำเสมอสำหรับอากาศที่มีฝุ่นฟุ้ง

นาย ดำรงค์ศักดิ์ เอี๊ยวชัยพร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4530-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF VERTICAL UNIFORM-FLOW VENTILATION SYSTEM FOR DUST-LADEN AIR

Mr.Dumrongsak Ieochaiporn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4530-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบระบายอากาศชนิดไหลในแนวดิ่งอย่างสม่ำเสมอสำหรับอากาศที่มีฝุ่นฟุ้ง
โดย	นาย ดำรงค์ศักดิ์ เอี๊ยวชัยพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดำรงค์ศักดิ์ เอี๊ยวชัยพร : การพัฒนาระบบระบายอากาศชนิดไหลในแนวดิ่งอย่างสม่ำเสมอสำหรับอากาศที่มีฝุ่นฟุ้ง. (DELVELOPMENT OF VERTICAL UNIFORM-FLOW VENTILATION SYSTEM FOR DUST – LADEN AIR) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ,อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล 370 หน้า. ISBN 974-17-4530-3

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการระบายอากาศชนิดไหลในแนวดิ่งอย่างสม่ำเสมอสำหรับอากาศที่มีฝุ่นฟุ้ง โดยทำการออกแบบและจัดสร้างชุดอุปกรณ์การทดสอบ และศึกษาถึงตัวแปรกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อการระบายอากาศ ได้แก่ ความเร็วลมอย่างสม่ำเสมอในแนวดิ่ง ความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง สัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรง และความสูงของผนังห้อง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเบื้องต้นของพฤติกรรมการไหลของอากาศของระบบระบายอากาศชนิดนี้ในลักษณะ 3 มิติ โดยใช้เทคนิค Computational Fluid Dynamics (CFD) การจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ซึ่งประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล และ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ในการศึกษาอิทธิพลความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีพิจารณาความเข้มข้นของขนาดอนุภาคแต่ละช่วง พบว่า เมื่อความเร็วลมในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนที่หนีออกจากด้านบนของห้องจะมีแนวโน้มลดลง แต่ความเข้มข้นของอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนมีค่าลดลงที่ความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.3 เมตรต่อวินาทีแต่กลับเพิ่มขึ้นที่ความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.5 เมตรต่อวินาที กรณีพิจารณาความเข้มข้นรวมของอนุภาคทุกขนาดพบว่า เมื่อความเร็วลมในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการระบายอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง ในกรณีพิจารณาความเข้มข้นของขนาดอนุภาคแต่ละช่วง พบว่า เมื่อความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอนุภาคทั้งขนาดใหญ่และเล็กที่หนีออกจากด้านบนของห้องจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีพิจารณาความเข้มข้นรวมของอนุภาคทุกขนาดพบว่า เมื่อความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการระบายอากาศจะมีแนวโน้มลดลง สำหรับการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรงโดยที่ความเร็วลมในแนวดิ่งคงที่นั้น พบว่าเมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรงลดลง ประสิทธิภาพการระบายอากาศลดลง อนึ่งในการจำลองการไหลของอากาศของระบบระบายอากาศ ในกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.1 0.33 และ 0.48 เมตรต่อวินาที ซึ่งภายในห้องมีสิ่งกีดขวางตั้งอยู่บริเวณตรงกลางห้อง พบว่าการกระจายตัวความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ภายในห้องได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญแต่มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวัดจริงในเงื่อนไขเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470679121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD : VERTICAL UNIFORM-FLOW / VENTILATION EFFICIENCY / CFD /
DUMRONSAK IEOCHAIPORN : DELVELOPMENT OF VERTICAL UNIFORM-FLOW VENTILATION SYSTEM FOR DUST- LADEN AIR. THESIS ADVISOR : PROF.WIWUT TANTHAPANICHAKOON,Ph.D. : THESIS COADVISOR : ASSOC.PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL , D.Eng., 370 pp.ISBN 974-17-4530-3

The objective of this research is to study the vertical uniform-flow ventilation system for dust laden-air. The apparatus is designed and constructed for investigating the parameters, namely, the vertical uniform-flow, velocity of disturbing air in the room, the opening fraction of floor area and the wall height of the room , which affect the system perfermance. Furthermore, the CFD (Computational Fluid Dynamics) method is also used to study the behavior of three dimensional air flow in the ventilated room. The CFD consists of solving a set of conservation equations, namely, equation of continuity and equation of motion.

When the concentration of each particle size is considered, the investigation of the vertical air velocity revealed that as the vertical air velocity increases, the concentration of large refugee particles (> 1 micron) at the top of the room decreases. On the other hand, the concentration of small refugee particles (<1 micron) decreases when the vertical air velocity is 0.3 m/s but increases slightly at the vertical air velocity of 0.5 m/s. When the overall concentration of particles is considered, it is found that the overall ventilation efficiency increases with an increase in the vertical air velocity. When the concentration of each particle size range is considered, the effect of velocity of disturbing air in the room reveals that as the velocity of the disturbing air increases, the concentration of particle refugee at the top of the room increases. When the overall concentration of particles is considered, it is found that the overall ventilation efficiency decreases with an increase in the velocity of disturbing air. Finally, it is found that the ventilation efficiency noticably decreases as the openign fraction of the room floor area decreases. In the air flow simulation of the ventilation system, for inlet air velocity of 0.1, 0.33 and 0.48 m/s with an obstacle in the middle of the room, the results show that the calculated velocity profiles are significantly affected but are in fair agreement with of the experimental ones.

Department.....Chemical Engineering..... Student's singature.....
Field of Study.....Chemical Engineering..... Advisor's signature.....
Acdemic year.....2003..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำต่างๆในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง และอาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้เสนอข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ และแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะพลังงานและวัสดุและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานะ อมรกิจบำรุง ที่ได้ให้ความสะดวกด้านสถานที่ และศูนย์เทคโนโลยีอนุภาคไทย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือวิเคราะห์วิจัยเกี่ยวกับวัสดุอนุภาคที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการกลศาสตร์ของไหลที่ได้สนับสนุนโปรแกรมฟีนิกและพี่ฮิมที่ให้ความรู้และเทคนิคเกี่ยวกับโปรแกรมฟีนิก (PHOENICS)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากทุนโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน (งบประมาณแผ่นดิน) จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบริษัท ปูนคุณภาพ จำกัด ที่ได้สนับสนุนแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ในการศึกษา

ขอขอบคุณพี่โตนที่ให้ความรู้เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์และ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุ

ขอขอบคุณกำแพงอุปสรรคที่ทำให้ผมแข็งแกร่งมากขึ้นและขอขอบคุณบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่ทำให้ผมได้อิ่มทุกมื้อ

งานวิจัยชิ้นนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้หากปราศจาก คุณแม่ พี่ปุ๊ก พี่หมี และแอน รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ จากเทคนิคกรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและชาวหอมุกรินที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์..... ผ
บทที่
1. บทนำ..... 1
1.1 มูลเหตุจูงใจ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2
2. ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3
2.1 คำศัพท์และความหมาย..... 3
2.2 อันตรายของฝุ่น..... 4
2.2.1 อันตรายของฝุ่นต่อสุขภาพ..... 4
2.2.2 ผลกระทบอันเนื่องมาจากขนาดของฝุ่น..... 6
2.3 กระบวนการผลิตของโรงงานผลิตระดานโต้คลื่น..... 8
2.3.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดและวิธีการควบคุมของโรงงานผลิตและขึ้นรูปกระดานโต้คลื่น..... 9
2.4 การประเมินสมบัติของการไหลของฝุ่น..... 12
2.5 การระบายอากาศ..... 20
2.5.1 การระบายอากาศแบบทำให้เจือจาง..... 23
2.5.2 การระบายอากาศแบบเฉพาะแห่ง..... 25
2.5.3 ท่อดูดในระบบระบายอากาศ..... 26
2.6 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง..... 29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 31

3. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบาย..... 36

3.1 รูปแบบทั่วไปของสมการอนุรักษ์..... 36

3.2 สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย..... 37

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน..... 39

3.4 ประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลแบบปั่นป่วน..... 43

3.4.1 Standard k-ε Model..... 43

3.4.2 Low-Re ของ k-ε Model..... 44

3.5 Wall Function..... 45

4 เทคนิค Computational Fluid Dynamics..... 48

4.1 ความหมายของเทคนิค Computational Fluid Dynamics..... 48

4.2 ลำดับขั้นตอนของเทคนิค CFD..... 48

4.2.1 กริด(Grid)..... 49

4.2.2 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ในเป็นสมการพีชคณิต..... 51

4.3 การคำนวณความเร็วของระบบ..... 55

4.3.1 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม..... 55

4.3.2 วิธีการ SIMPLE..... 58

4.4 วิธีการแก้สมการพีชคณิต..... 61

4.5 รีแล็คเซชัน (Relaxtion)..... 63

5 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 65

5.1 ฝุ่นที่ใช้ในการทดลอง..... 65

5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 65

5.2.1 อุปกรณ์วิเคราะห์..... 65

5.2.2 อุปกรณ์การทดลอง..... 69

5.3 สภาวะในการทดลอง..... 76

5.4 ขั้นตอนการทดลอง..... 77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	5.5 การทดลองสำหรับเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	80
	5.6 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	82
6.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	87
	6.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองด้านลักษณะสมบัติของฝุ่น.....	87
	6.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่สภาวะต่างๆ.....	100
	6.2.1 อิทธิพลของความเร็วลมในแนวดิ่ง.....	100
	6.3.2 อิทธิพลของความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง.....	138
	6.3.3 อิทธิพลของสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง.....	174
	6.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง.....	185
	6.4 ประโยชน์ของการทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศ.....	202
7.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	203
	7.1 สรุปผลการทดลอง.....	203
	7.2 ข้อเสนอแนะ.....	206
รายการอ้างอิง.....		207
ภาคผนวก.....		210
	ภาคผนวก ก.....	211
	ภาคผนวก ข.....	214
	ภาคผนวก ค.....	222
	ภาคผนวก ง.....	350
	ภาคผนวก จ.....	368
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		370

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	อาคารที่เป็นแหล่งกำเนิดฝุ่นและประเภทของฝุ่นหลักในโรงงานคอบบร้า.....	9
2.2	แหล่งกำเนิดฝุ่นและการควบคุมฝุ่นในโรงงานคอบบร้า.....	11
2.3	Evaluation of flowability index.....	17
2.4	Evaluation of floodability index.....	19
2.5	องค์ประกอบของอากาศตามธรรมชาติซึ่งถือว่าเป็นอากาศบริสุทธิ์.....	21
2.6	ความเร็วจับที่แนะนำให้ใช้เพื่อควบคุมมลพิษจากกิจกรรมประเภทต่างๆ.....	28
2.7	ปริมาณฝุ่นแร่ในบรรยากาศของการทำงานตลอดระยะเวลาการทำงานปกติ.....	30
2.8	ระดับความสกปรกที่มาตรฐานการระบายอากาศต่างๆ.....	32
5.1	ความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าระบบในแต่ละการทดลอง.....	85
5.2	คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศที่ใช้ในการจำลอง.....	86
6.1	สมบัติการไหลของฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตแบบเคลือบผิว และค่าเฉลี่ยของขนาดฝุ่นที่ 50 % โดยปริมาตร(น้ำหนัก).....	89
6.2	สมบัติการไหลของฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตแบบไม่เคลือบผิว และค่าเฉลี่ยของขนาดฝุ่นที่ 50 % โดยปริมาตร(น้ำหนัก).....	90
6.3	สมบัติการไหลของฝุ่น EVA และค่าเฉลี่ยของขนาดฝุ่นที่ 50 % โดยปริมาตร(น้ำหนัก).....	91
6.4	สมบัติการไหลของฝุ่นเถ้าลอย และค่าเฉลี่ยของขนาดฝุ่นที่ 50 % โดยปริมาตร(น้ำหนัก).....	92
6.5	ผลการทดลองวัดความเร็วของอากาศที่ด้านบนของห้อง.....	185
6.6	ผลการทดลองของกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที....	186
6.7	ผลการทดลองของกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.33 เมตรต่อวินาที...	187
6.8	ผลการทดลองของกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.48 เมตรต่อวินาที...	188
6.9	ผลการจำลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที.....	194
6.10	ผลการจำลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.33 เมตรต่อวินาที.....	195
6.11	ผลการทดลองของกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาที....	196
6.12	ตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.10 เมตรต่อวินาที.....	197

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

6.13 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.33 เมตรต่อวินาที..... 198

6.14 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.48 เมตรต่อวินาที..... 199

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภูมิการผลิตของโรงงานคอบบร้า	8
2.2	กระบวนการขัดแต่งผิวมัน	12
2.3	กระบวนการโป้ว	12
2.4	Measurement of angel of repose	14
2.5	Measurement of angel of spatula	15
2.6	Device for measuring dispersibility	18
2.7	Powder characteristic tester	20
2.8	การระบายอากาศแบบทำให้เจือจาง	23
2.9	การระบายอากาศแบบเฉพาะแห่ง	25
2.10	ท่อดูดอากาศประเภทเอนโคลสเชอร์	27
2.11	ท่อดูดอากาศแบบแคปเจอริงแบบต่างๆ	27
2.12	ท่อดูดอากาศแบบรีซีฟวิง	29
3.1	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของของไหลในระบบการไหลแบบปั่นป่วน ณ บริเวณใกล้ผนัง	45
4.1	ลำดับขั้นตอนของวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิค CFD	49
4.2	ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ	49
4.3	ลักษณะการแบ่งกริดและลักษณะของปริมาตรควบคุมที่แสดงในแบบ 2 มิติ	50
4.4	ลักษณะของปริมาตรควบคุมที่บริเวณสภาวะขอบเขต	50
4.5	ลักษณะของกริดที่ใช้ในสมการ 4.2	51
4.6	ลักษณะโพรไฟล์ของ ϕ ระหว่างโนดที่เป็นเส้นตรง	52
4.7a	การกำหนดค่า ϕ_e เมื่อ F_e มีค่าเป็นบวก ด้วยวิธีอัพวินดิฟเฟอร์เรนท์	54
4.7b	การกำหนดค่า ϕ_e เมื่อ F_e มีค่าเป็นลบ ด้วยวิธีอัพวินดิฟเฟอร์เรนท์	54
4.8	ตำแหน่งที่เก็บค่าองค์ประกอบของความเร็ว	57
4.9	ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการโมเมนตัม x-component	57
4.10	ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการโมเมนตัม y-component	57
4.11	ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในสมการความต่อเนื่อง	60
4.12	ลักษณะการแก้สมการด้วยวิธีทีละแถว	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.1	ลักษณะของเครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุผง	66
5.2	ภาพถ่ายของเครื่องวัดความเร็วลมสำหรับวัดความเร็วลมภายในห้อง	67
5.3	ภาพถ่ายเครื่องวัดผลต่างความดัน	68
5.4	ภาพถ่ายเครื่องวัดความเข้มข้นแบบนับจำนวน (Dust Counter)	68
5.5	ภาพถ่ายของเครื่องกำเนิดลม	69
5.6	ภาพถ่ายเครื่องควบคุมความเร็วรอบ	70
5.7	ภาพถ่ายของเครื่องป้อนอนุภาคแบบตั้งโต๊ะ(ภายในกล่องสี่เหลี่ยมใต้โต๊ะจะมีพัดลมเล็กเป่าลมไปกระจายฝุ่นที่ตกออกจากท่อ	71
5.8	ภาพถ่ายพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง	72
5.9	ภาพถ่ายของปั๊มสูญญากาศ	72
5.10	ไดอะแกรมชุดอุปกรณ์ระบบระบายอากาศในแนวดิ่ง	74
5.11	ภาพถ่ายห้องระบายอากาศ : (A) ภาพด้านข้าง (B) ภาพด้านหน้า	75
5.12	ภาพถ่ายห้องระบายอากาศและท่อลม	75
5.13	ภาพถ่ายระบบกำจัดฝุ่นออกให้หมดก่อนที่จะปล่อยลมออกสู่บรรยากาศ	76
5.14	สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด(มองด้านบน)	78
5.15	สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (มองด้านบน)	78
5.16	สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (มองด้านบน)	79
5.17	สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด(มองด้านบน)	79
5.18	ตำแหน่งของจุดวัดบนห้องมองด้านบน(วัดที่ใจกลางของสี่เหลี่ยม)	80
5.19	ตำแหน่งของจุดวัดภายในห้อง	81
5.20	ลักษณะรูปร่างที่ใช้ในเทคนิค CFD	82
5.21	ลักษณะของกริดในระนาบ XZ	83
5.22	ลักษณะของกริดในระนาบ YZ	84
5.23	ลักษณะของกริดในระนาบ XYZ	84
6.1	การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตแบบเคลือบผิว	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.2	การกระจายขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตแบบไม่เคลือบผิว.....	94
6.3	การกระจายขนาดของฝุ่น EVA จากโรงงานผลิตกระดานโต้คลื่น.....	95
6.4	การกระจายขนาดของเถ้าลอย.....	96
6.5	ลักษณะของฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตแบบเคลือบผิว ขยาย 5000 เท่า.....	97
6.6	ลักษณะของฝุ่นแคลเซียมคาร์บอเนตแบบไม่เคลือบผิว ขยาย 5000 เท่า.....	97
6.7	ลักษณะของฝุ่น EVA จากโรงงานผลิตและขึ้นรูปกระดานโต้คลื่น ขยาย 1000 เท่า.....	98
6.8	ลักษณะของฝุ่นเถ้าลอย ขยาย 1000 เท่า.....	98
6.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	102
6.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	102
6.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงผนัง 2 เมตร.....	103
6.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	105
6.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2เมตร.....	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 106

6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 108

6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 108

6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 109

6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 111

6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 111

6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร..... 112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.21	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีที่สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง100% เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	114
6.22	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีที่สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกล เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	114
6.23	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีที่สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	115
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีที่สัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	115
6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณี ปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้น ตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	118
6.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณี เปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	118
6.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณี เปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อสัดส่วนพื้นที่ เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	119
6.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณี ปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้น ตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 122

6.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 123

6.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 125

6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 125

6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 126

6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 128

6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 129

6.37 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง100%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 131

6.38 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 131

6.39 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 132

6.40 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร..... 132

6.41 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรง 100%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด..... 136

6.42 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด..... 136

6.43 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด..... 137

6.44 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมในแนวดิ่ง กรณีสัดส่วนพื้นที่เปิดของตะแกรง 50%ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด.. 137

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.45	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.11 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	140
6.46	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.36 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	140
6.47	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.47 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	141
6.48	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.11 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	143
6.49	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.33 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	143
6.50	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.47 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	144
6.51	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.09 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	146
6.52	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.31เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	146
6.53	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75%ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	147

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.54	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.1 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	149
6.55	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.31 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	149
6.56	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.49 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	150
6.57	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	152
6.58	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	152
6.59	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	153
6.60	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.12 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	156
6.61	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.35 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	156
6.62	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.48 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 100% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	157

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.63	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.14 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	159
6.64	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.31 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	159
6.65	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.47 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ไกลของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	160
6.66	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.13 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	162
6.67	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.31 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	162
6.68	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 75% ใกล้ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	163
6.69	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.1 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	165
6.70	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.31 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	165
6.71	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคกับขนาดอนุภาคที่ช่วงต่างๆกรณีความเร็วลมในแนวดิ่ง 0.49 เมตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง 50% ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่ความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	166

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.72	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง กรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.10 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	168
6.73	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	168
6.74	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	169
6.75	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.1 เมตรต่อวินาที	172
6.76	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที	172
6.77	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับความเร็วลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องกรณีความเร็วลมในแนวดิ่งประมาณ 0.5 เมตรต่อวินาที	173
6.78	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง เมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	175
6.79	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	175
6.80	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อความสูงของผนังห้อง 2 เมตร.....	176

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.81	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	179
6.82	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรงกรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	179
6.83	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรงกรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้องเมื่อความสูงของผนังห้อง 1.5 เมตร.....	180
6.84	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีปิดพัดลมที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง.	183
6.85	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีเปิดพัดลมระดับ LOW ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง.....	183
6.86	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการระบายอากาศกับสัดส่วนพื้นที่เปิดของพื้นตะแกรง กรณีเปิดพัดลมระดับ HIGH ที่เป่ารบกวนกระแสอากาศภายในห้อง.....	184
6.87	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IY=9 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.10 เมตรต่อวินาที.....	190
6.88	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IX=16 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.10 เมตรต่อวินาที.....	190
6.89	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IY=9 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ0.33 เมตรต่อวินาที.....	191
6.90	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IX=16 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ0.33 เมตรต่อวินาที.....	191
6.91	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IY=9 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.48 เมตรต่อวินาที.....	192

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.92	ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วในระนาบที่ IX=16 ของกรณีที่ความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.48 เมตรต่อวินาที.....	192
6.93	การเปรียบเทียบการกระจายตัวความเร็วของอากาศระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.10 เมตรต่อวินาที.....	200
6.94	การเปรียบเทียบการกระจายตัวความเร็วของอากาศระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.33 เมตรต่อวินาที.....	200
6.95	การเปรียบเทียบการกระจายตัวความเร็วของอากาศระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลองกรณีความเร็วขาเข้าของอากาศเท่ากับ 0.48 เมตรต่อวินาที.....	201
6.96	ตำแหน่งที่คนงานควรจะยืนปฏิบัติงานภายในห้อง.....	202

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแรงดันที่กระทำ
a	สัมประสิทธิ์ของสมการพีชคณิต
E	ค่าบงบอกความขรุขระของผนัง
f_x, f_y, f_z	แรงที่กระทำบนทุกๆ จุดในระบบต่อหน่วยมวล
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก
k	ค่าพลังงานจลน์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนต่อมวล
P	ความดัน
$\overline{P}$	ความดันเฉลี่ย
P'	ความดันปรับปรุง
P^*	ความดันเดาเริ่มต้น (Initial guess pressure)
S	แหล่งกำเนิด
t	เวลา
u^*	Friction velocity
u, v, w	องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแกน x, y, z
$\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$	ความเร็วเฉลี่ยตามแกน x, y, z
u', v', w'	ความเร็วที่เบี่ยงเบนไปจากความเร็วเฉลี่ยตามแกน x, y, z

<u>สัญลักษณ์กรีก</u>

ε	อัตราการกระจายของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืด
μ_t	ความหนืดของการหมุนวน (Eddy viscosity)
α	รีแล็คเซชัน
λ	สัมประสิทธิ์อันดับที่สองของความหนืด
τ	ความเค้นเฉือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ϕ	ตัวแปรที่ต้องการศึกษา
Γ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ ϕ
δx	ระยะห่างระหว่างโนดสองโนด
κ	ค่าคงที่ของ Von Karman

ตัวห้อย

Sim	Simulation
Exp	Experiment

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย