

การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหล
ของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

นายเอกรงค์ สุขจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-533-575-4

**NUMERICAL STUDY OF TURBULENCE EFFECTS ON
BEHAVIORS OF AIRFLOW, TEMPERATURE,
HUMIDITY AND PARTICLE IN A CLEAN ROOM**

Eakarong Sukjit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

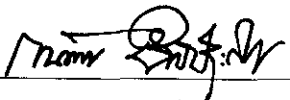
Academic Year 2006

ISBN 974-533-575-4

การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหล
ของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

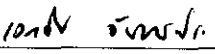
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



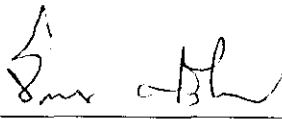
(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ



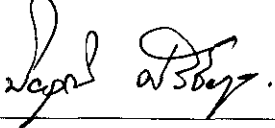
(ผศ. ดร.เอกชัย จันทสาโร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.จิระพล ศรีเสรีภูมิผล)

กรรมการ



(ดร.ปิยวุฒิ ศรีชัยกุล)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณีย์ รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพงษ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกรงค์ สุขจิต : การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด (NUMERICAL STUDY OF TURBULENCE EFFECTS ON BEHAVIORS OF AIRFLOW, TEMPERATURE, HUMIDITY AND PARTICLE IN A CLEAN ROOM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร, 98 หน้า. ISBN 974-533-575-4

จุดประสงค์ของการศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด คือการทำความเข้าใจในพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งจะนำไปสู่สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตต่างๆ ที่ใช้ห้องสะอาด ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพและลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นด้วยภาษา Visual C++ บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด ขั้นตอนวิธี SIMPLE และการประมาณในช่วงของ Rhie and Chow ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วและสนามความดัน ในการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ $k-\epsilon$ ของ Launder and Sharma โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการทดสอบและตรวจสอบความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขของปัญหาการไหลพื้นฐานที่เป็นที่ยอมรับก่อนทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา เอกรงค์ สุขจิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เอกชัย จันทสาโร

EAKARONG SUKJIT : NUMERICAL STUDY OF TURBULENCE
EFFECTS ON BEHAVIORS OF AIRFLOW, TEMPERATURE, HUMIDITY
AND PARTICLE IN A CLEAN ROOM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
EKACHAI JUNTASARO, Ph.D. 98 PP. ISBN 974-533-575-4

CFD/TURBULENCE MODEL/HUMIDITY/PARTICLE/CLEAN ROOM

The objective of this numerical study of turbulence effects on behaviors of airflow, temperature, humidity and particle in a clean room is to understand the behavior of environment inside a clean room leading to the suitable environment for manufacturing that employs a clean room. This will improve the product quality and decrease the defected product. In this study, the computer program is developed on Visual C++ and on the basis of the finite volume method. The SIMPLE algorithm combined with the Rhie and Chow interpolation is used to avoid the decoupling between the velocity field and the pressure field. For turbulent flow, the low-Reynolds-number linear $k - \epsilon$ turbulence model of Launder and Sharma is employed. The developed computer program is tested and validated by comparing the computed results with the analytical solution, experimental data and acceptable numerical solution of fundamental flow problems before analyzing the turbulence effects on the behavior of environment in the clean room.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature เอกกร สุจิตต์

Advisor's Signature เอกชัย จuntasaro

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จลุล่วงด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดขึ้นมิได้ ถ้าหากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำปรึกษา และชี้แนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนคอยกระตุ้นให้กำลังใจรวมถึงให้การทำงาน จนทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจและกำลังทรัพย์ในการฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ จนผ่านไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงในความเมตตาของท่าน

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ จำพิศ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และรองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ที่ได้ให้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหลเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปิยวุฒิ ศรีชัยกุล ผู้อำนวยการฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้ให้ความกรุณาในเรื่องของทุนการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรางค์รัตน์ จันทสาโร รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสมาชิกของห้อง CML (Computational Mechanics Laboratory) ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูซงค์ อุทโยภาส ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของโปรแกรมแสดงผลการคำนวณ SCView

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กิริติ สุกฤษณ์ และคุณอาทิตย์ คุณศรีสุข นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับความรู้และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสาทิพย์ จุไรรัตน์พร หัวหน้าฝ่ายห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คุณประสิทธิ์ชัย ดำเนินฐิติกิจ วิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคุณกอบแก้ว ชัยประโคน พนักงานห้องทดลองประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอักษรวิทยา เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ดูแลในเรื่องของการเบิกจ่ายเงินทุนการศึกษา และให้คำปรึกษาในเรื่องของ ระเบียบข้อบังคับต่างๆ ในการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ บริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ . นครราชสีมา ที่ให้ความ อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ของห้องสะอาดที่ใช้ในงานวิจัย และให้ความช่วยเหลือในเรื่องของ เครื่องมือวัดต่างๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และ สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำ วิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณชัยฤกษ์ เชื้อประสาธ นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรม เครื่อง กกล ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับกรณีทดสอบสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของความชื้นสัมพัทธ์ ภายในห้องสะอาด

ขอขอบคุณ คุณเกียรติศักดิ์ เหมี่ยมสูงเนิน และคุณอักรพล มีสิทธิ์ สมาชิกของห้อง CFD Lab (Computational Fluid Dynamics Laboratory) ในฐานะที่เป็นเพื่อนร่วมงานที่คิดตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณภูษิต เคยสนิท คุณยรรยง ปลิวไธสง คุณชัยรัตน์ เกียรติธำรงค์ คุณปราโมทย์ สิงห์ทอง คุณพัชรินทร์ จินดาหลวง คุณมลธิลา สุภาภรณ์ และคุณเศรษฐกิจ ป่วงกลาง ที่ได้ให้ความ ช่วยเหลือในเรื่องของการเก็บข้อมูลต่างๆ ภายในห้องสะอาด ซึ่งหากไม่มีข้อมูลเหล่านี้ งานวิจัยนี้คง ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนัก งานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อปาน คุณแม่ตุ้ และคุณอาต่าย ที่ให้การสนับสนุนในเรื่อง ของการศึกษาเป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกสำนึกในความเสียสละของท่านมาโดยตลอด

เอกรงค์ สุขจิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับห้องสะอาด	5
2.1.1 เทคโนโลยีห้องสะอาดคืออะไร	5
2.1.2 มาตรฐานการควบคุมระดับความสะอาด (Cleanliness Classes) ของห้องสะอาด.....	6
2.1.3 ประเภทของห้องสะอาด.....	7
2.1.3.1 Conventional Flow Clean Room	7
2.1.3.2 Unidirectional Flow Clean Room.....	8
2.1.3.3 Mixed Flow Clean Room.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.4	สภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด	9
2.1.4.1	อุณหภูมิ	9
2.1.4.2	ความดัน	9
2.1.4.3	ความชื้นสัมพัทธ์	9
2.1.4.4	เสียงรบกวน.....	10
2.2	งานวิจัยด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เกี่ยวข้องกับห้องสะอาด.....	10
3	กรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของของไหล.....	16
3.1	สมการควบคุม.....	16
3.1.1	สมการของการไหล	16
3.1.2	สมการพลังงาน	17
3.1.3	สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ.....	18
3.1.4	สมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย	18
3.2	ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด.....	19
3.3	ขั้นตอนวิธี SIMPLE.....	24
3.4	เงื่อนไขขอบเขต	30
3.4.1	เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า.....	30
3.4.2	เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก.....	30
3.4.3	เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตร	30
3.4.4	เงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำ.....	31
3.4.5	เงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง	31
3.5	เทคนิคการกันค่า (Block Off Technique	31
3.6	เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม (Momentum Source Technique).....	32
3.7	การสร้างกริด.....	32
4	การตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	34
4.1.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องกุ่มานานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ	34
4.1.2 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวาง ในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ	35
4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน	35
4.2.1 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องกุ่มานานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ.....	35
4.2.2 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวาง ในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ	36
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของอนุภาคน้ำ.....	36
4.3.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อน แบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ	36
4.3.2 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ	36
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของความชื้น	37
4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่นำมาใช้ในการจำลองอุปกรณ์ ภายในห้องสะอาด.....	37
4.5.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ.....	37
4.5.2 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้ง แหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ.....	37
5 พฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด.....	52
5.1 รูปร่างของห้องสะอาด.....	52
5.2 เงื่อนไขขอบเขตของสภาวะแวดล้อมของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องสะอาด.....	55
5.2.1 โต้ะปฏิบัติงาน	56
5.2.2 แผงหลอดไฟ	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 ช่องลม	56
5.2.4 ช่องลมกลับ	56
5.2.5 HEPA	56
5.2.6 Laminar Flow Hood	57
5.3 พฤติกรรมของการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด	58
5.4 พฤติกรรมของอนุภาคนิวเคลียสและความชื้นภายในห้องสะอาด	63
5.5 พฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด	67
5.6 ผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด	70
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
6.1 สรุปผลการวิจัย	73
6.2 ข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียบนพิกัดฉาก 3 มิติ ของสมการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย	81
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด	85
ภาคผนวก ค รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	89
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	96
ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐาน Federal Standard 209E Airborne Particulate Cleanliness Classes	6
2.2 มาตรฐาน ISO/TC 209 14644-1 Airborne Particulate Cleanliness Classes	7
3.1 ตัวแปรที่ต้องการทราบค่า สัมประสิทธิ์ของเทอมการแพร่ และเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของการไหลแบบปั่นป่วนและไม่อัดตัว	20
5.1 ขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องสะอาด.....	55
5.2 เงื่อนไขขอบเขตของสถานะแวดล้อมของช่องลม	56
5.3 เงื่อนไขขอบเขตของสถานะแวดล้อมของ HEPA	57
ค.1 ชื่อตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับตัวแปรทั่วไป.....	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ห้องสะอาดประเภท Conventional Flow Clean Room..... 7
2.2	ห้องสะอาดประเภท Unidirectional Flow Clean Room 8
2.3	ห้องสะอาดประเภท Mixed Flow Clean Room..... 9
2.4	ห้องสะอาดที่ Cheng et al. (1999) ใช้ในการศึกษา..... 11
2.5	ห้องสะอาดที่ Hu et al. (2002) ใช้ในการศึกษา..... 12
2.6	ห้องปรับอากาศที่ Teodosiu et al. (2003) ใช้ในการศึกษา..... 13
2.7	ห้องสะอาดที่ Rouaud and Havet (2002) ใช้ในการศึกษา 14
3.1	ปริมาตรควบคุมบนพิกัดฉาก..... 21
3.2	การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE ในการแก้ปัญหาการไหล 29
3.3	ระบบกริดแบบสม่ำเสมอ..... 33
3.4	ระบบกริดแบบไม่สม่ำเสมอ..... 33
4.1	ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m) 38
4.2	การกระจายตัวของความเร็ว u บริเวณปลายช่องคู่ขนานของปัญหาการไหลแบบ ราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$ 38
4.3	ลักษณะของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m) 39
4.4	การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y = 0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบ ราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$ 39
4.5	การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x = 0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบ ราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$ 40
4.6	ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบ พิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)..... 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$	41
4.8 การกระจายตัวของความเค้นเฉือนของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$	41
4.9 การกระจายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$	42
4.10 การกระจายตัวของการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$	42
4.11 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (หน่วยเป็น m).....	43
4.12 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y = 0.5$ m และ $z = 0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 10,000$	43
4.13 การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x = 0.5$ m และ $z = 0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 10,000$	44
4.14 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m).....	44
4.15 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y = 0.01474$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Ra = 100,000$	45
4.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $y = 0.01474$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Ra = 100,000$	45
4.17 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (หน่วยเป็น m).....	46
4.18 การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 678$	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 678$	47
4.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 678$	47
4.21 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $y = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 678$	48
4.22 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (หน่วยเป็น m)	48
4.23 การกระจายตัวของความเร็ว u บนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$	49
4.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$	49
4.25 การกระจายตัวของความชื้นบนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$	49
4.26 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)	50
4.27 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$	50
4.28 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m).....	50
4.29 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$	51
4.30 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 10,000$	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	รูปร่างของห้องสะอาด SQE C/R..... 53
5.2	รายละเอียดตำแหน่งของ HEPA (หน่วยเป็น m)..... 53
5.3	รายละเอียดตำแหน่งของแผงหลอดไฟ (หน่วยเป็น m)..... 54
5.4	รายละเอียดตำแหน่งของช่องลม ช่องลมกลับ โต๊ะปฏิบัติงาน และ Laminar Flow Hood (หน่วยเป็น m) 54
5.5	รายละเอียดตำแหน่งของช่องลม ช่องลมกลับ โต๊ะปฏิบัติงาน และ Laminar Flow Hood (หน่วยเป็น m) (ต่อ)..... 55
5.6	หลักการทำงานของ Laminar Flow Hood 58
5.7	ตำแหน่งของระนาบที่ใช้ในการพิจารณาเวกเตอร์ความเร็ว 59
5.8	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane A (z = 1.9 m)..... 60
5.9	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane B (z = 3.7 m) 60
5.10	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane C (z = 5 m) 60
5.11	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane D (x = 1.1 m) 61
5.12	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane E (x = 5.4 m)..... 61
5.13	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane F (y = 1 m) 62
5.14	เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane G (y = 1.5 m) 62
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันอิ่มตัวของไอน้ำในช่วง 5 °C-100 °C..... 64
5.16	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m..... 64
5.17	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 10 °C..... 65
5.18	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 30 °C..... 66
5.19	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนไว้บริเวณกลางห้องสะอาด โดยอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 20 °C..... 67
5.20	การกระจายตัวของความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particles/m ³) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m..... 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองและระดับความสะอาด ที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m กรณี	69
5.22 การติดตั้งช่องลมกลับเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการระบายฝุ่นละอองออกจากห้องสะอาด.....	69
5.23 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง และระดับความสะอาด ที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m ที่ปริมาณ ACH = 144 h ⁻¹ , 72 h ⁻¹ และ 14 h ⁻¹	71
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ACH กับ เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละออง ที่มีระดับความสะอาดมากกว่า Class 100.....	72
5.25 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง ที่มีต่อระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด	72
ข.1 ช่วงของเศษส่วนปริมาตรของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อการไหล	88

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	สัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการจัดรูปสมการตามอย่างระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด
b^ϕ	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของ ϕ ตามอย่างระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด
c	ระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศ
$C_{p,a}$	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C, $C_{p,a} = 1,006.97 \text{ J/(kg.K)}$
$C_{p,v}$	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C, $C_{p,v} = 1,870.4 \text{ J/(kg.K)}$
C_{e1}	ค่าคงที่ตัวที่ 1 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{e1} = 1.44$
C_{e2}	ค่าคงที่ตัวที่ 2 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{e2} = 1.92$
C_{e3}	ค่าคงที่ตัวที่ 3 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $C_{e3} = 1.0$
C_μ	ค่าคงที่ของ μ_t , $C_\mu = 0.09$
D	เทอมเสริมของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $D = 2 \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_i} \right)$
$D_{i,m}$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอน้ำ, $D_{i,m} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2}$
$D_{i,c}$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของฝุ่นละออง, $D_{i,c} \approx v$
E	เทอมเสริมของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $E = 2 \frac{\mu}{\rho} \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m} \right) \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_m} \right)$
f_μ	ฟังก์ชันการหน่วงของ μ_t , $f_\mu = \exp \left[\frac{-3.4}{(1 + Re_t/50)^2} \right]$
f_{e1}	ฟังก์ชันการหน่วงตัวที่ 1 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $f_{e1} = 1.0$
f_{e2}	ฟังก์ชันการหน่วงตัวที่ 2 ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $f_{e2} = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$
g	แรงโน้มถ่วงของโลก

คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ (ต่อ)

g_i	แรงโน้มถ่วงของโลกที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
h	เอนทาลปี
H	ความสูงของรูปร่างของปัญหาการไหล
k	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
k^+	$k^+ = \frac{k}{u_\tau^2}$
k_{Inlet}	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ทางเข้า
k_T	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ
$k_{T,a}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C, $k_{T,a} = 26.14 \times 10^{-3} \text{ W/(m.K)}$
$k_{T,v}$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C, $k_{T,v} = 19.56 \times 10^{-3} \text{ W/(m.K)}$
L	ความยาวของรูปร่างของปัญหาการไหล
L_s	ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic Length)
m	เศษส่วนมวลของไอน้ำ, $m = \frac{m_v}{m_v + m_a}$
\dot{m}	อัตราการไหลของมวล
m_a	มวลของอากาศแห้ง
m_v	มวลของไอน้ำ
m_p	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการความดันแก้ไข
M_a	มวลโมเลกุลของอากาศแห้ง, $M_a = 28.97$
M_v	มวลโมเลกุลของไอน้ำ, $M_v = 18.015$
p	ความดัน
p'	ความดันแก้ไข
P_k	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างพลังงานในสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน $P_k = -\overline{\rho u'_j u'_i} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$
P_{sat}	ความดันอิ่มตัวของไอน้ำ
Pr	พารามิเตอร์ทอลนัมเบอร์, $Pr = \frac{\mu C_p}{k_T}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

R	ค่าคงที่ของก๊าซสากล (Universal Gas Constant), $R = 8,314 \text{ J/(kmol.K)}$
Ra	Rayleigh Number, $Ra = \frac{g\beta(T_H - T_C)H^3}{\nu^2} Pr$
Re	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, $Re = \frac{\rho U_o L}{\mu}$
Re _t	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของความปั่นป่วน, $Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$
Re _{\tau}	$Re_\tau = \frac{\rho u_\tau L}{\mu}$
S ^{\phi}	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของ ϕ
S ^h	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการพลังงาน
S ^k	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
S ^u	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการโมเมนตัมในแนวแกน x
S ^v	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการโมเมนตัมในแนวแกน y
S ^w	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการโมเมนตัมในแนวแกน z
S ^{\varepsilon}	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
S _c	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย
S _h	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการพลังงาน
S _i	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการโมเมนตัมที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
S _k	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
S _x	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการโมเมนตัมในแนวแกน x
S _y	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการโมเมนตัมในแนวแกน y
S _z	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการโมเมนตัมในแนวแกน z

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

S_e	เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียจากผลกระทบอื่นๆ ของสมการอัตราการผลิต/สูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
$Sc_{t,m}$	ชนิดที่นับเบอร์ของความปั่นป่วน (Turbulent Schmidt Number) ของไอน้ำ, $Sc_{t,m} = 0.7$
$Sc_{t,c}$	ชนิดที่นับเบอร์ของความปั่นป่วนของฝุ่นละออง, $Sc_{t,c} = 1.0$
t_{ji}	เทนเซอร์ของความเค้น, $t_{ji} = \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$
T	อุณหภูมิ
T_C	อุณหภูมิของผนังด้านร้อน
T_H	อุณหภูมิของผนังด้านเย็น
T_I	ความรุนแรงของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity)
T_r	อุณหภูมิอ้างอิง
u	ความเร็วในแนวแกน x
u_i	ความเร็วที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
u^+	$u^+ = \frac{u}{u_\tau}$
u_τ	$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$
U_o	ความเร็วที่ทางเข้า
$-uv^+$	$-uv^+ = \frac{\overline{u'v'}}{u_\tau^2}$
v	ความเร็วในแนวแกน y
V	ขนาดของความเร็ว
w	ความเร็วในแนวแกน z
x	พิกัด x ของระบบพิกัดฉาก
x_a	เศษส่วนโมลของอากาศแห้ง, $x_a = \frac{\frac{m_a}{M_a}}{\frac{m_v}{M_v} + \frac{m_a}{M_a}}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

x_i	ระบบพิกัดฉากที่เขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์
x_v	เศษส่วนโมลของไอน้ำ, $x_v = \frac{m_v}{M_v} \frac{m_v + m_a}{M_v + M_a}$
y	พิกัด y ของระบบพิกัดฉาก
y^+	$y^+ = \frac{\rho y u_\tau}{\mu}$
z	พิกัด z ของระบบพิกัดฉาก
β	สัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรเนื่องจากอุณหภูมิ, $\beta = \frac{1}{T_r(K)}$
δ_{ij}	Kronecker Delta
ε	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
ε^+	$\varepsilon^+ = \varepsilon \left(\frac{\mu}{\rho u_\tau^4} \right)$
ε_{inlet}	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ทางเข้า
ϕ	ตัวแปรหลักในสมการควบคุม
ϕ	ความชื้นสัมพัทธ์
μ	ความหนืดพลวัตของอากาศ
μ_a	ความหนืดพลวัตของอากาศแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C, $\mu_a = 18.36 \times 10^{-6}$ (N.s)/m ²
μ_t	ความหนืดของความปั่นป่วน, $\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
μ_v	ความหนืดพลวัตของไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C, $\mu_v = 19.56 \times 10^{-6}$ (N.s)/m ²
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ
ν	ความหนืดจลศาสตร์, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
$-\overline{\rho u'_j u'_i}$	Reynolds Stress Tensor, $-\overline{\rho u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$
σ_k	Effective Prandtl Number for the diffusion of Turbulence, $\sigma_k = 1.0$
σ_T	Turbulence Prandtl Number for the diffusion of Total Energy, $\sigma_T = 0.9$
σ_ε	ค่าคงที่ของสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน, $\sigma_\varepsilon = 1.3$
ξ	ดัชนีแสดงตำแหน่ง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Δx	ขนาดของปริมาตรควบคุมในแนวแกน x
Δy	ขนาดของปริมาตรควบคุมในแนวแกน y
Δz	ขนาดของปริมาตรควบคุมในแนวแกน z
ΔW	ขนาดของกำลัง
ΔV	ขนาดของปริมาตรควบคุม
Φ_{aa,k_T}	ตัวแปรไร้มิติในการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, $\Phi_{aa,k_T} = 1.0$
$\Phi_{aa,\mu}$	ตัวแปรไร้มิติในการหาความหนืดพลวัตของอากาศ, $\Phi_{aa,\mu} = 1.0$
Φ_{av,k_T}	ตัวแปรไร้มิติในการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, $\Phi_{av,k_T} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_a}{M_v} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{k_{T,a}}{k_{T,v}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_v}{M_a} \right)^{1/4} \right]^2$
$\Phi_{av,\mu}$	ตัวแปรไร้มิติในการหาความหนืดพลวัตของอากาศ, $\Phi_{av,\mu} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_a}{M_v} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_a}{\mu_v} \right)^{1/2} \left(\frac{M_v}{M_a} \right)^{1/4} \right]^2$
Φ_{va,k_T}	ตัวแปรไร้มิติในการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, $\Phi_{va,k_T} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_v}{M_a} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{k_{T,v}}{k_{T,a}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_a}{M_v} \right)^{1/4} \right]^2$
$\Phi_{va,\mu}$	ตัวแปรไร้มิติในการหาความหนืดพลวัตของอากาศ, $\Phi_{va,\mu} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_v}{M_a} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_v}{\mu_a} \right)^{1/2} \left(\frac{M_a}{M_v} \right)^{1/4} \right]^2$
Φ_{vv,k_T}	ตัวแปรไร้มิติในการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ, $\Phi_{vv,k_T} = 1.0$
$\Phi_{vv,\mu}$	ตัวแปรไร้มิติในการหาความหนืดพลวัตของอากาศ, $\Phi_{vv,\mu} = 1.0$

ตัวยก

- * ค่าที่ได้จากสมการ โมเมนตัมซึ่งยังไม่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง
- ' ค่าแก้ไข

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวห้อย

b	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ B
B	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านล่างของจุดต่อ P
e	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ E
E	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านทิศตะวันออกของจุดต่อ P
n	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ N
N	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านทิศเหนือของจุดต่อ N
P	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุม
s	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ S
S	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านทิศใต้ของจุดต่อ P
t	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ T
T	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านบนของจุดต่อ P
w	ค่าที่พื้นผิวควบคุม ซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อ P และจุดต่อ W
W	ค่าที่จุดศูนย์กลางกลางของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของจุดต่อ P
MS	แหล่งกำเนิด โมเมนตัม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พฤติกรรมของปัญหาในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่มักถูกกำกับด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของพฤติกรรมนั้น ในปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลซึ่งพฤติกรรมของของไหลจะถูกกำกับด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น จึงก่อให้เกิดความยุ่งยากในการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ซึ่งบางปัญหาของการไหลอาจสามารถหาได้แต่ก็มักเป็นปัญหาที่ไม่ซับซ้อน ตัวอย่างเช่น ปัญหาการไหลแบบราบเรียบและไม่อัดตัวผ่านแผ่นเรียบซึ่งสามารถหาการกระจายตัวของความเร็วได้ตามสมการของ Blasius (1908) ส่วนปัญหาการไหลที่มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้นั้น อาจหลีกเลี่ยงไปหาผลเฉลยโดยทำการทดลอง แต่ก็พบอุปสรรคหลายอย่างที่เกิดขึ้นจากการทำการทดลองไม่ว่าจะเป็นปัญหาเรื่องเทคโนโลยีของเครื่องมือวัด การใช้เงินลงทุนที่สูง รวมไปถึงความยุ่งยากในการติดตั้งและกำหนดค่าของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัด ดังนั้นเพื่อขจัดปัญหาหรือขจัดจำกัดในการทำการทดลอง การหาผลเฉลยของปัญหาการไหลที่ซับซ้อนต่างๆ นั้นจึงมักออกมาในรูปของการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่มีหลากหลายระเบียบวิธีด้วยกัน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขของปัญหาการไหลซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ให้ความรู้ลึกทางกายภาพของปัญหาการไหลได้ดีกว่าระเบียบวิธีอื่นๆ และเป็นระเบียบวิธีที่มีวิวัฒนาการมาเป็นเวลานานหลังจากศาสตร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) ได้พัฒนาขึ้น แม้ว่าผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอาจจะไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของปัญหาการไหลที่ซับซ้อนได้อย่างถูกต้องเหมือนกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ แต่จากงานวิจัยในอดีตก็แสดงให้เห็นว่าผลเฉลยเชิงตัวเลขที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถเพียงพอที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบงานทางด้านวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปปัญหาการไหลที่เกิดขึ้นมักจะมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ดังนั้นในการจำลองหรือทำนายพฤติกรรมของการไหลที่มีความซับซ้อนผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อให้เกิดผลเฉลยเชิงตัวเลขที่สามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลได้อย่างสมบูรณ์นั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดให้รูปแบบของปัญหาการไหลที่พิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน พฤติกรรมของความปั่นป่วนถูกจำลองด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากมาย แบบจำลองความปั่นป่วนมี

บทบาทสำคัญต่อความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมของการไหล ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของความปั่นป่วนที่มีต่อพฤติกรรมของการไหลผ่านแบบจำลองความปั่นป่วนที่ได้เลือกใช้ โดยเลือกการจำลองพฤติกรรมของการไหลภายในห้องสะอาดเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องสะอาดได้มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท เช่น อุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น ห้องสะอาดเป็นห้องที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง ซึ่งสภาวะแวดล้อมที่สำคัญได้แก่ การไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง ดังนั้นหากมีการศึกษาเพื่อจำลองพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ได้ จะทำให้สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ในแต่ละอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และลดปริมาณการสูญเสียผลิตภัณฑ์ ห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษาเป็นห้องสะอาด SQE. C/R (Supplier Quality Engineering Clean Room) ของบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมา

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองของอากาศที่เกิดขึ้นภายในห้องสะอาด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาด้วยภาษา Visual C++ โดยอากาศที่ไหลภายในห้องสะอาดถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคงตัวและเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำลองพฤติกรรมของการไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองของอากาศภายในห้องสะอาดได้

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

พิจารณาการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดเป็นการไหลแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคงตัวและการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ เลือกระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดในการวิเคราะห์ปัญหา ขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) และการประมาณค่าในช่วงของ Rhie and Chow (Rhie and Chow Interpolation, 1983) ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วและสนามความดัน เลือกใช้วิธีต้นลมอันดับหนึ่ง (Upwind Differencing Scheme) ในการประมาณอิทธิพลของเทอมการพา (Convection Term) และใช้วิธีผลต่างกลาง (Central Differencing Scheme) ในการประมาณอิทธิพลของเทอมการแพร่

(Diffusion Term) และเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสีย (Source or Sink Term) แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำ $k-\epsilon$ ของ Launder and Sharma (1974) ถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วน พิจารณาอากาศภายในห้องสะอาดเป็นก๊าซผสมทางอุดมคติที่ประกอบด้วย อากาศแห้งและไอน้ำ คุณสมบัติของอากาศเป็นไปตามกฎของก๊าซผสมทางอุดมคติ (Ideal Gas Mixing Law) ในการแก้ปัญหาได้ทำการแบ่งปัญหาเพื่อแยกพิจารณาดังนี้

1. การแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการไหล (ความเร็ว)
2. การแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอุณหภูมิ
3. การแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของความชื้น
4. การแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของฝุ่นละออง

เนื่องจากในงานวิจัยเป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเองและปัญหาที่ใช้ในการวิจัยก็เป็นปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณที่ได้ ในระหว่างการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นและแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการจำลองปัญหาการไหลพื้นฐานที่เป็นกรณีศึกษาที่นิยมใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งปัญหาการไหลพื้นฐานที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลองความปั่นป่วนมีดังนี้

1. ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ
2. ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ
3. ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ
4. ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ
5. ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ
6. ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ
7. ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ
8. ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ
9. ปัญหาการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

หลังจากทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นและความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้ จึงนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นและฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดได้อย่างถูกต้องในระดับที่สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบห้องสะอาดให้เอื้อประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเทคโนโลยีห้องสะอาดเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นถึงความจำเป็นในการศึกษาพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อ 2.1 ส่วนหัวข้อ 2.2 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับห้องสะอาดโดยการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับห้องสะอาด

2.1.1 เทคโนโลยีห้องสะอาดคืออะไร

ห้องสะอาด (Clean Room) หมายถึง ห้องบริเวณปิดที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้องได้แก่ อนุภาคสิ่งเจือปน อุณหภูมิ ความดันอากาศ ความชื้น รูปแบบการไหลของอากาศ การสิ้นสะท้อน แสงสว่างและสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์ ในอดีตการควบคุมคุณภาพของห้องสะอาดนั้นมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งด้วยความรู้ทางวิชาการยังน้อยและเครื่องมือในการผลิตอุปกรณ์ยังไม่สนับสนุน แต่ในปัจจุบันทั้งความรู้และประสิทธิภาพของเครื่องมือในการผลิตอุปกรณ์มีมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีห้องสะอาดถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วและนำมาใช้กับอุตสาหกรรมหลายประเภท ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ระบบห้องสะอาดเป็นปัจจัยสนับสนุนพื้นฐานที่ทำให้เกิดการพัฒนาคอนสตรัคทีฟที่ละเอียดได้มากขึ้นและช่วยให้การต่ออุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทำได้มีประสิทธิภาพ ในอุตสาหกรรมการผลิตระบบห้องสะอาดทำให้สามารถบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อโรคได้ และสามารถเตรียมสารที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมีได้อย่างปลอดภัย ระบบห้องสะอาดนำไปสู่การเพิ่มคุณภาพทางการผลิตฟิล์มถ้ำรูปและพลาสติกพอลีทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพมากขึ้น ระบบห้องสะอาดสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ทางกลและเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างดี การใช้เทคโนโลยีห้องสะอาดไม่ได้จำกัดอยู่ในวงการอุตสาหกรรมเท่านั้น แต่ยังมีใช้ในการปฏิบัติงานสำคัญในด้านอื่นๆ อีก เช่น ใช้เป็นระบบปรับอากาศให้กับห้องผู้ป่วยฉุกเฉิน ห้องผ่าตัด และห้องผู้ป่วยที่มีระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอภายในโรงพยาบาล

เทคโนโลยีห้องสะอาดถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อรักษาความสะอาดของอากาศที่ต้องการใช้ในพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยการทำให้อากาศมีปริมาณสิ่งเจือปนน้อยที่สุดและควบคุมรูปแบบการไหลของอากาศที่เหมาะสม ป้องกันอันตรายจากฝุ่นละอองและเชื้อโรคที่ปะปนอยู่ในอากาศอันจะ

ก่อให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิตและผู้ป่วย ป้องกันการปลดปล่อยอนุภาคสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกสู่สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันเทคโนโลยีห้องสะอาดไม่ได้เป็นความรู้เฉพาะทางอีกต่อไป ได้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม

2.1.2 มาตรฐานการควบคุมระดับความสะอาด (Cleanliness Classes) ของห้องสะอาด

สำหรับหน่วยสากลในการวัดขนาดอนุภาคของสิ่งเจือปนเพื่อป้องกันระดับความสะอาดของห้องสะอาดคือ ไมครอน (Micron or Micrometer, μm) ขนาด $1 \mu\text{m}$ มีค่าเท่ากับ 10^{-6} m มาตรฐานในการแบ่งระดับความสะอาดของห้องสะอาดโดยการพิจารณาถึงจำนวนของอนุภาคของสิ่งเจือปนภายในห้องสะอาดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 2 มาตรฐานคือ มาตรฐาน Federal Standard 209E Airborne Particulate Cleanliness Classes (1992) และมาตรฐาน ISO/TC 209 14644-1 Airborne Particulate Cleanliness Classes (1999) ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน Federal Standard 209E Airborne Particulate Cleanliness Classes

Class Limits											
Class name		0.1 μm		0.2 μm		0.3 μm		0.5 μm		5 μm	
		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units		Volume units	
SI	English	m^3	ft^3	m^3	ft^3	m^3	ft^3	m^3	ft^3	m^3	ft^3
M1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	-	-
M1.5	1	1,240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	-	-
M2		3,500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	-	-
M2.5	10	12,400	350	2,650	75.0	1,060	30.0	353	10.0	-	-
M3		35,000	991	7,570	214	3,090	87.5	1,000	28.3	-	-
M3.5	100	-	-	26,500	750	10,600	300	3,530	100	-	-
M4		-	-	75,000	2,140	30,900	875	10,000	283	-	-
M4.5	1,000	-	-	-	-	-	-	35,300	1,000	247	7.00
M5		-	-	-	-	-	-	100,000	2,830	618	17.5
M5.5	10,000	-	-	-	-	-	-	353,000	10,000	2,470	70.0
M6		-	-	-	-	-	-	1,000,000	28,300	6,180	175
M6.5	100,000	-	-	-	-	-	-	3,530,000	100,000	24,700	700
M7		-	-	-	-	-	-	10,000,000	283,000	61,800	1,750

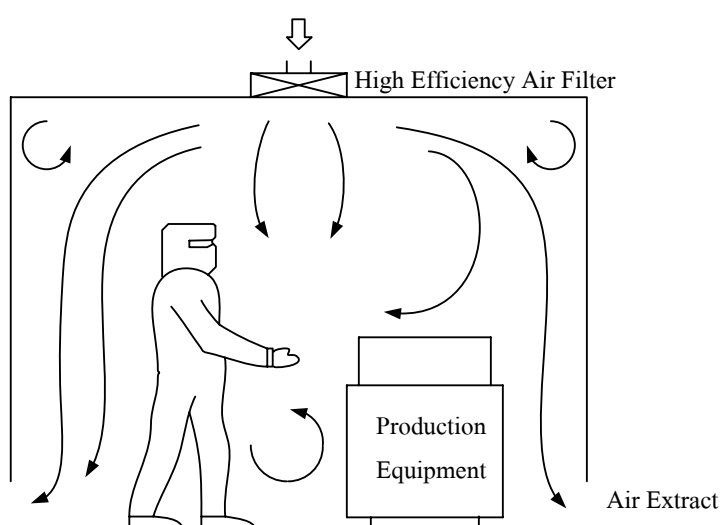
ตารางที่ 2.2 มาตรฐาน ISO/TC 209 14644-1 Airborne Particulate Cleanliness Classes

	Concentration Limits (Particles/m ³)					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
ISO Class 1	10	2				
ISO Class 2	100	24	10	4		
ISO Class 3	1,000	237	102	35	8	
ISO Class 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO Class 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	29
ISO Class 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO Class 7				352,000	83,200	2,930
ISO Class 8				3,520,000	832,000	29,300
ISO Class 9				35,200,000	8,320,000	293,000

2.1.3 ประเภทของห้องสะอาด

2.1.3.1 Conventional Flow Clean Room

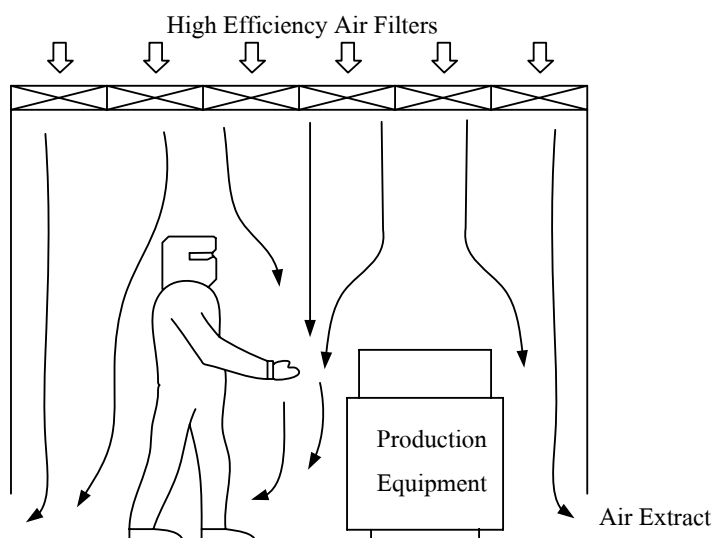
ลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดหลังจากที่ออกจากหัวจ่ายลมที่มีการติดตั้งอุปกรณ์กรองอากาศประสิทธิภาพสูง (High Efficiency Air Filter) จะมีการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและทำให้เกิดการฟุ้งของอนุภาคฝุ่นละอองได้ในหลายบริเวณ ทำให้ห้องสะอาดประเภทนี้เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความสะอาดมาก ลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ห้องสะอาดประเภท Conventional Flow Clean Room

2.1.3.2 Unidirectional Flow Clean Room

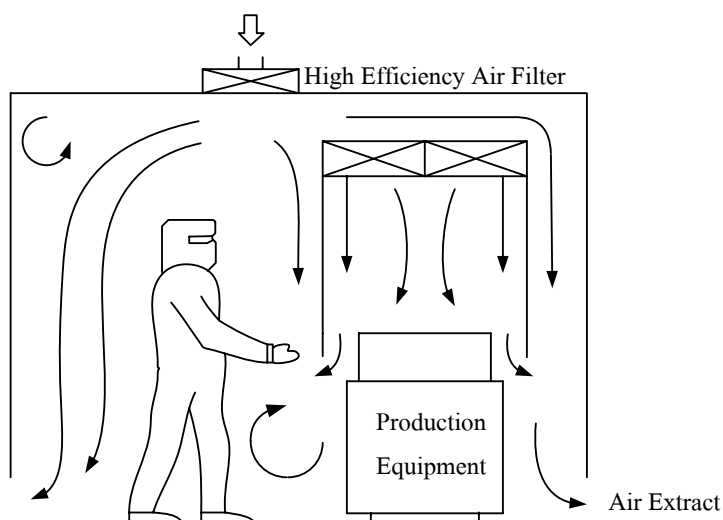
ลักษณะการไหลของอากาศจะถูกบังคับให้มีทิศทางการไหลจากเพดานสู่พื้นทิศทางเดียว ทำให้สามารถควบคุมอนุภาคฝุ่นละอองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่เกิดการฟุ้งของอนุภาคฝุ่นละออง ดังนั้นห้องสะอาดประเภทนี้จึงเหมาะกับการทำงานที่ต้องการความสะอาดมากๆ แต่ข้อเสียของห้องสะอาดประเภทนี้คือมีราคาค่อนข้างสูง ลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ห้องสะอาดประเภท Unidirectional Flow Clean Room

2.1.3.3 Mixed Flow Clean Room

ห้องสะอาดประเภทนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสร้างการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow Hood) ซึ่งภายในมีการติดตั้งแผ่นกรองอากาศเพื่อใช้ในการกรองฝุ่นละอองและพัดลมเพื่อทำหน้าที่ในการบังคับการไหลให้มีทิศทางที่แน่นอน โดย Laminar Flow Hood จะถูกติดตั้งไว้เหนือบริเวณที่มีการปฏิบัติงาน ดังนั้นลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องจะมีทั้งบริเวณที่เป็นการไหลแบบราบเรียบและบริเวณที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน การติดตั้งอุปกรณ์การสร้างการไหลแบบราบเรียบเฉพาะบางบริเวณทำให้สามารถลดต้นทุนการสร้างห้องสะอาดได้อย่างมาก ห้องสะอาดประเภทนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ห้องสะอาดประเภท Mixed Flow Clean Room

2.1.4 สภาพแวดล้อมภายในห้องสะอาด

2.1.4.1 อุณหภูมิ

ปกติจะควบคุมอุณหภูมิภายในห้องสะอาดให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตที่อยู่ภายในห้องสะอาดและจะต้องคำนึงถึงพนักงานที่ปฏิบัติงานภายในห้องสะอาดด้วย เพราะพนักงานเหล่านี้มักสวมเสื้อผ้าถึง 2 ชั้น คือชุดที่ใส่มาที่บ้านและชุดห้องสะอาดที่สวมทับไว้อีกชั้นหนึ่ง ในกรณีของห้องสะอาดที่ต้องการความสะอาดสูง พนักงานอาจสวมชุดห้องสะอาดเพียงชุดเดียวก็ได้ แต่ชุดห้องสะอาดเหล่านี้มักจะเป็นชนิดปิดมิดชิดและเนื้อผ้าที่บมีระบายอากาศน้อย ดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องปรับอากาศตามปกติ โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิภายในห้องสะอาดไว้ที่ $22 \pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.1.4.2 ความดัน

โดยทั่วไปจะควบคุมความดันภายในห้องสะอาดให้สูงกว่าความดันโดยรอบห้องสะอาดประมาณ 15 Pa ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศโดยรอบซึ่งสะอาดน้อยกว่ารั่วผ่านช่องเปิดตามผนังของห้องสะอาด ยกเว้นห้องสะอาดสำหรับวัตถุอันตรายทางชีวภาพจะควบคุมความดันภายในให้ต่ำกว่าความดันภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้เชื้อโรคหรือวัตถุที่ทำอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพของมนุษย์รั่วออกไปยังสิ่งแวดล้อม

2.1.4.3 ความชื้นสัมพัทธ์

ข้อคำนึงถึงเกี่ยวกับการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะอาดมีอยู่ 2 ประการคือ การเกิดสนิมของอุปกรณ์ประเภทโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 50 % และ

อีกประการหนึ่งคือ การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์ในสถานะที่มีความชื้นต่ำซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการดูดกันของอนุภาค ทั้ง 2 กรณีเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อผลิตภัณฑ์และเครื่องจักรที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปจะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะอาดไว้ที่ $50 \pm 2.5\%$

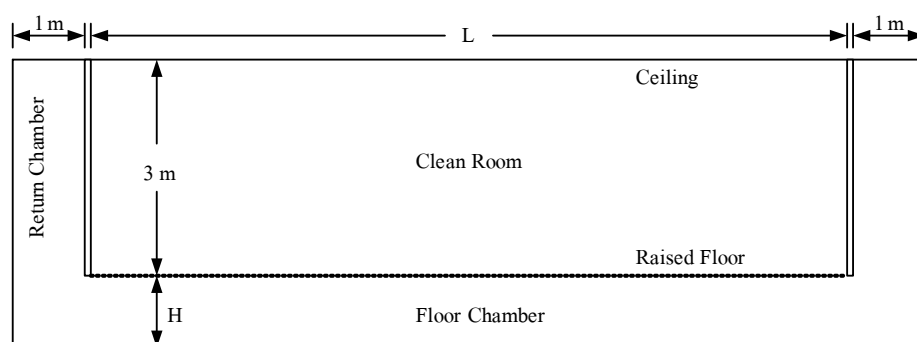
2.1.4.4 เสียงรบกวน

ห้องสะอาดในอุตสาหกรรมบางอุตสาหกรรมมีเสียงรบกวนน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ห้องสะอาดในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์บางห้องอาจมีเสียงรบกวนที่เกิดจากเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พัดลมของ Laminar Flow Hood พัดลมในการปรับอากาศและการระบายอากาศเสีย เสียงรบกวนเหล่านี้อาจเป็นอันตรายต่อหูและสุขภาพจิตของพนักงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เช่น กฎหมายกระทรวงอุตสาหกรรมของไทยหรือมาตรฐาน OSHA (Occupational Safety and Health Act) ของอเมริกา เป็นต้น กระทรวงอุตสาหกรรมของไทยห้ามไม่ให้เสียงภายในสถานที่ประกอบการสูงเกิน 85 dB

2.2 งานวิจัยด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เกี่ยวข้องกับห้องสะอาด

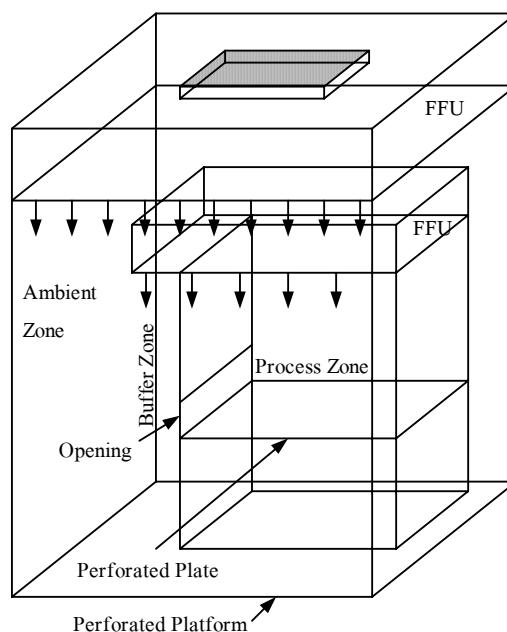
หลังจากมีการใช้ประโยชน์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้ในการออกแบบด้านอากาศยาน ปัจจุบันพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้กลายเป็นความรู้ที่ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยด้านต่างๆ รวมถึงช่วยในการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีห้องสะอาด จากการสืบค้นเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีห้องสะอาดโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

Cheng, Liu, Lam, Cai, and Lee (1999) ได้ศึกษาผลกระทบของความพรุนของพื้นห้องสะอาดซึ่งใช้ในการดูดซับการไหลที่ปล่อยออกมาจากหัวจ่ายลม ความสูงของพื้น และขนาดความกว้างของห้องที่มีต่อความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วของอากาศภายในห้องสะอาดแบบ Unidirectional Flow Clean Room โดยใช้ซอฟต์แวร์ STAR-CD ที่สร้างบนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด การไหลภายในห้องสะอาดถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน และเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ในการจำลองพฤติกรรมของความปั่นป่วน จากผลการศึกษาพบว่าความพรุนของพื้น ความสูงของพื้น และความกว้างของห้องสะอาดมีผลอย่างมากต่อความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็ว โดยความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วจะน้อยลงเมื่อความกว้างของห้องเพิ่มขึ้น และความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของพื้นห้องมีมากขึ้น



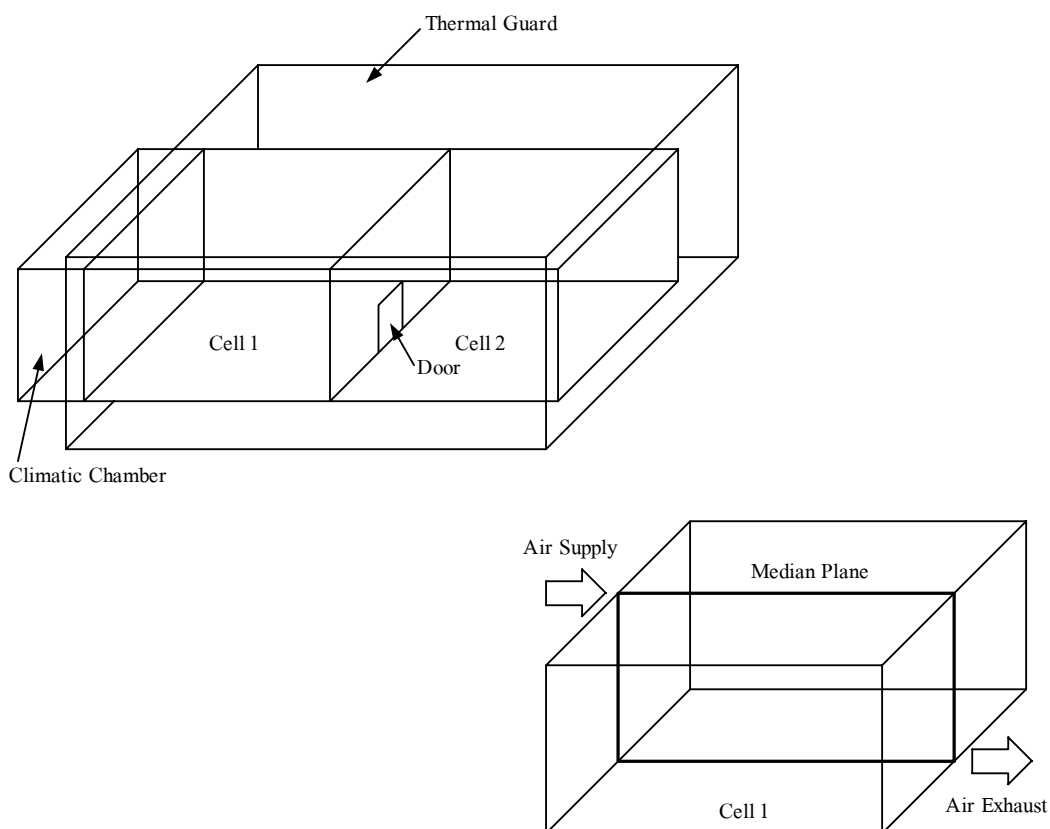
รูปที่ 2.4 ห้องสะอาดที่ Cheng et al. (1999) ใช้ในการศึกษา

Hu, Chuah, and Yen (2002) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของการติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Mini-environment เพื่อช่วยเพิ่มระดับของความสะอาดภายในห้องสะอาดของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากปัจจุบันการลดลงอย่างรวดเร็วของขนาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ต้องมีการระมัดระวังมากขึ้นในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ปะปนอยู่ในอากาศ การจำลองการไหลของอากาศและฝุ่นละอองในการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ในการจำลองผลกระทบของความปั่นป่วน ใช้วิธีต้นลมอันดับสอง (Second Order Upwind) เพื่อประมาณค่าอิทธิพลของเทอมการพาและแก้ปัญหตามขั้นตอนวิธี SIMPLE ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลอง นอกจากนี้ Hu et al. ยังได้ศึกษาผลของการออกแบบ Buffer Zone เพื่อช่วยในการป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปในส่วน of พื้นที่ปฏิบัติงาน ซึ่งผลจากการออกแบบ Buffer Zone พบว่าสามารถควบคุมฝุ่นละอองได้น้อยกว่า 1 Particle/m^3 ในส่วนของพื้นที่ปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.5 ห้องสะอาดที่ Hu et al. (2002) ใช้ในการศึกษา

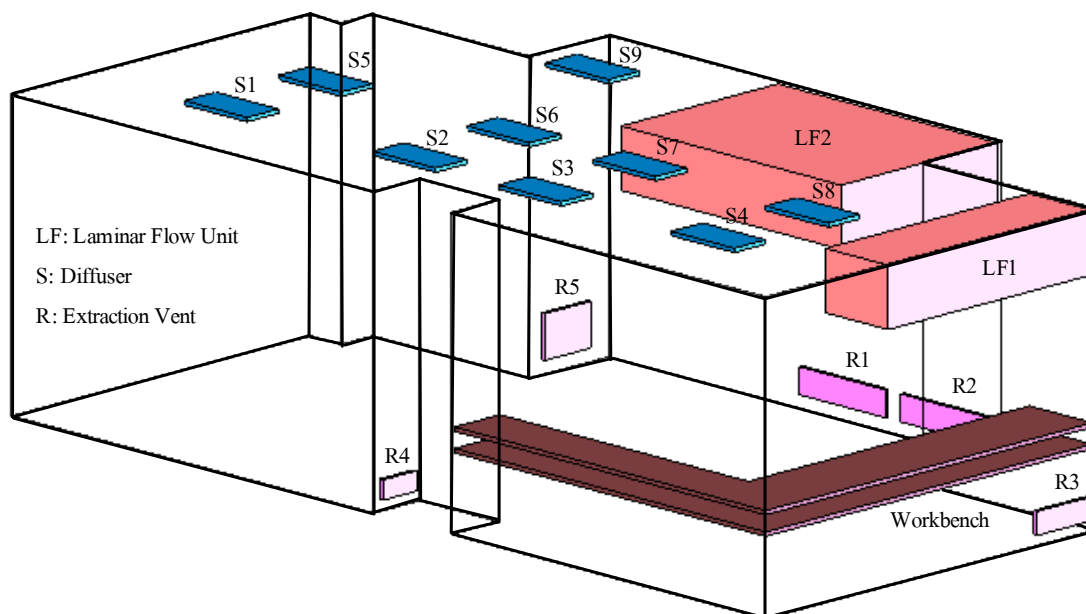
Teodosiu, Hohota, Rusaouen, and Woloszyn (2003) ได้ใช้ซอฟต์แวร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT ในการศึกษาความรู้สึกรบายของมนุษย์ที่อยู่ภายในห้องที่มีการปรับอากาศโดยคำนึงถึงอิทธิพลของปริมาณความชื้นในอากาศ การจำลองพฤติกรรมของความชื้นในอากาศซึ่งถูกสมมติให้เป็นก๊าซอุดมคตินั้นจะพิจารณาว่าอากาศเป็นของไหลผสมที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ และไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพันธุมวลทั้งสอง คุณสมบัติของอากาศสามารถหาได้จากกฎของก๊าซผสมทางอุดมคติ ความปั่นป่วนของการไหลถูกจำลองโดยแบบจำลองความปั่นป่วน Realisable $k-\epsilon$ เทอมการพาในสมการควบคุมถูกประมาณด้วยวิธีต้นลมอันดับสอง และแก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากความไม่เกี่ยวข้องกันของสนามความเร็วกับสนามความดันตามขั้นตอนวิธี SIMPLE อีกทั้งใช้ระเบียบวิธีกริดหลายระดับ (Multigrid) เพื่อช่วยเร่งการลู่เข้าของผลการคำนวณจากผลการศึกษาโดยใช้ดัชนี PMV (Predicted Mean Vote) ในการเปรียบเทียบพบว่าโดยภาพรวมผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากซอฟต์แวร์ FLUENT มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าอากาศร้อนจะมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศเย็น



รูปที่ 2.6 ห้องปรับอากาศที่ Teodosiu et al. (2003) ใช้ในการศึกษา

Rouaud and Havet (2002) ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ESTET ที่พัฒนาอยู่บนพื้นฐานของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด เพื่อตรวจสอบรูปแบบการไหลภายในห้องสะอาดของกระบวนการผลิตอาหารที่ประกอบด้วยบริเวณที่ติดตั้ง Lamilar Flow Hood จำนวน 2 บริเวณ ตำแหน่งของหัวจ่ายลม 9 ตำแหน่ง และช่องทางออกของอากาศ 9 ช่อง โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินความถูกต้องแบบของจำลองความปั่นป่วน 2 แบบคือ Standard $k-\epsilon$ และ Renormalisation Group (RNG) $k-\epsilon$ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของอากาศที่ระดับความสูง 0.2 m, 0.8 m และ 1.5 m รูปแบบการไหลของอากาศที่ได้จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ มีความเหมาะสมในการจำลองการไหลภายในห้องสะอาดมากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ เนื่องจากค่าความหนืดของความปั่นป่วนที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ มีค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนมีค่าสูงตามไปด้วยทำให้การจำลองการไหลบริเวณที่เกิดการหมุนวนมี

ความผิดพลาดได้มากกว่าแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ ที่ให้ค่าความหนืดของความปั่นป่วนที่ดูสมจริงกว่า



รูปที่ 2.7 ห้องสะอาดที่ Rouaud and Havet (2002) ใช้ในการศึกษา

หลังจากผลการศึกษาในปี 2002 ที่พบว่าผลการจำลองรูปแบบการไหลโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง และแบบจำลองความปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ สามารถใช้จำลองพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสะอาดได้เป็นอย่างดี Rouaud and Havet (2005) ได้พัฒนาความรู้เพื่อหาวิธีในการออกแบบห้องสะอาดด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดในสภาวะไม่คงตัว โดยนำเสนอดัชนีที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพของการระบายอากาศภายในห้องสะอาด 3 ดัชนีด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย ϵ_c (Contamination Removal Effectiveness), τ_p (Local Mean Age of Air) และ τ_m (Room Mean Age of Air) อีกทั้งยังได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่า ACH (Air Change Rate per Hour) ที่เหมาะสมต่อการรักษาระดับความสะอาดของห้องสะอาด ซึ่งการเพิ่มค่า ACH โดยปราศจากการหาค่าที่เหมาะสมจะนำไปสู่การสิ้นเปลืองต้นทุน จากผลการศึกษานี้พบว่าบริเวณที่เกิดการไหลหมุนวนและบริเวณที่อากาศหยุดนิ่งจะทำให้ τ_m มีค่าสูงซึ่งจะเป็นผลเสียทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองภายในบริเวณดังกล่าว การประเมินประสิทธิภาพของการระบายอากาศโดยพิจารณาจาก ϵ_c

พบว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองมีผลต่อประสิทธิภาพของการระบายอากาศในการกำจัด
ฝุ่นละออง

บทที่ 3

กรรมวิธีที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของของไหล

พฤติกรรมของของไหลที่ศึกษาถูกจำลองผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรากฏอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย การหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสมการเหล่านี้มีความยุ่งยากเป็นอย่างมาก ดังนั้นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อช่วยในการศึกษาพฤติกรรมของของไหลจึงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในบทนี้จะนำเสนอกรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองพฤติกรรมของของไหล รายละเอียดประกอบด้วย หัวข้อ 3.1 กล่าวถึงสมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของของไหล อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง หัวข้อ 3.2 กล่าวถึงระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด หัวข้อ 3.3 กล่าวถึงการแก้ปัญหาในการจำลองพฤติกรรมของของไหลตามขั้นตอนวิธี SIMPLE หัวข้อ 3.4 กล่าวถึงประเภทของเงื่อนไขขอบเขต หัวข้อ 3.5 และหัวข้อ 3.6 กล่าวถึงเทคนิคที่นำมาช่วยในการจำลองอุปกรณ์ภายในห้องสะอาด และสุดท้ายหัวข้อ 3.7 กล่าวถึงวิธีการสร้างกริด

3.1 สมการควบคุม

ปัญหาการไหลในงานวิจัยนี้ถูกพิจารณาให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคงตัวในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ โดยรูปแบบของสมการควบคุมเขียนอยู่ในรูปเทนเซอร์และมีการจัดรูปแบบของสมการให้สอดคล้องกับรูปแบบทั่วไปของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 สมการของการไหล

พฤติกรรมการไหลของของไหลโดยทั่วไปในธรรมชาติมีพฤติกรรมเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่คุณสมบัติของการไหลมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มอยู่ตลอดเวลา Reynolds (1985) ได้แบ่งคุณสมบัติของการไหลเป็นสองส่วนคือส่วนเฉลี่ย (Mean Part) และส่วนแปรผัน (Fluctuating Part) เพื่อตัดผลกระทบของส่วนแปรผันจึงทำการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนในรูปของค่าเฉลี่ยกับเวลา แต่ผลจากการวิเคราะห์การไหลในรูปค่าเฉลี่ยกับเวลานั้นทำให้เกิดเทอมที่เรียกว่า Reynolds Stress ขึ้นในสมการโมเมนตัมซึ่งเป็นเทอมที่แบ่งแยกการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน การปรากฏของเทอม Reynolds Stress เป็นเหตุให้จำนวนตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบมีมากกว่าจำนวนสมการควบคุม ทำให้ต้องมีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนเข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วน งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนประเภทสอง

สมการของ Launder and Sharma (1974) ในการจำลองพฤติกรรมของความปั่นป่วน เนื่องจากเป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไปทำให้มีความสะดวกในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบจำลองความปั่นป่วนดังกล่าวประกอบด้วย สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และสมการการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาอิทธิพลของแรงลอยตัวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิเพื่อทำให้การวิเคราะห์มีความสมบูรณ์มากขึ้น สมการควบคุมสำหรับการแก้ปัญหาการไหลประกอบด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและสมการการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน ซึ่งสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ตามลำดับได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(t_{ji} - \overline{\rho u'_j u'_i}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_j \beta (T - T_r) \delta_{ij} + S_i \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - \rho D + S_k \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_k) \frac{\varepsilon}{k} \\ &\quad - \rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho E + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.4)$$

เทอม $-\overline{\rho u'_j u'_i}$ ในสมการ (3.2) เรียกว่า Reynolds Stress Tensor ซึ่งสามารถนิยามตาม Boussinesq's Assumption (1877) ได้ดังนี้

$$-\overline{\rho u'_j u'_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3.5)$$

3.1.2 สมการพลังงาน

สมการพลังงานในรูปของเอนทาลปีที่จัดรูปแบบสมการให้สอดคล้องกับรูปแบบทั่วไปของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด สามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (3.6)$$

3.1.3 สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

การวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการจำลองพฤติกรรมของความชื้นนั้นได้กำหนดให้อากาศเป็นของไหลผสมที่ประกอบด้วย 2 พันธมูลคือ อากาศแห้งและไอน้ำ อากาศถูกสมมติให้เป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) ดังนั้นคุณสมบัติของอากาศสามารถหาได้จากกฎก๊าซผสมทางอุดมคติ ตามที่ปรากฏใน Bird, Stewart, and Lightfoot (2002) และ Cengel and Boles (1998) ดังนี้

$$\rho = \frac{P}{RT \left(\frac{1}{M_v} \frac{m_v}{m_v + m_a} + \frac{1}{M_a} \frac{m_a}{m_v + m_a} \right)} \quad (3.7)$$

$$C_p = \left(\frac{m_v}{m_v + m_a} \right) C_{p,v} + \left(\frac{m_a}{m_v + m_a} \right) C_{p,a} \quad (3.8)$$

$$\mu = \left(\frac{x_v \mu_v}{x_v \Phi_{vv,\mu} + x_a \Phi_{va,\mu}} \right) + \left(\frac{x_a \mu_a}{x_v \Phi_{av,\mu} + x_a \Phi_{aa,\mu}} \right) \quad (3.9)$$

$$k_T = \left(\frac{x_v k_{T,v}}{x_v \Phi_{vv,k_T} + x_a \Phi_{va,k_T}} \right) + \left(\frac{x_a k_{T,a}}{x_v \Phi_{av,k_T} + x_a \Phi_{aa,k_T}} \right) \quad (3.10)$$

การแก้สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษาการกระจายตัวของความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะอาด ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมที่ต้องควบคุมภายในห้องสะอาด เนื่องจากปริมาณความชื้นมีส่วนสำคัญในการเกิดสนิมและการเกิดไฟฟ้าสถิตบนอุปกรณ์ (สุรพล พุกษพานิช, 2546) สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำสามารถเขียนในรูปเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_{j,m}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,m}} \right) \frac{\partial m}{\partial x_j} \right] \quad (3.11)$$

3.1.4 สมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย

จากการวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละออง (Particle Volume Fraction) ภายในห้องสะอาด ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข พบว่าการไหลของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดเป็นการไหลที่มีอนุภาคเจือจาง (Dilute Flow) ทำให้อนุภาคของฝุ่นละอองไม่มีผลกระทบต่อการไหล (Varaksin, Polezhaev, Yu, and Polykov, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) ด้วยเหตุผลของการไหลที่มีอนุภาคเจือจาง คุณสมบัติของอากาศจะไม่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคของฝุ่นละออง การศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองที่ถูกกระทำโดยการไหลของอากาศ และด้วยระดับความเข้มข้นของฝุ่นละออง

ภายในห้องสะอาดที่มีน้อยมาก จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแบบจำลองความปั่นป่วนที่มีอยู่ให้สามารถจำลองผลกระทบของฝุ่นละอองที่มีต่อการไหล (Garcia and Crespo, 2000) พฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดถูกศึกษาผ่านสมการ (3.12) โดยปริมาณ c แทนจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองในปริมาตร 1 m^3 ค่าประสิทธิภาพแพร่กระจายของโมเลกุลของฝุ่นละออง (Molecular Diffusion Coefficient, $D_{i,c}$) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic Viscosity, ν) ตามข้อมูลงานวิจัยของ Hu et al. (2002) และค่าสมิตน์ัมเบอร์ของความปั่นป่วนของฝุ่นละออง (Turbulent Schmidt Number, $Sc_{t,c}$) ถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับ 1 ตามข้อมูลงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005)

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_{i,c} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,c}} \right) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] + S_c \quad (3.12)$$

3.2 ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด

เนื่องจากความไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์จากสมการควบคุมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1 ทำให้การหาผลเฉลยของสมการควบคุมเหล่านี้ ต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขแทนการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาการไหลเนื่องจากสร้างขึ้นบนพื้นฐานของการสมดุลฟลักซ์ต่างๆ ที่วิ่งผ่านเข้าออกพื้นผิวโดยรอบของก้อนมวลของไหล รายละเอียดของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดสามารถอธิบายได้ดังนี้

พิจารณาสมการควบคุมให้อยู่ในรูปทั่วไปของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดตามสมการ (3.13) ที่ประกอบด้วยเทอมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการพา เทอมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ และเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสีย รายละเอียดของสมการควบคุมทั้งหมดที่อยู่ในรูปทั่วไปของระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S^\phi \end{aligned} \quad (3.13)$$

ทำการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นโดเมนย่อยดังแสดงในรูปที่ 3.1 พิจารณาปริมาตรควบคุมย่อยของจุดต่อ P ที่ถูกล้อมรอบด้วยปริมาตรควบคุมย่อยของจุดต่อ W, E, S, N, B และ T โดย

มี w, e, s, n, b และ t เป็นด้านของปริมาตรควบคุมของจุดต่อ P หาปริพันธ์ตลอดปริมาตรควบคุมของจุดต่อ P ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ต้องการทราบค่า สัมประสิทธิ์ของเทอมการแพร่และเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียของการไหลแบบปั่นป่วนและไม่อัดตัว

สมการ	ϕ	Γ^ϕ	S^ϕ
ความต่อเนื่อง	1	0	0
x-momentum	u	$\mu + \mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right]$ $- \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g_x \beta (T - T_r) + S_x$
y-momentum	v	$\mu + \mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial y} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right]$ $- \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g_y \beta (T - T_r) + S_y$
z-momentum	w	$\mu + \mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial z} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right]$ $- \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z \beta (T - T_r) + S_z$
พลังงานจลน์ของ ความปั่นป่วน	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k + G_k - \rho \epsilon - \rho D + S_k$
อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของ ความปั่นป่วน	ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_{\epsilon 1} f_{\epsilon 1} (P_k + C_{\epsilon 3} G_k) \frac{\epsilon}{k}$ $-\rho C_{\epsilon 2} f_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \rho E + S_\epsilon$
พลังงาน	h	$\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial x_j} \right] + S_h$
เศษส่วนมวลของ ไอน้ำ	m	$\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,m}}$	0
ระดับความเข้มข้นของ ฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย	c	$\rho D_{i,c} + \frac{\mu_t}{Sc_{t,c}}$	S_c

$$\begin{aligned}
& (\rho u \Delta y \Delta z)_e \phi_e - (\rho u \Delta y \Delta z)_w \phi_w + (\rho v \Delta x \Delta z)_n \phi_n \\
& - (\rho v \Delta x \Delta z)_s \phi_s + (\rho w \Delta x \Delta y)_t \phi_t - (\rho w \Delta x \Delta y)_b \phi_b \\
& = \\
& (\Gamma^\phi \Delta y \Delta z)_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - (\Gamma^\phi \Delta y \Delta z)_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \\
& + (\Gamma^\phi \Delta x \Delta z)_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - (\Gamma^\phi \Delta x \Delta z)_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \\
& + (\Gamma^\phi \Delta x \Delta y)_t \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t - (\Gamma^\phi \Delta x \Delta y)_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b + S^\phi \Delta x \Delta y \Delta z
\end{aligned} \tag{3.16}$$

ใช้วิธีการประมาณค่าแบบผลต่างกลางกับเทอม $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e, \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w, \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n, \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s, \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t$ และ $\left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b$ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากเทอมการแพร่ในสมการควบคุม แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n = \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y} \\
\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s &= \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_t = \frac{\phi_T - \phi_P}{\Delta z}, \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_b = \frac{\phi_P - \phi_B}{\Delta z}
\end{aligned}$$

ใช้วิธีการประมาณแบบต้นลมอันดับหนึ่งกับเทอม $\phi_e, \phi_w, \phi_n, \phi_s, \phi_t$ และ ϕ_b ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากเทอมการพาในสมการควบคุม แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\phi_e &= \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho u \Delta y \Delta z)_e > 0, \quad \phi_e = \phi_E \text{ เมื่อ } (\rho u \Delta y \Delta z)_e < 0 \\
\phi_w &= \phi_W \text{ เมื่อ } (\rho u \Delta y \Delta z)_w > 0, \quad \phi_w = \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho u \Delta y \Delta z)_w < 0 \\
\phi_n &= \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho v \Delta x \Delta z)_n > 0, \quad \phi_n = \phi_N \text{ เมื่อ } (\rho v \Delta x \Delta z)_n < 0 \\
\phi_s &= \phi_S \text{ เมื่อ } (\rho v \Delta x \Delta z)_s > 0, \quad \phi_s = \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho v \Delta x \Delta z)_s < 0 \\
\phi_t &= \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho w \Delta x \Delta y)_t > 0, \quad \phi_t = \phi_T \text{ เมื่อ } (\rho w \Delta x \Delta y)_t < 0 \\
\phi_b &= \phi_B \text{ เมื่อ } (\rho w \Delta x \Delta y)_b > 0, \quad \phi_b = \phi_P \text{ เมื่อ } (\rho w \Delta x \Delta y)_b < 0
\end{aligned}$$

หลังจากนั้นแทนค่าต่างๆ ข้างต้นลงในสมการ (3.16) แล้วจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตดังนี้

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + A_T \phi_T + A_B \phi_B + b^\phi \tag{3.17}$$

โดยที่ $A_E, A_W, A_N, A_S, A_T, A_B$ และ A_P คือสัมประสิทธิ์ของ $\phi_E, \phi_W, \phi_N, \phi_S, \phi_T, \phi_B$ และ ϕ_P ตามลำดับ ส่วน b^ϕ คือเทอมการสร้างหรือเทอมการสูญเสีย ตัวห้อย E, W, N, S, T และ B แสดงถึง

ปริมาตรควบคุมของจุดต่อที่อยู่ล้อมรอบปริมาตรควบคุมของจุดต่อ P ที่พิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์และ
เทอมการสร้างหรือการสูญเสียข้างต้นมีค่าดังนี้

$$A_E = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \right)_e + \max \left[-(\rho u \Delta y \Delta z)_e, 0 \right]$$

$$A_W = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\Delta x} \right)_w + \max \left[(\rho u \Delta y \Delta z)_w, 0 \right]$$

$$A_N = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \right)_n + \max \left[-(\rho v \Delta x \Delta z)_n, 0 \right]$$

$$A_S = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta y} \right)_s + \max \left[(\rho v \Delta x \Delta z)_s, 0 \right]$$

$$A_T = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \right)_t + \max \left[-(\rho w \Delta x \Delta y)_t, 0 \right]$$

$$A_B = \left(\Gamma^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \right)_b + \max \left[(\rho w \Delta x \Delta y)_b, 0 \right]$$

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_T + A_B$$

$$b^\phi = S^\phi \Delta x \Delta y \Delta z$$

สำหรับระบบกริดแบบมีโครงสร้างและไม่สม่ำเสมอในการหาค่าคุณสมบัติของ Γ^ϕ ที่แต่ละด้านของ
ปริมาตรควบคุมสามารถกระทำได้โดยการใช้วิธีการประมาณแบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีอัตราส่วนของ
ระยะห่างระหว่างจุดต่อเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$(\Gamma^\phi)_e = \left(\frac{x_E - x_P}{x_e - x_P} \right) (\Gamma^\phi)_E + \left[1 - \left(\frac{x_E - x_P}{x_e - x_P} \right) \right] (\Gamma^\phi)_P$$

$$(\Gamma^\phi)_w = \left(\frac{x_P - x_W}{x_w - x_W} \right) (\Gamma^\phi)_P + \left[1 - \left(\frac{x_P - x_W}{x_w - x_W} \right) \right] (\Gamma^\phi)_W$$

$$(\Gamma^\phi)_n = \left(\frac{y_N - y_P}{y_n - y_P} \right) (\Gamma^\phi)_N + \left[1 - \left(\frac{y_N - y_P}{y_n - y_P} \right) \right] (\Gamma^\phi)_P$$

$$(\Gamma^\phi)_s = \left(\frac{y_P - y_S}{y_s - y_S} \right) (\Gamma^\phi)_P + \left[1 - \left(\frac{y_P - y_S}{y_s - y_S} \right) \right] (\Gamma^\phi)_S$$

$$(\Gamma^\phi)_t = \left(\frac{z_T - z_P}{z_t - z_P} \right) (\Gamma^\phi)_T + \left[1 - \left(\frac{z_T - z_P}{z_t - z_P} \right) \right] (\Gamma^\phi)_P$$

$$(\Gamma^\phi)_b = \left(\frac{z_P - z_B}{z_b - z_B} \right) (\Gamma^\phi)_P + \left[1 - \left(\frac{z_P - z_B}{z_b - z_B} \right) \right] (\Gamma^\phi)_B$$

เทอมการสร้างหรือการสูญเสีย b^ϕ ในสมการ (3.17) สามารถหาได้จากค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทราบค่า
จากการคำนวณในครั้งก่อน ส่วนการหาค่าตอบของ ϕ_P ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณซ้ำแบบ

Gauss-Seidel ซึ่งถือว่าการหาคำตอบแบบ โคเดเด่น (Explicit Method) วิธีการหนึ่ง โดยกำหนดค่าตัวแปร $\phi_E, \phi_W, \phi_N, \phi_S, \phi_T$ และ ϕ_B เป็นตัวแปรที่ทราบค่าจากการคำนวณในครั้งก่อน

3.3 ขั้นตอนวิธี SIMPLE

การหาผลเฉลยของปัญหาการไหลในย่านความเร็วที่เลขมัคไม่เกิน 0.8 ซึ่งความหนาแน่นกับความดันเกาะเกี่ยวกันแบบไม่ชัดเจนเนื่องจากความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก วิธีการที่ได้รับความนิยมคือการเปลี่ยนตัวแปรปฐมฐาน (Primitive Variable) จากความหนาแน่นไปเป็นความดัน ในงานวิจัยนี้ค่าของความดันหาได้จากขั้นตอนวิธี SIMPLE ได้รับการเสนอโดย Spalding and Patankar (1972) แต่ผลจากการใช้ความดันเป็นตัวแปรปฐมฐานอาจก่อให้เกิดปัญหาขึ้นเนื่องจากการไม่เกาะเกี่ยวกันระหว่างสนามความเร็วกับสนามความดัน ซึ่งอาจจะทำให้คำตอบที่ได้ผิดพลาดทางฟิสิกส์ แนวทางที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบกริดแบบจตุรร่วม (Collocated Grid System) ซึ่งคุณสมบัติของระบบกริดแบบจตุรร่วมคือค่าตัวแปรทุกตัวถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งจุดต่อเดียวกันทั้งหมด ร่วมกับการประมาณค่าในช่วงของ Rhie and Chow (1983)

ในขั้นตอนวิธี SIMPLE ค่าของความเร็วและค่าของความดันที่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนในรูปผลรวมของค่าที่ไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องกับค่าแก้ไข เพื่อให้สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \\ w &= w^* + w' \\ p &= p^* + p' \end{aligned} \tag{3.18}$$

ความเร็วและความดันที่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องซึ่งหาได้จากสมการโมเมนตัมสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} A_P^u u_P - \sum A_{nb}^u u &= \left[S^u - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_P \right] \Delta V \\ A_P^v v_P - \sum A_{nb}^v v &= \left[S^v - \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_P \right] \Delta V \\ A_P^w w_P - \sum A_{nb}^w w &= \left[S^w - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_P \right] \Delta V \end{aligned} \tag{3.19}$$

ส่วนความเร็วและความดันที่ไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} A_p^u u_p^* - \sum A_{nb}^u u^* &= \left[S^u - \left(\frac{\partial p^*}{\partial x} \right)_p \right] \Delta V \\ A_p^v v_p^* - \sum A_{nb}^v v^* &= \left[S^v - \left(\frac{\partial p^*}{\partial y} \right)_p \right] \Delta V \\ A_p^w w_p^* - \sum A_{nb}^w w^* &= \left[S^w - \left(\frac{\partial p^*}{\partial z} \right)_p \right] \Delta V \end{aligned} \quad (3.20)$$

ผลต่างของสมการ (3.19) และ (3.20) ก่อให้เกิดสมการของความเร็วแก้ไขและความดันแก้ไขเพื่อให้ค่าของความเร็วและค่าของความดันสอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\begin{aligned} A_p^u u_p' - \sum A_{nb}^u u' &= - \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right)_p \Delta V \\ A_p^v v_p' - \sum A_{nb}^v v' &= - \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right)_p \Delta V \\ A_p^w w_p' - \sum A_{nb}^w w' &= - \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right)_p \Delta V \end{aligned} \quad (3.21)$$

ตามแนวทางขั้นตอนวิธี SIMPLE ได้ประมาณให้เทอม $\sum A_{nb}^u u'$, $\sum A_{nb}^v v'$ และ $\sum A_{nb}^w w'$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าความเร็วแก้ไขสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าความดันแก้ไขได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u_p' &= - \frac{1}{A_p^u} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right)_p \Delta V \\ v_p' &= - \frac{1}{A_p^v} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right)_p \Delta V \\ w_p' &= - \frac{1}{A_p^w} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right)_p \Delta V \end{aligned} \quad (3.22)$$

พิจารณาสมการความต่อเนื่อง

$$\begin{aligned}
& (\rho u \Delta y \Delta z)_e - (\rho u \Delta y \Delta z)_w + (\rho v \Delta x \Delta z)_n \\
& - (\rho v \Delta x \Delta z)_s + (\rho w \Delta x \Delta y)_t - (\rho w \Delta x \Delta y)_w = 0
\end{aligned} \tag{3.23}$$

และสมการความต่อเนื่องในรูปค่าที่ไม่สอดคล้องกับค่าแก้ไข สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
& (\rho u' \Delta y \Delta z)_e - (\rho u' \Delta y \Delta z)_w + (\rho v' \Delta x \Delta z)_n \\
& - (\rho v' \Delta x \Delta z)_s + (\rho w' \Delta x \Delta y)_t - (\rho w' \Delta x \Delta y)_w \\
& = \\
& (\rho u^* \Delta y \Delta z)_e - (\rho u^* \Delta y \Delta z)_w + (\rho v^* \Delta x \Delta z)_n \\
& - (\rho v^* \Delta x \Delta z)_s + (\rho w^* \Delta x \Delta y)_t - (\rho w^* \Delta x \Delta y)_w
\end{aligned} \tag{3.24}$$

การหาค่าความเร็วแก้ไขในสมการ (3.24) สามารถหาได้จากสมการ (3.22) ส่วนค่าความเร็วที่ไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องนั้นสามารถหาได้จากการใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงของ Rhie and Chow (1983) โดยแสดงรายละเอียดสำหรับความเร็วแก้ไขดังสมการ (3.25) และความเร็วที่ไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องดังสมการ (3.26)

$$\begin{aligned}
u'_e &= - \left(\frac{1}{A_p^u} \right)_e \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right)_e \Delta \nabla'_e \\
u'_w &= - \left(\frac{1}{A_p^u} \right)_w \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right)_e \Delta \nabla'_w \\
v'_n &= - \left(\frac{1}{A_p^v} \right)_n \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right)_n \Delta \nabla'_n \\
v'_s &= - \left(\frac{1}{A_p^v} \right)_s \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right)_s \Delta \nabla'_s \\
w'_t &= - \left(\frac{1}{A_p^w} \right)_t \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right)_t \Delta \nabla'_t \\
w'_b &= - \left(\frac{1}{A_p^w} \right)_b \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right)_t \Delta \nabla'_b
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
u_e^* &= u_e^* - \left(\frac{1}{A_P^u} \right)_e \left[\left(\frac{p_E - p_P}{x_E - x_P} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_e \right] \Delta \nabla_e \\
u_w^* &= u_w^* - \left(\frac{1}{A_P^u} \right)_w \left[\left(\frac{p_P - p_W}{x_P - x_W} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_w \right] \Delta \nabla_w \\
v_n^* &= v_n^* - \left(\frac{1}{A_P^v} \right)_n \left[\left(\frac{p_N - p_P}{y_N - y_P} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_n \right] \Delta \nabla_n \\
v_s^* &= v_s^* - \left(\frac{1}{A_P^v} \right)_s \left[\left(\frac{p_P - p_S}{y_P - y_S} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_s \right] \Delta \nabla_s \\
w_t^* &= w_t^* - \left(\frac{1}{A_P^w} \right)_t \left[\left(\frac{p_T - p_P}{z_T - z_P} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_t \right] \Delta \nabla_t \\
w_b^* &= w_b^* - \left(\frac{1}{A_P^w} \right)_b \left[\left(\frac{p_P - p_B}{z_P - z_B} \right) - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_b \right] \Delta \nabla_b
\end{aligned} \tag{3.26}$$

นำค่าความเร็วแก้ไขและค่าความเร็วที่ไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องในสมการ (3.25) และสมการ (3.26) ตามลำดับ แทนในสมการ (3.24) โดยใช้วิธีประมาณค่าแบบผลต่างกลางสำหรับการหาค่าความชันของความดันในสมการ (3.25) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$A_P^p p_P' = A_E^p p_E' + A_W^p p_W' + A_N^p p_N' + A_S^p p_S' + A_T^p p_T' + A_B^p p_B' + m_p \tag{3.27}$$

โดยที่

$$A_E^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^u} \right)_e (\Delta y \Delta z)^2$$

$$A_W^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^u} \right)_w (\Delta y \Delta z)^2$$

$$A_N^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^v} \right)_n (\Delta x \Delta z)^2$$

$$A_S^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^v} \right)_s (\Delta x \Delta z)^2$$

$$A_T^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^w} \right)_t (\Delta x \Delta y)^2$$

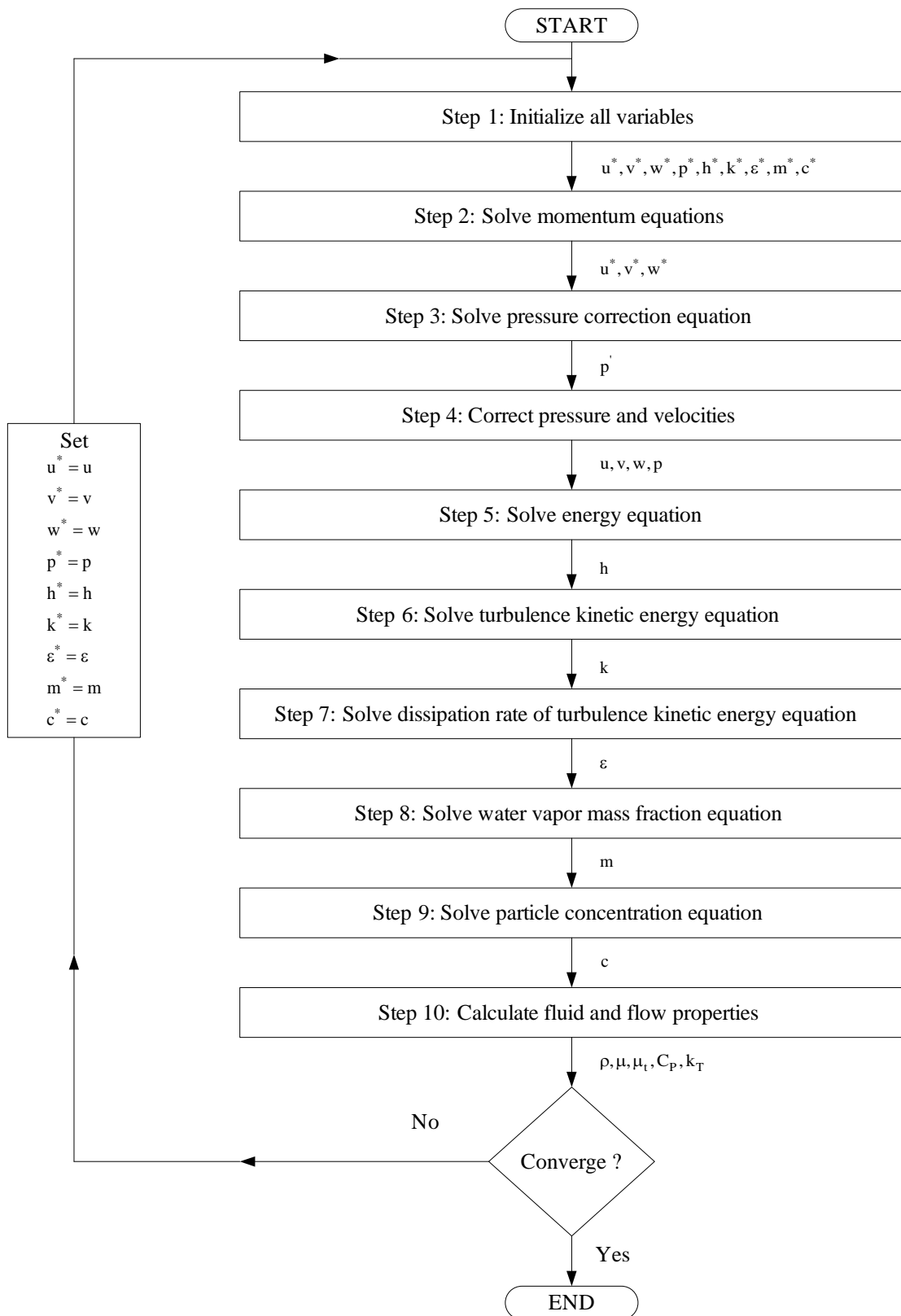
$$A_B^p = \left(\rho \frac{1}{A_P^w} \right)_b (\Delta x \Delta y)^2$$

$$A_p^p = A_E^p + A_W^p + A_N^p + A_S^p + A_T^p + A_B^p$$

$$m_p = (\rho u^* \Delta y \Delta z)_e - (\rho u^* \Delta y \Delta z)_w + (\rho v^* \Delta x \Delta z)_n$$

$$- (\rho v^* \Delta x \Delta z)_s + (\rho w^* \Delta x \Delta y)_t - (\rho w^* \Delta x \Delta y)_b$$

สมการ (3.27) เรียกว่าสมการความดันแก้ไข ส่วน m_p คือมวลส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากค่าความเร็วของสมการโมเมนตัมมีค่าไม่สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่อง เพื่อให้ค่าความเร็วจากสมการโมเมนตัมสอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องจึงต้องใช้ค่าความดันแก้ไขปรับแก้ค่าความเร็วที่ได้จากสมการโมเมนตัม สำหรับลำดับขั้นตอนวิธี SIMPLE ในการแก้ปัญหาค่าไหลในงานวิจัยนี้แสดงในรูปแบบที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี SIMPLE ในการแก้ปัญหาคาร์ไหล

3.4 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตมีผลโดยตรงต่อการศึกษาพฤติกรรมของของไหล การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้สอดคล้องกับสถานะของปัญหาการไหลจริงย่อมทำให้การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมของปัญหาการไหลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเภทของเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า (Inlet Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก (Outlet Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตร (Symmetry Boundary Condition) เงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำ (Periodic Boundary Condition) และเงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง (Wall Boundary Condition) รายละเอียดของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแสดงได้ดังนี้

3.4.1 เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้า

เงื่อนไขขอบเขตแบบทางเข้าค่าของตัวแปรทั่วไปถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตามลักษณะของปัญหาการไหล ยกเว้นค่าของความดันจะหาได้จากการใช้วิธีการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation) สำหรับค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเป็นไปตามเงื่อนไขของ Versteeg and Malalasekera (1995) ดังนี้

$$k_{\text{Inlet}} = \frac{3}{2}(U_o T_i)^2 \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_{\text{Inlet}} = C_{\mu}^{3/4} \frac{k_{\text{Inlet}}^{3/2}}{0.07L_s} \quad (3.29)$$

3.4.2 เงื่อนไขขอบเขตแบบทางออก

โดยปกติแล้วค่าของตัวแปรทั่วไปบริเวณขอบเขตของทางออกจะไม่ทราบค่า ดังนั้นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการกำหนดให้ขอบเขตดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรในทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบเขตนั้น (Zero Normal Gradient) และเพื่อให้สอดคล้องตามสมการความต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการปรับแก้ฟลักซ์การไหลที่ทางออกให้สมดุลกับฟลักซ์การไหลที่ทางเข้า สำหรับค่าของความดันที่ขอบเขตทางออกสามารถหาได้จากการประมาณค่านอกช่วงหรือหากขอบเขตทางออกนั้นเปิดสู่บรรยากาศจะกำหนดให้ความดันที่ขอบเขตดังกล่าวเป็นความดันบรรยากาศ

3.4.3 เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตร

เงื่อนไขขอบเขตแบบสมมาตรค่าของตัวแปรทั่วไปถูกกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตั้งฉากกับขอบเขตดังกล่าว

3.4.4 เงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำ

เงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำถูกใช้ในการกำหนดขอบเขตของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ เพื่อลดขนาดของโดเมนที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการจองหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ เนื่องจากปัญหาการไหลดังกล่าวต้องการความละเอียดของกริดค่อนข้างสูง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำสามารถทำได้โดยการกำหนดให้ค่าของตัวแปรทั่วไปที่จุดต่อสุดท้ายของการคำนวณในรอบปัจจุบันมีค่าเท่ากับค่าของตัวแปรที่จุดต่อที่สองของการคำนวณในรอบถัดไป และค่าของตัวแปรที่จุดต่อรองสุดท้ายของการคำนวณในรอบปัจจุบันมีค่าเท่ากับค่าของตัวแปรที่จุดต่อแรกของการคำนวณในรอบถัดไป ยกเว้นค่าของความดันเนื่องจากสามารถหาค่าได้จากกริดคำนวณในรอบถัดไป

3.4.5 เงื่อนไขขอบเขตแบบผนัง

เงื่อนไขขอบเขตแบบผนังนั้น ค่าของตัวแปร โดยทั่วไปถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ หากเป็นผนังที่ไม่เคลื่อนที่ค่าของความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขการไม่ลื่นไถล (No Slip Condition) สำหรับค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนมีค่าเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขของแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้

3.5 เทคนิคการกันค่า (Block Off Technique)

เทคนิคการกันค่าถูกนำมาใช้ในการกำหนดให้ค่าของตัวแปรทั่วไปที่จุดต่อ P มีค่าคงที่ ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับแก้ค่า A_p และ b^p ในสมการ (3.17) ดังนี้

$$(A_p + 10^{30})\phi_p = \sum A_{nb}\phi_{nb} + (b^p + 10^{30}\phi_{fix}) \quad (3.30)$$

โดย 10^{30} แทนค่าที่มีปริมาณใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทั่วไป และ ϕ_{fix} แทนค่าคงที่ของตัวแปรทั่วไปที่จุดต่อ P ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (3.30) จะมีค่าเป็น

$$\phi_p = \phi_{fix} \quad (3.31)$$

ในการใช้เทคนิคการกันค่าเพื่อจำลองบริเวณที่เป็นสิ่งกีดขวาง ซึ่งภายในบริเวณดังกล่าวค่าของความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น ϕ_{fix} จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ และ A_p ของสมการโมเมนตัมจะถูกบวกด้วย 10^{30} นอกจากนี้จำเป็นต้องกำหนดฟังก์ชันการไหลที่ขอบเขตของสิ่งกีดขวางให้มีค่าเป็นศูนย์ด้วย เพื่อให้ไม่ให้ของไหลสามารถผ่านเข้าออกในบริเวณดังกล่าวได้

3.6 เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม (Momentum Source Technique)

การเพิ่มแหล่งกำเนิดโมเมนตัมเข้าไปในสมการโมเมนตัมเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มแรงผลักดันของไหลให้สามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมที่เพิ่มเข้าไปในสมการโมเมนตัม เทคนิคดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการจำลองการทำงานของ Laminar Flow Hood การเพิ่มแหล่งกำเนิดโมเมนตัมให้กับจุดต่อใดๆ จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของจุดต่อนั้น ดังนั้นการเพิ่มแหล่งกำเนิดโมเมนตัมทำให้ต้องมีการเพิ่มเทอมการสร้างหรือการสูญเสียในสมการพลังงานด้วยการกำหนดขนาดของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมและเทอมการสร้างหรือการสูญเสียที่ต้องเพิ่มเข้าไปในสมการพลังงานสามารถหาได้จากสมการ (3.32) และสมการ (3.33) ตามลำดับ

$$S_{i,MS} = \frac{1}{V} \left(\frac{\Delta W}{\Delta V} \right) \quad (3.32)$$

$$S_{h,MS} = \frac{\Delta W}{\Delta V} \quad (3.33)$$

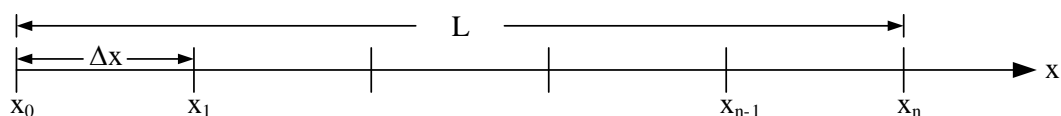
สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเทอมการสร้างหรือการสูญเสียของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่เกิดจากการเพิ่มแหล่งกำเนิดโมเมนตัมสามารถหาค่าได้จากคำแนะนำที่เสนอโดย Karki, Rosenbluth, Patankar, and Levy (2000) ดังนี้

$$S_{k,MS} = \frac{\dot{m}}{\Delta V} \left[\frac{3}{2} (U_o T_1)^2 \right] \quad (3.34)$$

$$S_{\epsilon,MS} = \frac{\dot{m}}{\Delta V} \left[C_\mu^{3/4} \frac{k_{inlet}^{3/2}}{0.07 L_s} \right] \quad (3.35)$$

3.7 การสร้างกริด

การสร้างกริดเป็นการแบ่งโดเมนของปัญหาจากโดเมนที่ต่อเนื่องออกเป็นโดเมนย่อยที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อนำโดเมนย่อยไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่อไป พิจารณาการสร้างกริดในพิกัด x ที่มีขนาดเท่ากับ L ทำการแบ่งขนาดของ L ออกเป็น n ช่วงที่มีขนาดเท่ากันคือ Δx แต่ละช่วงแสดงค่าพิกัด x เป็น x_ξ โดยที่ ξ คือดัชนีตำแหน่งในพิกัด x มีค่าเริ่มจาก 0, 1, 2, ..., n ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบกริดแบบสม่ำเสมอ

ระบบกริดที่ได้จากการสร้างกริดดังแสดงในรูปที่ 3.3 เรียกว่าระบบกริดแบบสม่ำเสมอ (Uniform Grid System) ซึ่งขนาดของกริดมีขนาดเท่ากันทั้งโดเมน ดังนั้นการใช้ระบบกริดแบบสม่ำเสมอในการแก้ปัญหาคาร์ไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงในเฉพาะบางบริเวณ ซึ่งต้องการความละเอียดของกริดในบริเวณนั้นค่อนข้างมากจึงไม่สามารถกระทำได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการสร้างกริดโดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัด x ของแต่ละช่วงกับค่าดัชนีแสดงตำแหน่งเป็นแบบสมการพหุนามอันดับ 3 ดังแสดงในสมการ (3.36) โดยสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2 และ a_3 สามารถหาได้จากเงื่อนไขในสมการ (3.37) ซึ่งขนาดของกริดแรกมีขนาดเท่ากับ $P\%$ ของกริดแบบสม่ำเสมอ และขนาดของกริดสุดท้ายมีขนาดเท่ากับ $Q\%$ ของกริดแบบสม่ำเสมอ เรียกกริดที่สร้างในลักษณะนี้ว่าระบบกริดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Grid System) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

$$x_\xi = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3 \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} x_0 = 0 & \rightarrow \xi = 0 \\ x_1 = (P\%)\Delta x & \rightarrow \xi = 1 \\ x_{n-1} = (Q\%)\Delta x & \rightarrow \xi = n-1 \\ x_n = L & \rightarrow \xi = n \end{aligned} \quad (3.37)$$



รูปที่ 3.4 ระบบกริดแบบไม่สม่ำเสมอ

บทที่ 4

การตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ การตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่เป็นที่ยอมรับของปัญหาการไหลพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากซอฟต์แวร์ FLUENT Version 6.1.22 สำหรับปัญหาการไหลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและไม่มีข้อมูลอื่นใดเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการคำนวณ การตรวจสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิ การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของความชื้น และการตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่นำมาใช้ในการจำลองอุปกรณ์ภายในห้องสะอาด

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เลือกปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานและปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ เป็นกรณีทดสอบเนื่องจากเป็นปัญหาการไหลที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

4.1.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ เป็นปัญหาการไหลมาตรฐานที่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ได้ จึงเป็นที่นิยมใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.1 โดยของไหลไหลผ่านช่องทางเข้าด้วย $Re=100$ เนื่องจากลักษณะการไหลเป็นการ

ไหลที่มีความสมมาตรรอบเส้นกึ่งกลางของช่องคู่ขนาน ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาจึงสามารถสร้างโดเมนของปัญหาเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น สำหรับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 (White, 1994)

$$u = 1.5U_0 \left[1 - \left(\frac{2y}{H} - 1 \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ u แทนผลเฉลยความเร็วที่ระยะสูงใดๆ

U_0 แทนความเร็วที่ทางเข้า

y แทนระยะใดๆ ที่วัดจากผนังด้านล่างของโดเมน

H แทนความสูงของช่องคู่ขนาน

ผลการเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกนบริเวณปลายช่องคู่ขนานระหว่างผลเฉลยเชิงวิเคราะห์กับผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ในรูปที่

4.2

4.1.2 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

เป็นปัญหาการไหลที่นิยมใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบเชิงตัวเลขอีกปัญหาหนึ่ง ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของ Ghia, Ghia, and Shin (1982) ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.3 โดยของไหลที่ด้านบนของร่องเหลี่ยมแนวขวางเคลื่อนที่ด้วย $Re = 100$ ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน

ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ และปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนประเภทสองสมการที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.2.1 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

เป็นปัญหาการไหลที่นิยมใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากมีข้อมูลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation Data, DNS Data) ของ Kim, Moin, and Moser (1987) ให้เปรียบเทียบผลการคำนวณ ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.6 เลือกลงใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบวนซ้ำ

ที่ช่องทางเข้าเพื่อประหยัดขนาดของ โดเมนการคำนวณตามแนวแกน รูปที่ 4.7-4.10 แสดงการกระจายตัวของความเร็ว ความเค้นเฉือนของความปั่นป่วน พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และ อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_c = 180$ ตามลำดับ

4.2.2 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ

เป็นปัญหาการไหลที่นอกจากจะใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วนแล้ว ยังเป็นปัญหาการไหลที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อพัฒนาสู่การแก้ปัญหการไหลในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.11 การกระจายตัวของความเร็วที่เป็นผลการคำนวณเชิงตัวเลขถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Prasad and Koseff (1989) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิต

ในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการจำลองพฤติกรรมของการไหล ดังนั้นเมื่อต้องการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ตามขั้นตอนของการแก้ปัญหเกี่ยวกับอุณหภูมิต ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงลอยตัวเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิต และปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นจากความปั่นป่วน (Turbulent Heat Flux) เมื่อการไหลที่พิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

4.3.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.14 ผนังด้านซ้ายและด้านขวาของช่องสี่เหลี่ยมมีอุณหภูมิตคงที่ 20°C และ 60°C ตามลำดับ ส่วนผนังด้านบนและด้านล่างของช่องสี่เหลี่ยมมีสถานะเป็นฉนวนทั้งสองด้าน ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของ Reddy and Satake (1980) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16

4.3.2 ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ

ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.17 ของไหลที่ทางเข้ามี $Re=678$ และอุณหภูมิ $15^{\circ}C$ พื้นห้องถูกทำให้ร้อนด้วยอุณหภูมิกึ่งที่ $35^{\circ}C$ ส่วนผนังด้านอื่นของห้องมีอุณหภูมิกึ่งที่ $15^{\circ}C$ ผลการคำนวณเชิงตัวเลขถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blay, Mergui, and Niculae (1992) ดังแสดงในรูปที่ 4.18-4.21

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองพฤติกรรมของความชื้น

จากการสืบค้นเอกสารไม่พบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการไหลของความชื้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากซอฟต์แวร์ FLUENT และใช้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติเป็นกรณีศึกษา ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.22 อากาศที่ช่องทางเข้ามีอุณหภูมิ $30^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ 25 % และ $Re=7,000$ ผนังทุกด้านของห้องมีอุณหภูมิกึ่งที่ $20^{\circ}C$ การเปรียบเทียบผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.23-4.25

4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิคที่นำมาใช้ในการจำลองอุปกรณ์ภายในห้องสะอาด

อุปกรณ์สำคัญที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องสะอาดประกอบด้วย 2 อุปกรณ์คือ โต๊ะที่ใช้ในการปฏิบัติงานและ Laminar Flow Hood เลือกใช้เทคนิคการกันค่าเพื่อจำลองโต๊ะที่ใช้ในการปฏิบัติงานให้เป็นอุปกรณ์ขวางการไหล และใช้เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัมร่วมกับเทคนิคการกันค่าในการจำลองการทำงานของ Laminar Flow Hood ปัญหาการไหลผ่านสิ่งกีดขวางและปัญหาการไหลที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความเข้าใจในการใช้เทคนิคทั้งสอง โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากซอฟต์แวร์ FLUENT

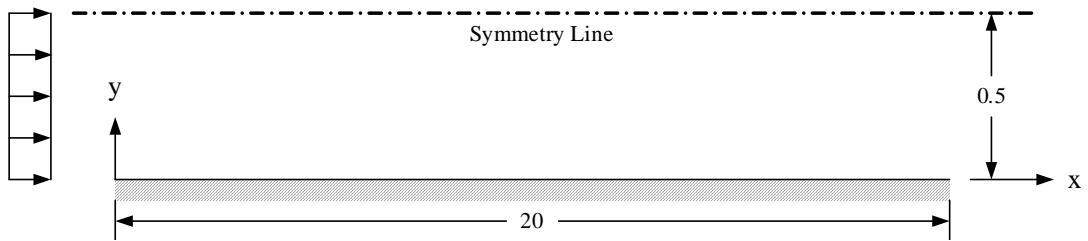
4.5.1 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.26 ของไหลไหลผ่านช่องทางเข้าที่ $Re=100$ ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วแสดงในรูปที่ 4.27

4.5.2 ปัญหาการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ

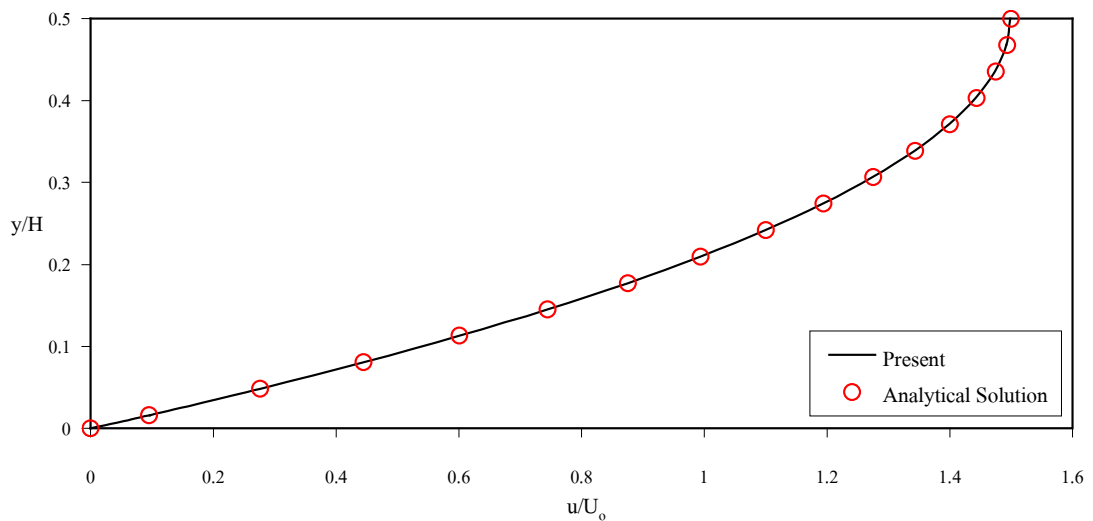
ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลเป็นไปตามรูปที่ 4.28 กำหนดให้ของไหลไหลผ่านช่องทางเข้าที่ $Re=100$ และ $10,000$ สำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนตามลำดับ

แหล่งกำเนิดโมเมนต์ที่พิจารณามีขนาด 0.5 N/m^3 ผลการกระจายตัวของความเร็วแสดงในรูปที่ 4.29-4.30

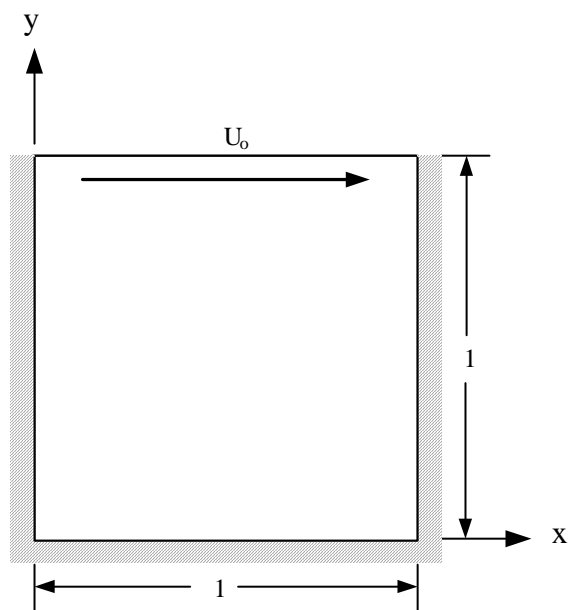


รูปที่ 4.1 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)

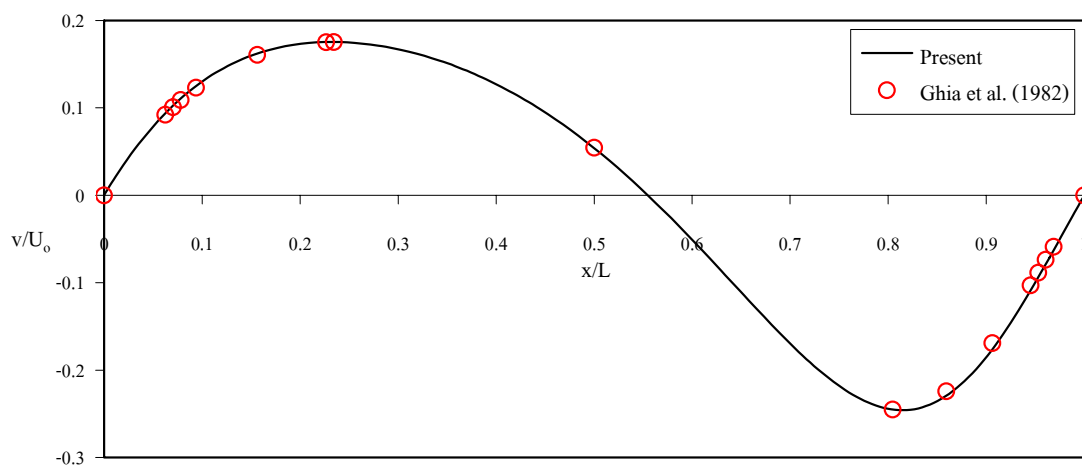
CHANNEL FLOW



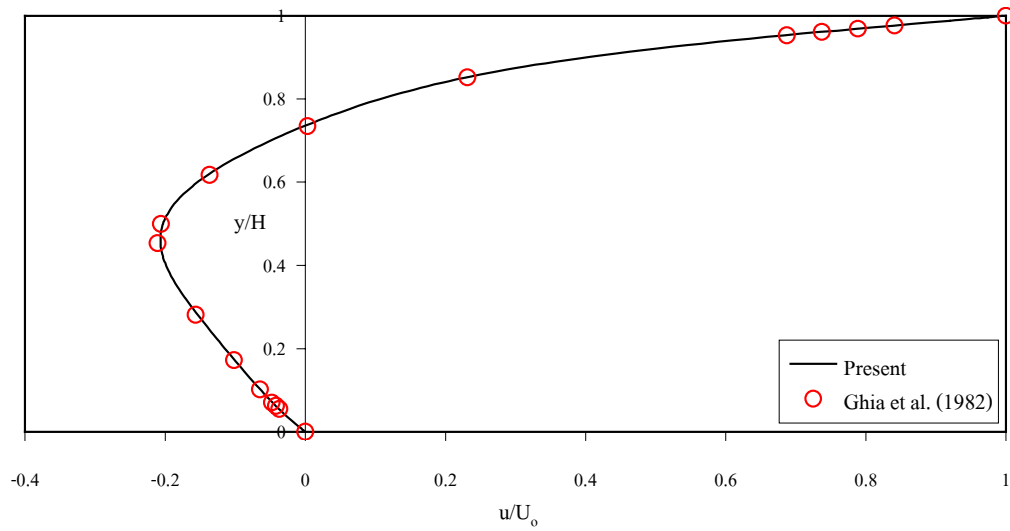
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของความเร็ว u บริเวณปลายช่องคู่ขนานของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re=100$



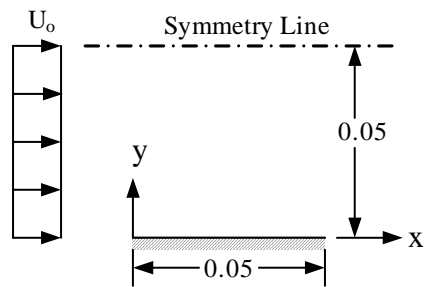
รูปที่ 4.3 ลักษณะของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)



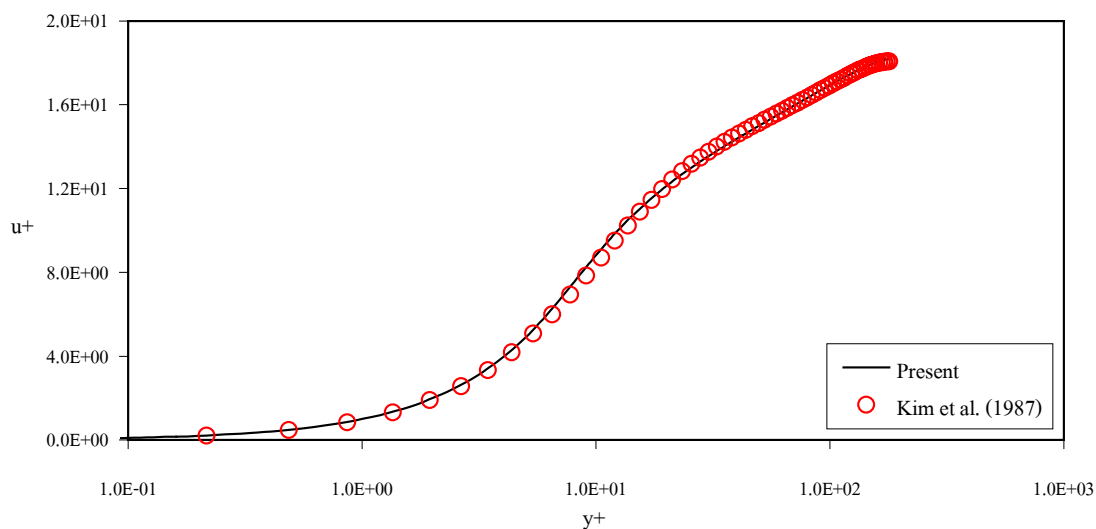
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y=0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re=100$



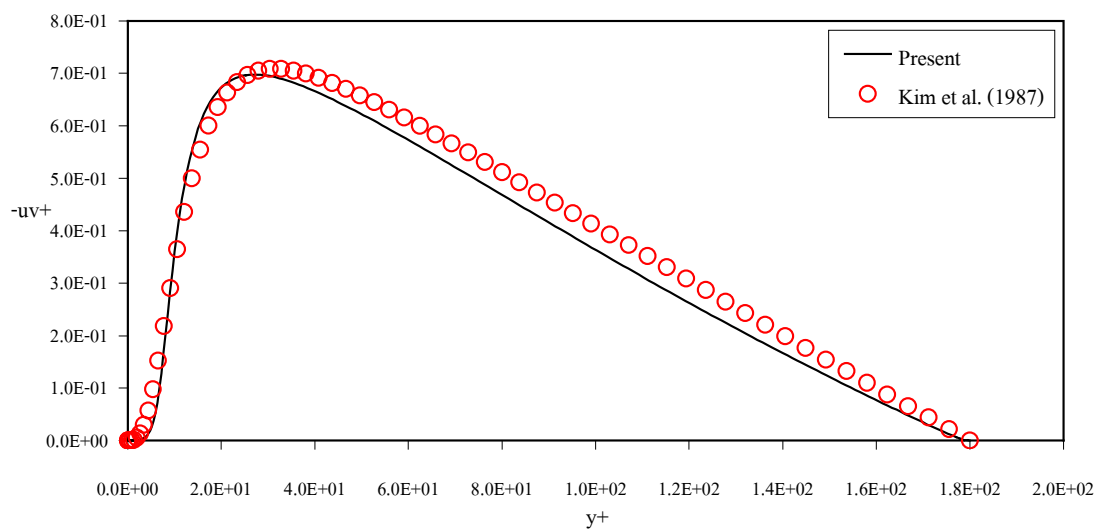
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x = 0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re = 100$



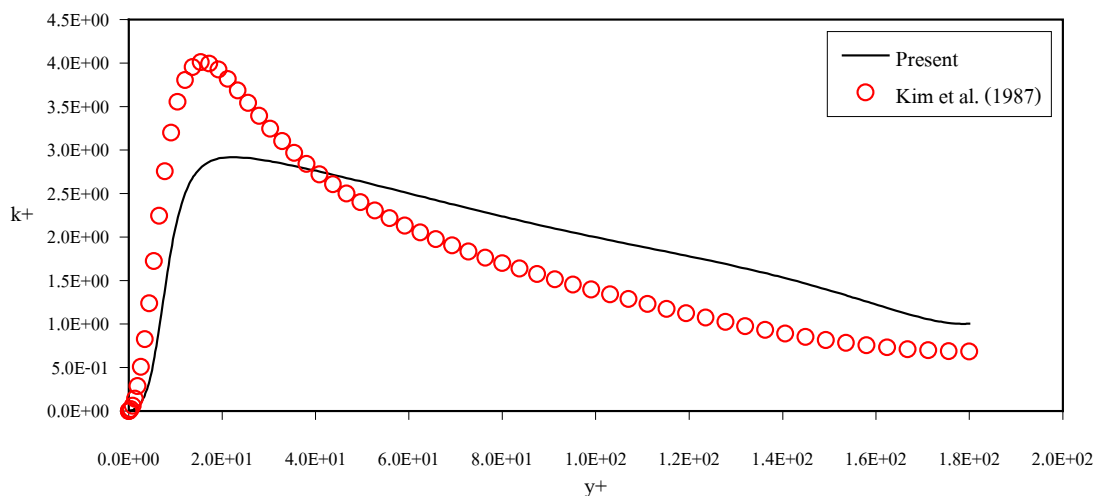
รูปที่ 4.6 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องกุ่มขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)



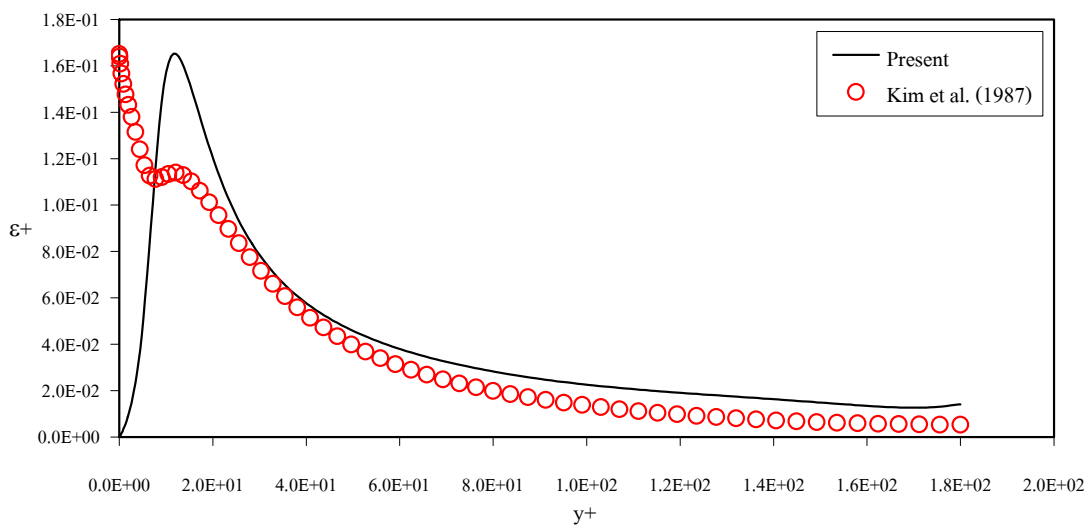
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$



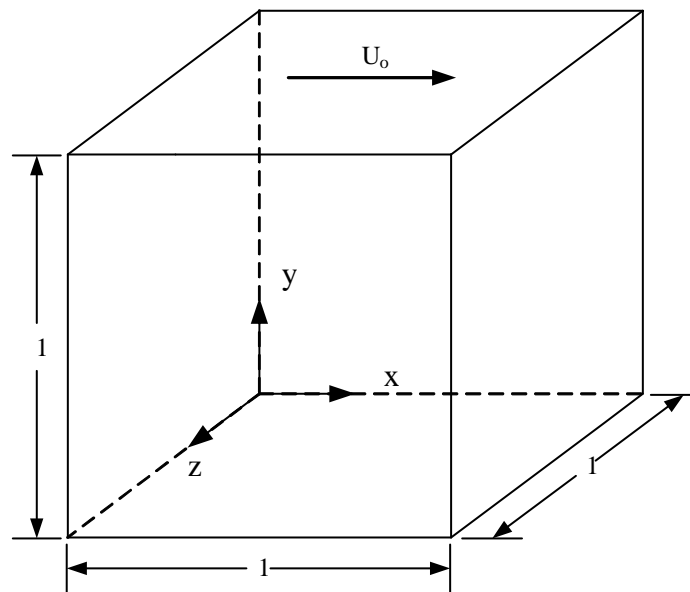
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของความเค้นเฉือนของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$

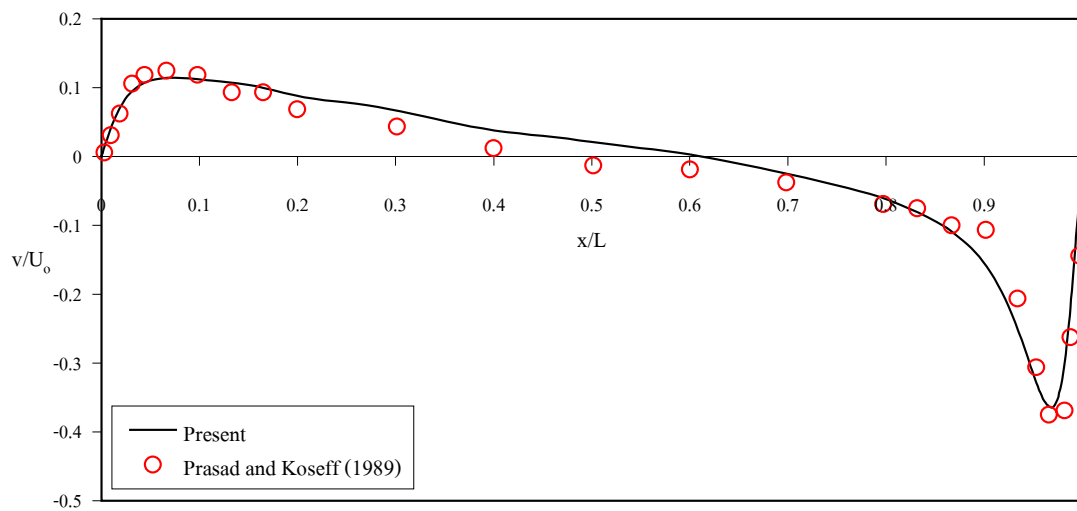


รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในช่องคู่ขนานในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re_{\tau} = 180$

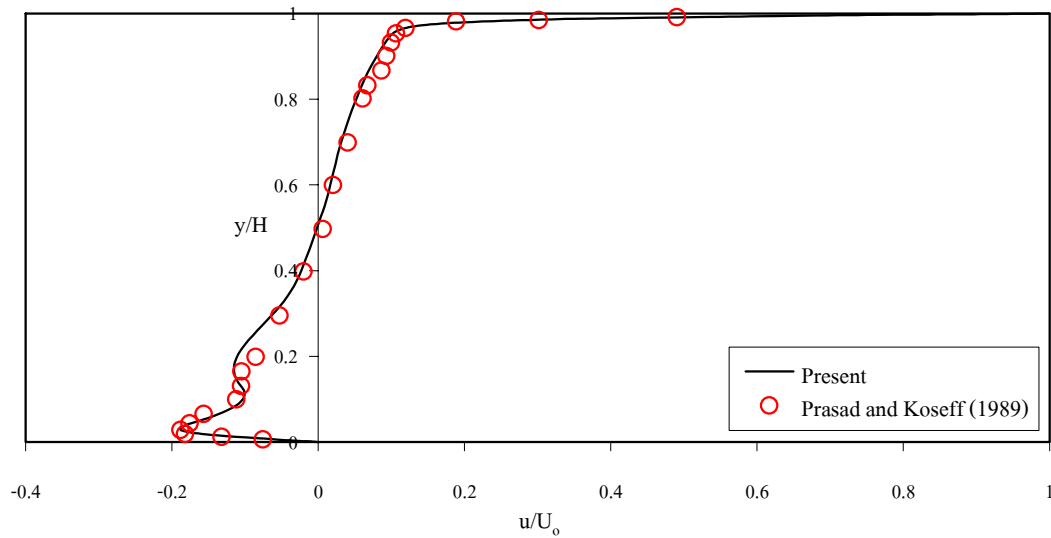


รูปที่ 4.11 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (หน่วยเป็น m)

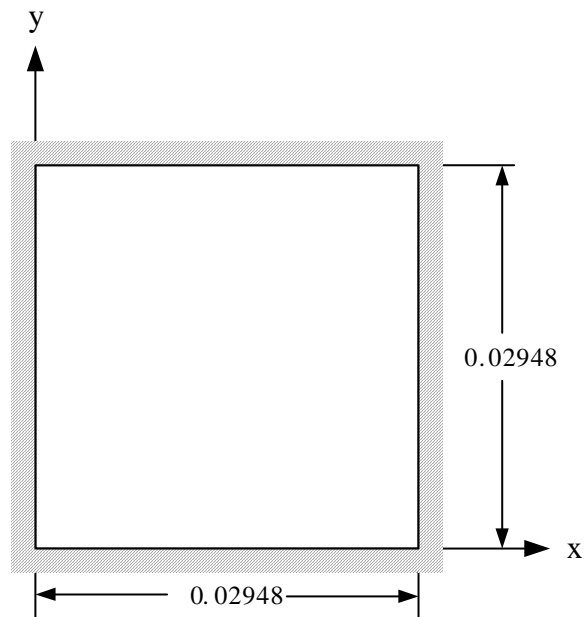
Re 10000



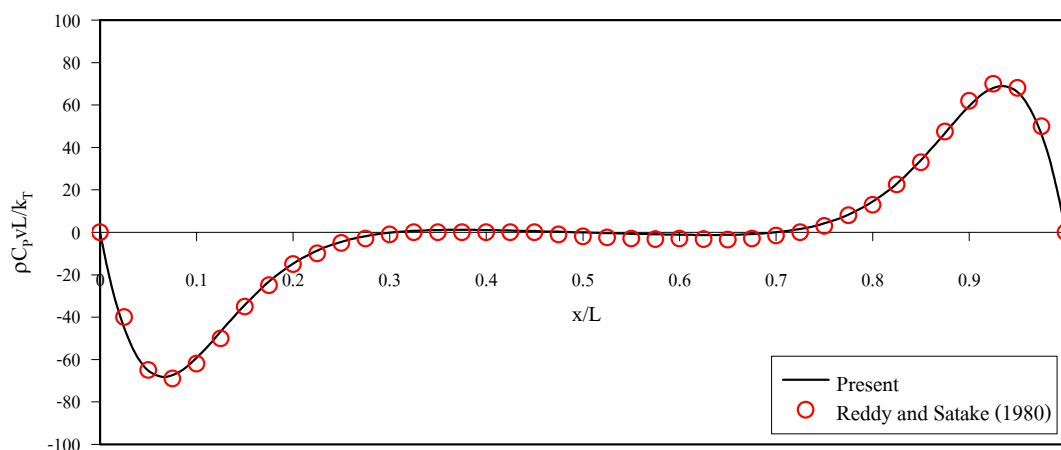
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y=0.5$ m และ $z=0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re=10,000$



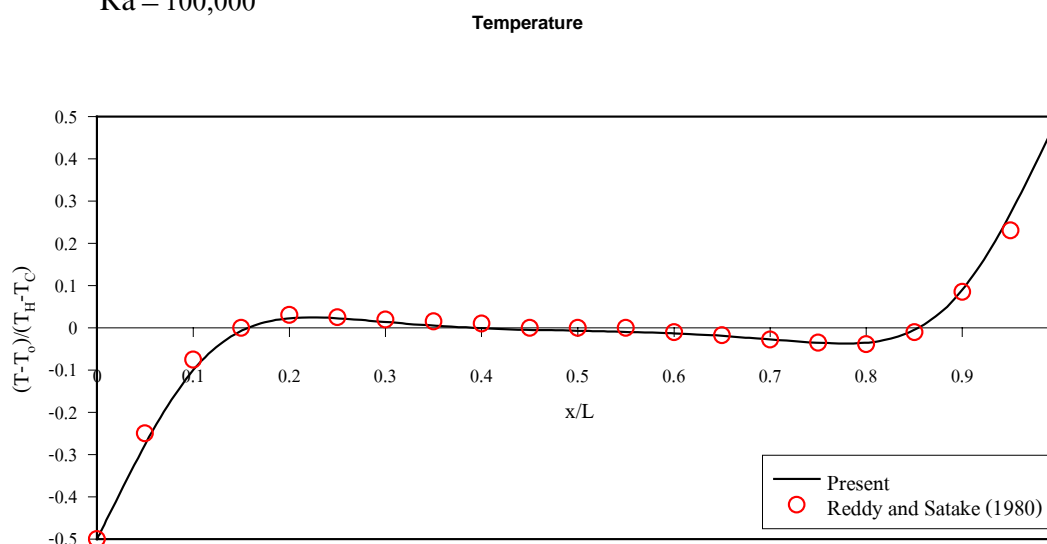
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x=0.5$ m และ $z=0.5$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนผ่านร่องเหลี่ยมแนวขวางในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re=10,000$



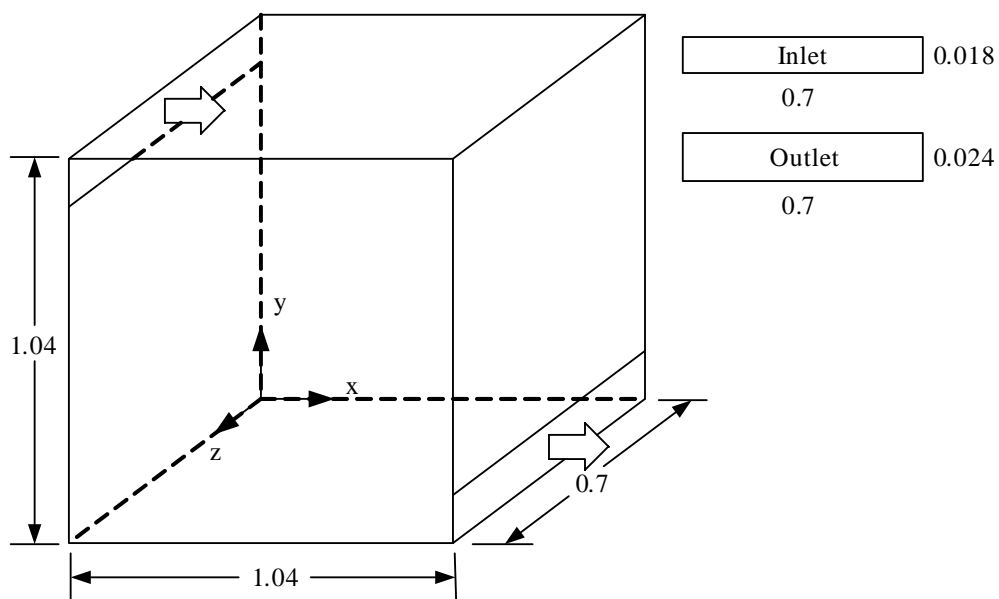
รูปที่ 4.14 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)



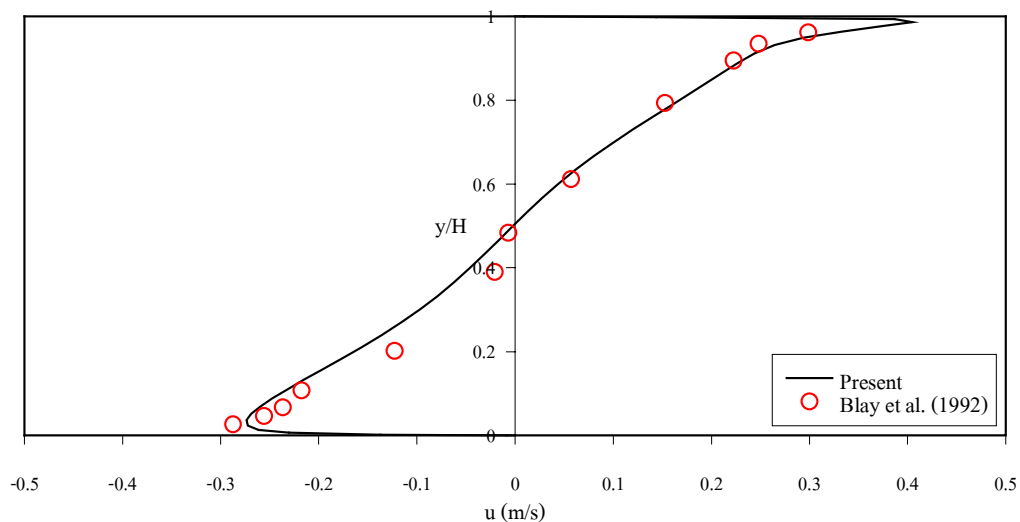
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y = 0.01474$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Ra = 100,000$



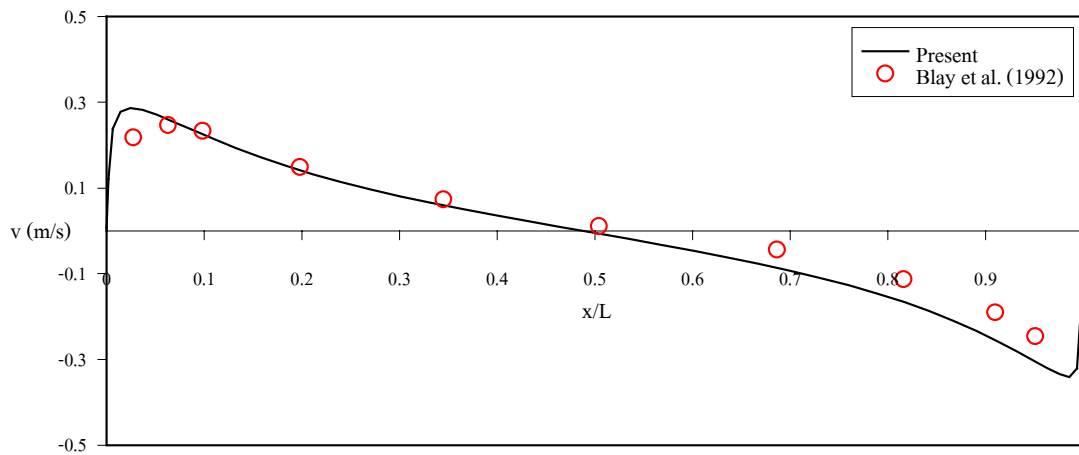
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $y = 0.01474$ m ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบภายในช่องสี่เหลี่ยมเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Ra = 100,000$



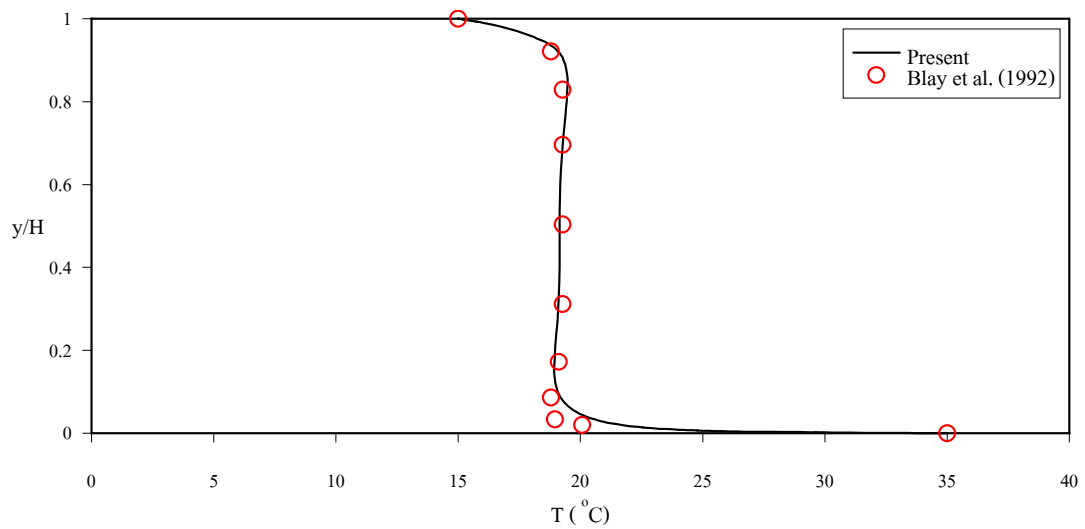
รูปที่ 4.17 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิทตจก 3 มิติ (หน่วยเป็น m)



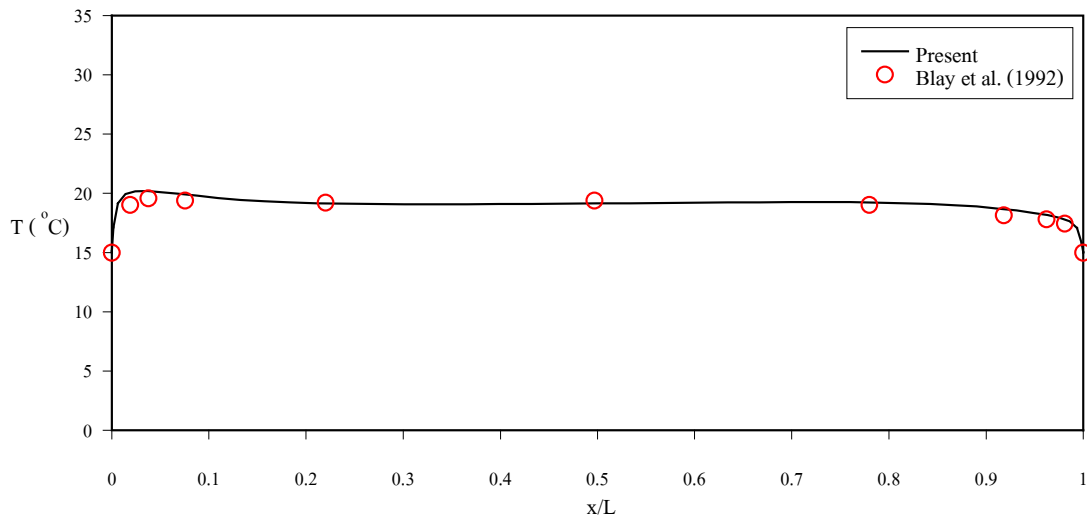
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของความเร็ว u ที่ตำแหน่ง $x = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิทตจก 3 มิติที่ $Re = 678$



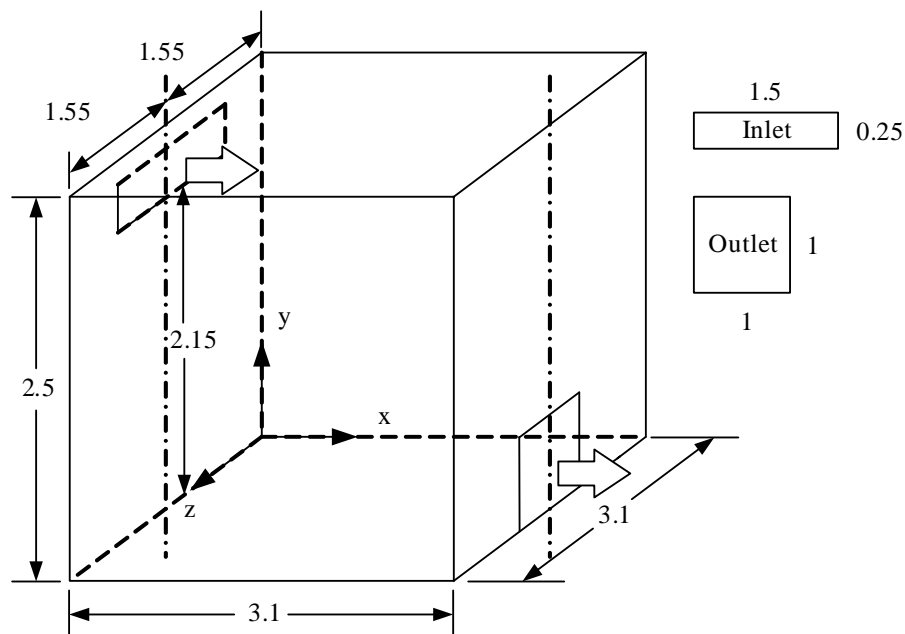
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของความเร็ว v ที่ตำแหน่ง $y=0.502$ m และ $z=0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re=678$



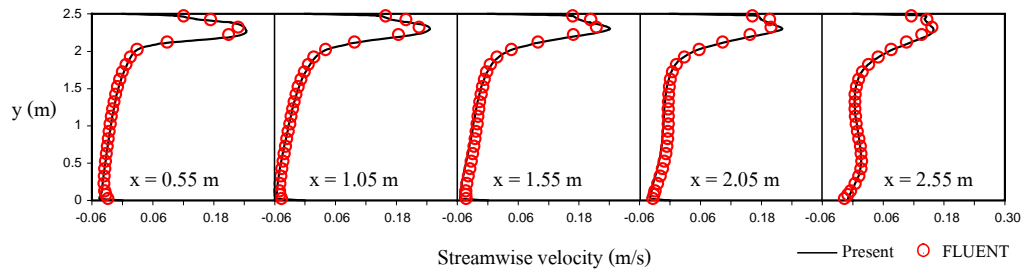
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $x=0.502$ m และ $z=0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re=678$



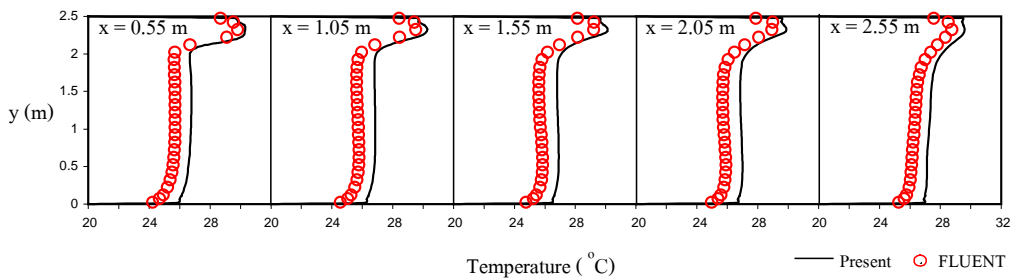
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $y = 0.502$ m และ $z = 0.35$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าเนื่องจากการพาความร้อนแบบผสมในระบบพิกัดฉาก 3 มิติที่ $Re = 678$



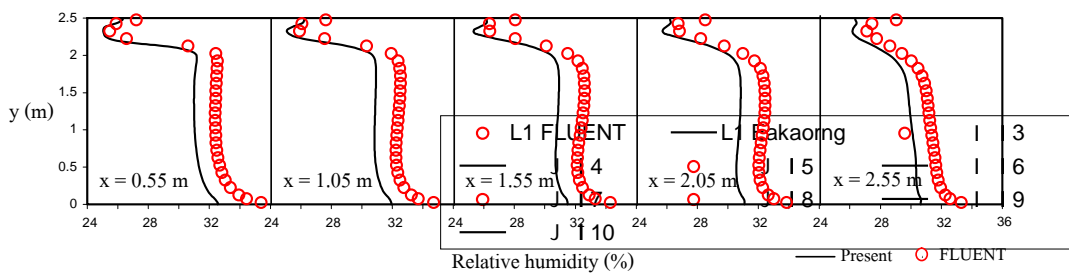
รูปที่ 4.22 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ (หน่วยเป็น m)



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของความเร็ว u บนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพัดฉลาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$

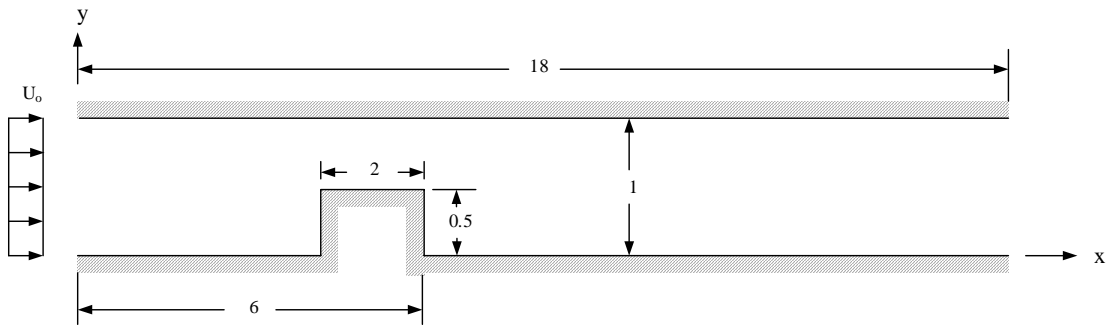


รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพัดฉลาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$

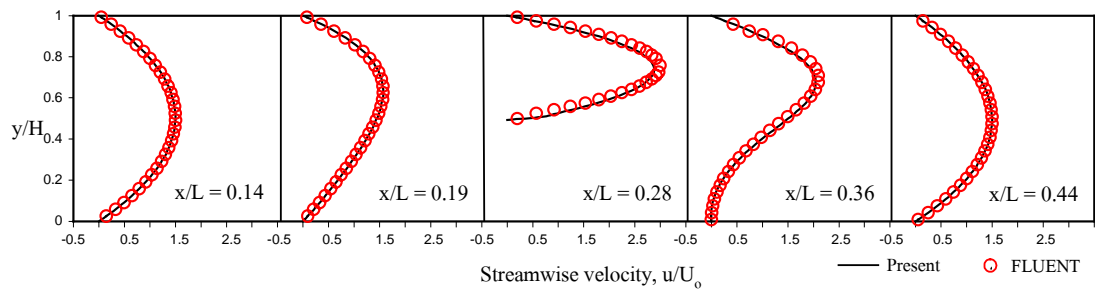


รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของความชื้นบนระนาบ $z = 1.55$ m ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศที่มีความชื้นภายในห้องสี่เหลี่ยมเปล่าในระบบพัดฉลาก 3 มิติที่ $Re = 7,000$

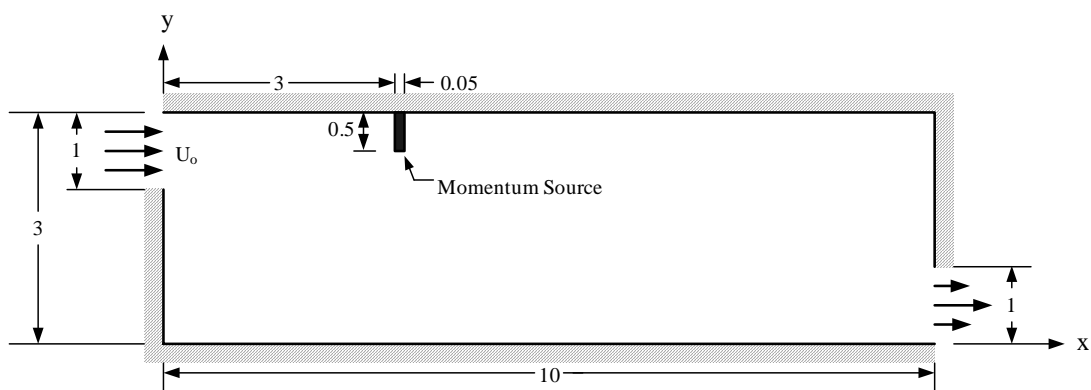
○ L1 FLUENT	— L1 Eakaong	○ J H3
— J 14	○ I 15	— J H6
○ J 17	○ I 18	— J H9
— J I 10		



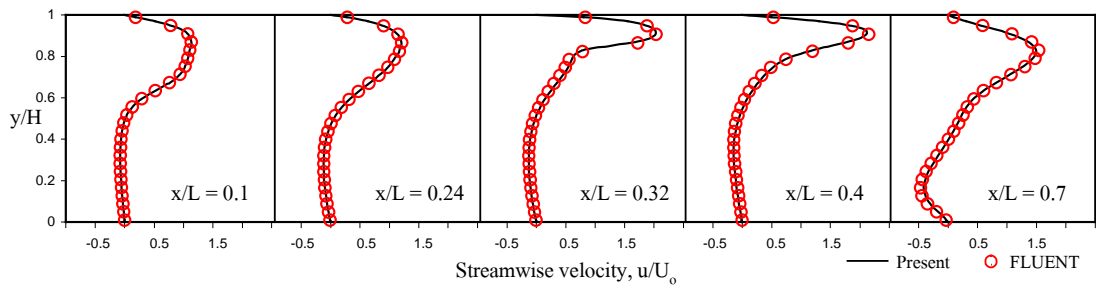
รูปที่ 4.26 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)



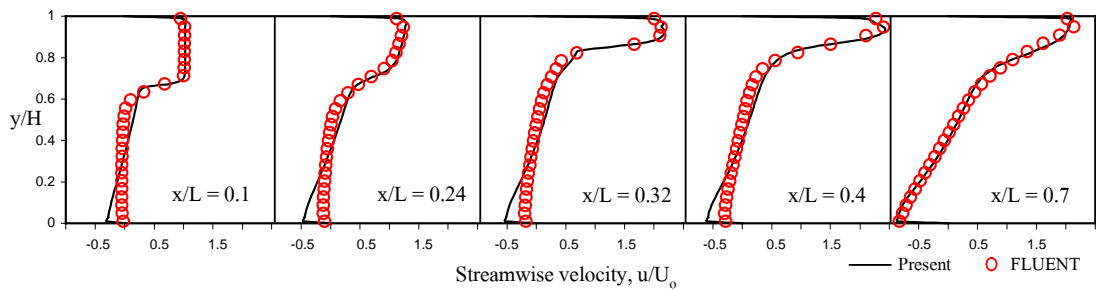
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบผ่านสิ่งกีดขวางในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re=100$



รูปที่ 4.28 ลักษณะรูปร่างของปัญหาการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติ (หน่วยเป็น m)



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบราบเรียบที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re=100$



รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของความเร็ว u ของปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดโมเมนตัมในระบบพิกัดฉาก 2 มิติที่ $Re=10,000$

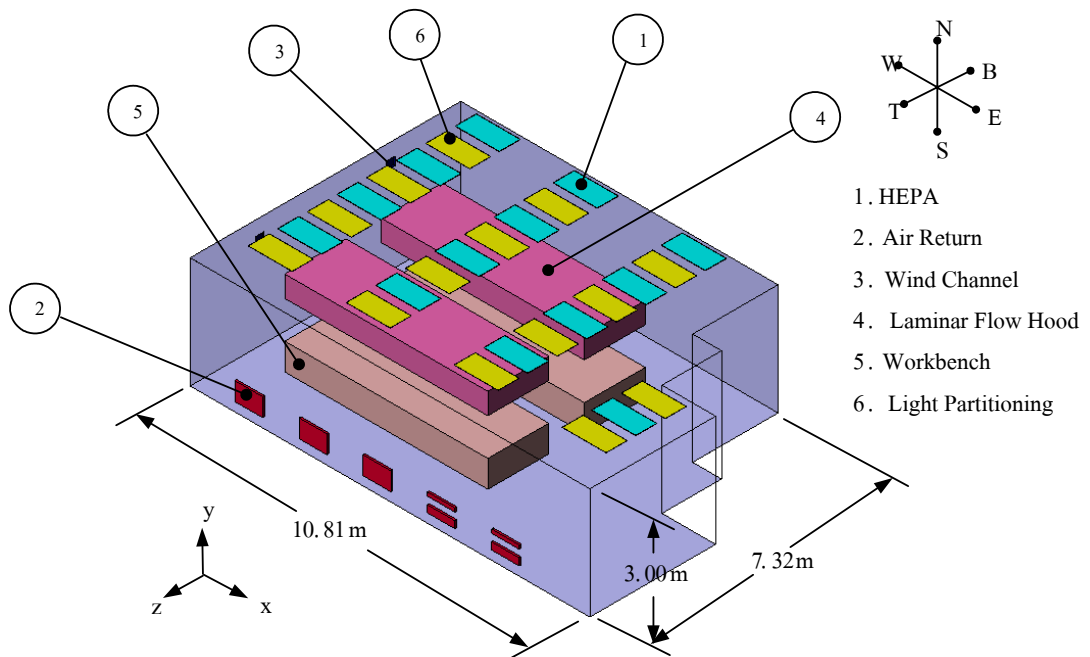
บทที่ 5

พฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด

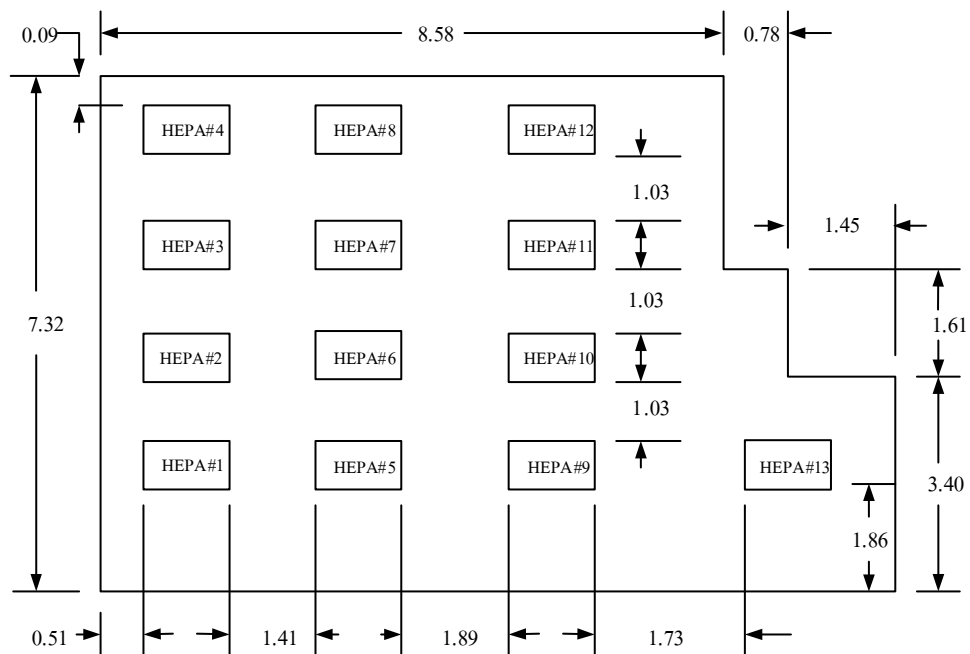
บทนี้จะนำเสนอในส่วนของการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด หัวข้อ 5.1 จะกล่าวถึงรูปร่างของห้องสะอาดที่ใช้เป็นกรณีศึกษา หัวข้อ 5.2 กล่าวถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของสภาวะแวดล้อมต่างๆ ภายในห้องสะอาด หัวข้อ 5.3 กล่าวถึงผลของการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด หัวข้อ 5.4 กล่าวถึงผลของการศึกษาพฤติกรรมของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องสะอาด หัวข้อ 5.5 กล่าวถึงผลของการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด และสุดท้าย หัวข้อ 5.6 กล่าวถึงผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด

5.1 รูปร่างของห้องสะอาด

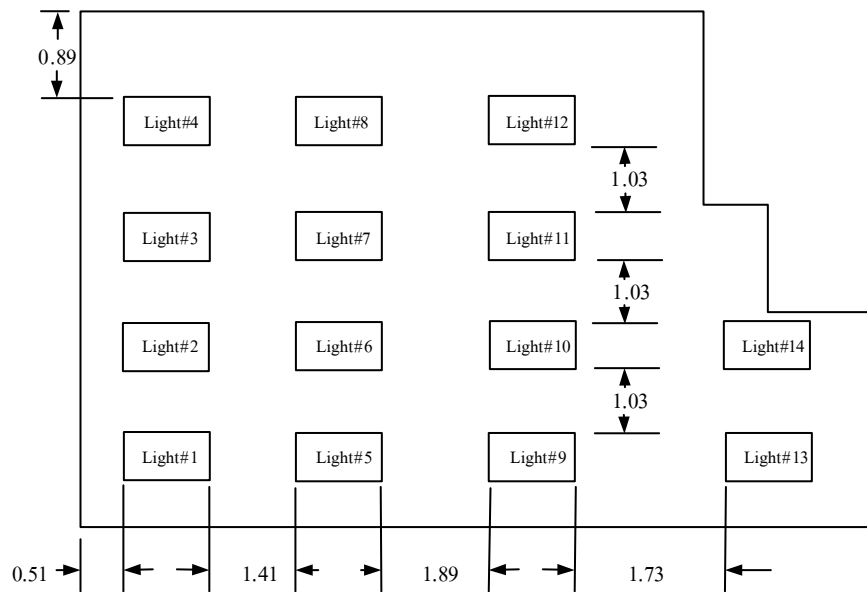
ห้องสะอาดที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นห้องสะอาด SQE C/R ของบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมา ระดับความสะอาดภายในห้องถูกออกแบบให้ทำงานที่ระดับความสะอาด Class 10,000 (ขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง $0.5 \mu\text{m}$ ไม่เกิน 353,000 อนุภาคในปริมาตร 1 m^3 ตามข้อกำหนดของ U.S. Federal Standard 209E) ในส่วนพื้นที่การปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ถูกออกแบบให้มีระดับความสะอาด Class 100 (ขนาดอนุภาคของฝุ่นละออง $0.5 \mu\text{m}$ ไม่เกิน 3,530 ในปริมาตร 1 m^3) ขนาดของห้องสะอาดที่มากที่สุดในทิศทาง x, y และ z มีขนาดเท่ากับ 10.81 m, 3.0 m และ 7.32 m ตามลำดับ รายละเอียดของห้องสะอาดแสดงในรูปที่ 5.1 อุปกรณ์ภายในห้องสะอาดประกอบด้วยหัวจ่ายลมที่มีการติดตั้งแผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูงชนิด HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters) 13 หัวจ่าย ช่องลม (Wind Channel) ที่ผนังด้านทิศตะวันตก 2 ช่อง ช่องลมกลับ (Air Return) 5 ช่อง แฉกหลอดไฟ (Light Partitioning) 14 แฉก โต๊ะปฏิบัติงาน (Workbench) 2 ตัว และ Laminar Flow Hood 2 เครื่อง รายละเอียดตำแหน่งและขนาดของแต่ละอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 5.2-5.5 และตารางที่ 5.1



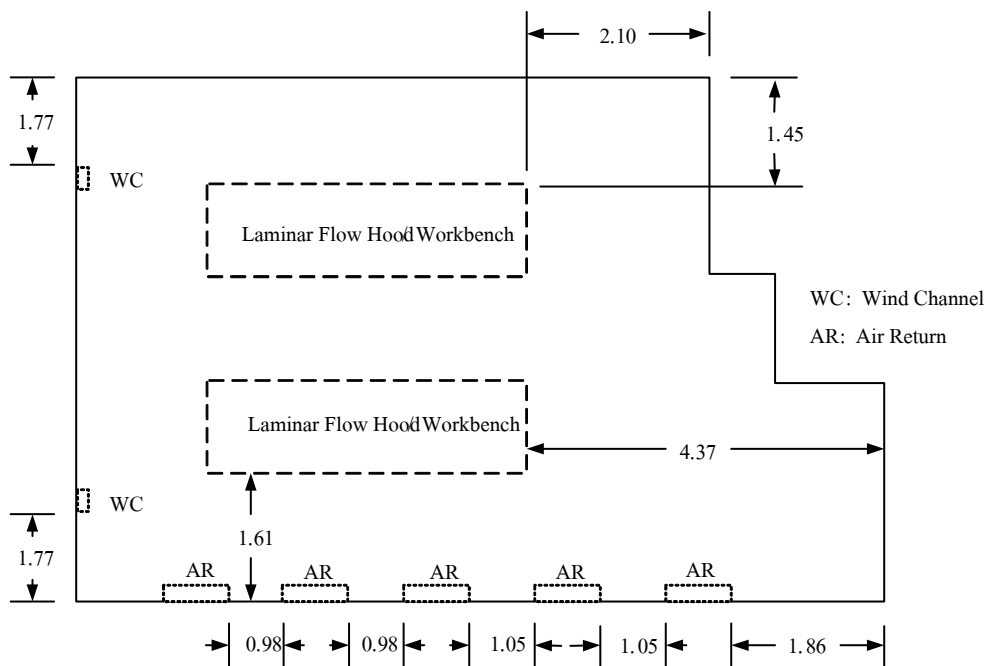
รูปที่ 5.1 รูปร่างของห้องสะอาด SQE C/R



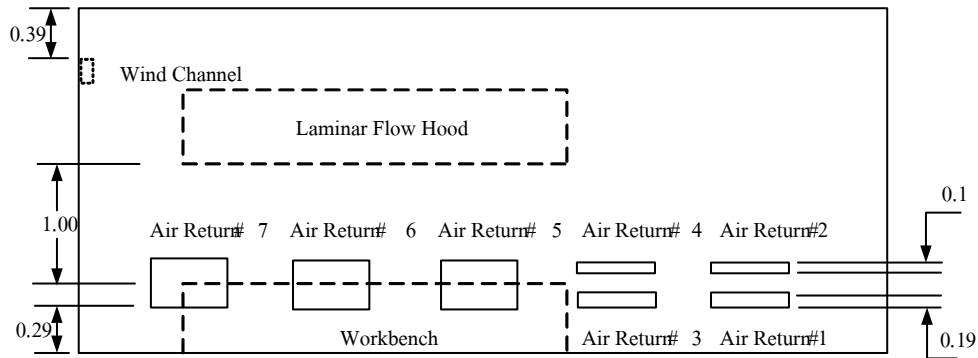
รูปที่ 5.2 รายละเอียดตำแหน่งของ HEPA (หน่วยเป็น m)



รูปที่ 5.3 รายละเอียดตำแหน่งของแผงหลอดไฟ (หน่วยเป็น m)



รูปที่ 5.4 รายละเอียดตำแหน่งของช่องลม ช่องลมกลับ โต๊ะปฏิบัติงาน และ Laminar Flow Hood (หน่วยเป็น m)



รูปที่ 5.5 รายละเอียดตำแหน่งของช่องลม ช่องลมกลับ โต้ะปฏิบัติงาน และ Laminar Flow Hood (หน่วยเป็น m) (ต่อ)

ตารางที่ 5.1 ขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องสะอาด

อุปกรณ์	ขนาด		
	x (m)	y (m)	z (m)
โต้ะปฏิบัติงาน	5.49	0.72	1.65
แผงหลอดไฟ	1.19	-	0.57
ช่องลม	-	0.23	0.23
ช่องลมกลับ	0.75	0.49	-
HEPA	1.19	-	0.57
Laminar Flow Hood	5.49	0.57	1.65

5.2 เงื่อนไขขอบเขตของสภาวะแวดล้อมของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในห้องสะอาด

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของความเร็ว เอนทาลปี และเศษส่วนมวลของไอน้ำ โดยเอนทาลปีสามารถคำนวณได้จากค่าของอุณหภูมิ ส่วนเศษส่วนมวลของไอน้ำสามารถคำนวณได้จากค่าของความชื้นสัมพัทธ์ เป็นไปตามข้อมูลการวัดของ ปรามิโทย์ สิงห์ทอง, พัชรินทร์ จินดาหลวง, มลธิลา สุภากรณ์ และ เศรษฐกิจ ป่วงกลาง (2546) ส่วนเงื่อนไขขอบเขตของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยแสดงในหัวข้อ 5.5

5.2.1 โต้ะปฏิบัติงาน

เลือกใช้เทคนิคการกันค่าในการจำลองโต้ะปฏิบัติงานให้เป็นสิ่งกีดขวางการไหล โดยกำหนดให้จุดต่อภายในโดเมนของโต้ะปฏิบัติงานมีอุณหภูมิ 20 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 64 % ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากข้อมูลการวัด

5.2.2 แผงหลอดไฟ

กำหนดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนขนาด 200 W

5.2.3 ช่องลม

กำหนดประเภทของเงื่อนไขขอบเขตของช่องลมเป็นแบบทางเข้า ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลการวัด

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขขอบเขตของสภาวะแวดล้อมของช่องลม

ลำดับของช่องลม	สภาวะแวดล้อม				
	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)	T (°C)	φ (%)
1	5.20	-1.21	1.22	21.0	63.1
2	2.76	-0.83	0.95	20.8	63.6

5.2.4 ช่องลมกลับ

กำหนดประเภทของเงื่อนไขขอบเขตของช่องลมกลับเป็นแบบทางออก

5.2.5 HEPA

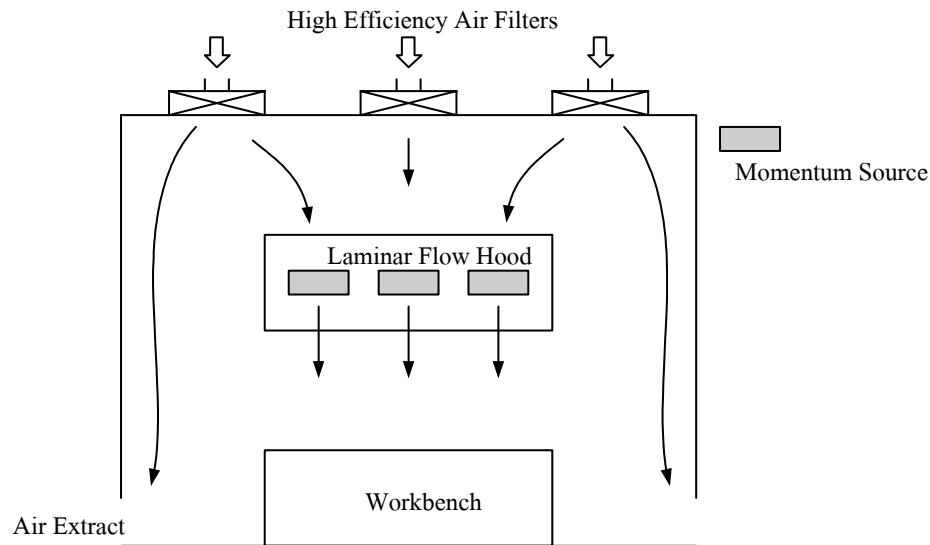
กำหนดประเภทของเงื่อนไขขอบเขตของ HEPA เป็นแบบทางเข้า ความเร็วถูกกำหนดให้มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของ HEPA รายละเอียดแสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลการวัด

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขขอบเขตของสภาวะแวดล้อมของ HEPA

ลำดับของ HEPA	สภาวะแวดล้อม		
	v (m/s)	T (°C)	φ (%)
1	-0.85	18.8	65.5
2	-1.23	19.3	65.7
3	-0.82	19.3	66.1
4	-1.14	19.3	65.4
5	-1.08	18.9	65.3
6	-0.99	19.3	65.3
7	-0.96	19.1	65.3
8	-0.95	19.0	64.6
9	-1.00	19.4	63.8
10	-1.04	19.4	64.0
11	-1.01	19.4	64.0
12	-0.81	19.5	63.2
13	-0.97	19.5	63.3

5.2.6 Laminar Flow Hood

การทำงานของ Laminar Flow Hood ถูกจำลองโดยการใช้นิเทศการกันค่าร่วมกับการใช้แหล่งกำเนิดโมเมนตัม ในส่วนที่เป็นผนังของ Laminar Flow Hood ถูกจำลองด้วยเทคนิคการกันค่า และส่วนของพัดลมที่ใช้ในการสร้างการไหลแบบราบเรียบถูกจำลองโดยการใช้นิเทศการกันค่า โมเมนตัมขนาด 3.69 N/m^3 หลักการทำงานของ Laminar Flow Hood แสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งหน้าที่ของ Laminar Flow Hood คือการทำให้การไหลของอากาศมีความสม่ำเสมอและราบเรียบ นอกจากนี้ Laminar Flow Hood ยังมีการติดตั้งแผ่นกรองฝุ่นละอองเพื่อใช้รักษาระดับความสะอาดในส่วนองพื้นที่ปฏิบัติงานอีกด้วย



รูปที่ 5.6 หลักการทำงานของ Laminar Flow Hood

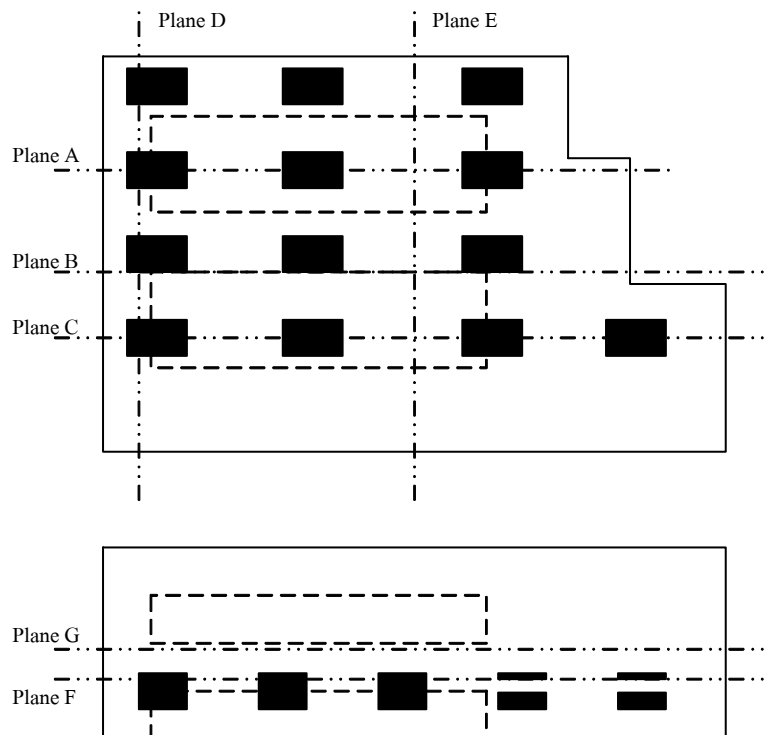
5.3 พฤติกรรมของการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ได้แสดงผลการคำนวณในรูปของเวกเตอร์ความเร็วที่ตำแหน่งของระนาบต่างๆ ภายในห้องสะอาด ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ด้วยโปรแกรมแสดงผลการคำนวณ SCView ซึ่งถูกพัฒนาโดยภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน เวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบต่างๆ ภายในห้องสะอาดแสดงในรูปที่ 5.8-5.14 จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่แสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็วที่แสดงในรูปที่ 5.8-5.10 พบว่าการไหลของอากาศหลังจากออกจาก HEPA บริเวณใกล้กับผนังด้านทิศตะวันออกจะเกิดการไหลหมุนวนของอากาศที่บริเวณใกล้กับเพดานของห้องสะอาด อันเนื่องมาจากอิทธิพลของการไหลของอากาศที่ออกมาจาก Laminar Flow Hood ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศที่ออกจาก HEPA จนกลายเป็นการไหลหมุนวนที่บริเวณดังกล่าวในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งของการไหลหมุนวนดังกล่าวจะลดความสูงลง เมื่อระนาบที่พิจารณาอยู่ใกล้กับบริเวณช่องลมกลับ ในรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าขนาดของความเร็วที่ออกจาก Laminar Flow Hood มีขนาดที่ไม่มากเกินไปจนทำให้อากาศกระทบกับโต๊ะปฏิบัติงานแล้วเกิดการหมุนวนขึ้นบนโต๊ะปฏิบัติงาน

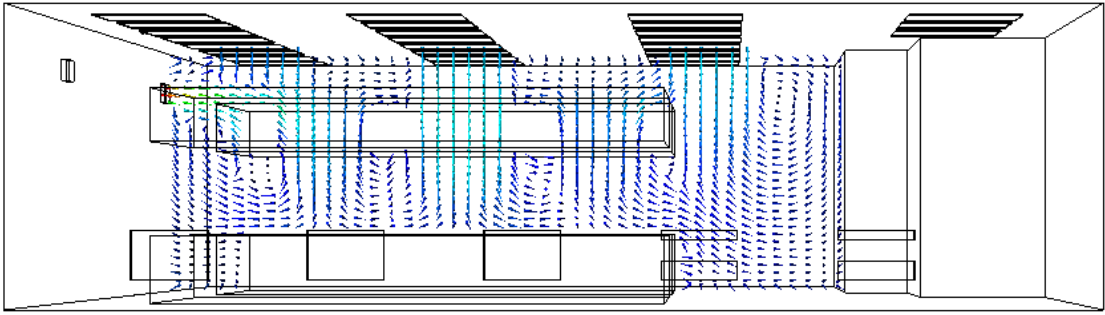
พิจารณาผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ในรูปที่ 5.11-5.12 พบว่าพื้นที่ในการปฏิบัติงาน บริเวณใกล้กับช่องลมกลับ การไหลของอากาศที่ออกมาจาก Laminar Flow Hood สามารถระบายออกสู่ช่องลมกลับได้เป็นอย่างดี ตรงกันข้ามกับพื้นที่ในการปฏิบัติงานบริเวณ ใกล้กับผนังที่ไม่มีติดตั้งช่องลมกลับ การไหลของอากาศส่วนหนึ่งหลังจากออกจาก Laminar Flow Hood จะเคลื่อนที่ไปยังผนังด้านตรงข้ามกับช่องลมกลับ แล้วเคลื่อนที่ต่อไปทางด้านบนของ Laminar Flow Hood และถูก

ดูดเข้าไปยัง Laminar Flow Hood ในที่สุด ซึ่งทำให้อากาศใหม่ที่ออกมาจาก HEPA ไม่สามารถเข้าไปแทนที่อากาศบริเวณดังกล่าวได้ ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของแผ่นกรองฝุ่นละอองที่ติดตั้งอยู่ใน Laminar Flow Hood ต้องทำหน้าที่กรองฝุ่นละอองที่มาจากการทำงานของ Laminar Flow Hood อยู่ตลอดเวลา

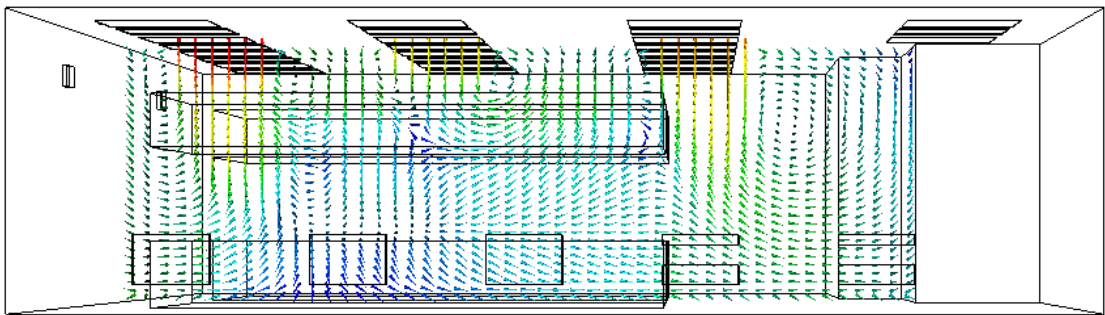
การกระจายของอากาศที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m ซึ่งเป็นระนาบของการปฏิบัติงานดังแสดงในรูปที่ 5.13 และการกระจายตัวของอากาศที่ระนาบสูงจากพื้น 1.5 m ดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่าอากาศมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ และเกิดบริเวณที่มีการไหลหมุนวนของอากาศ ตามมุมห้องด้านทิศตะวันออกที่มีการเว้าของรูปร่างห้องเพียงเล็กน้อย การไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ภายในห้องสะอาดไม่เป็นที่พึงประสงค์ของการออกแบบห้องสะอาด เนื่องจากการไหลหมุนวนจะทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองหรืออนุภาคแขวนลอยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานภายในห้องสะอาด



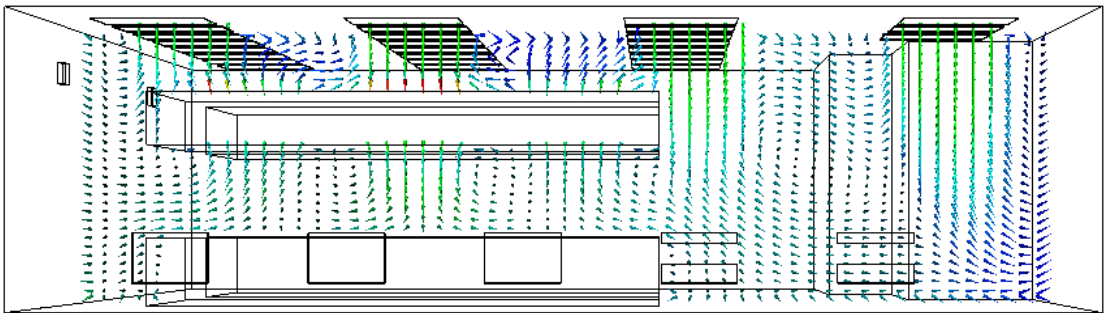
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของระนาบที่ใช้ในการพิจารณาเวกเตอร์ความเร็ว



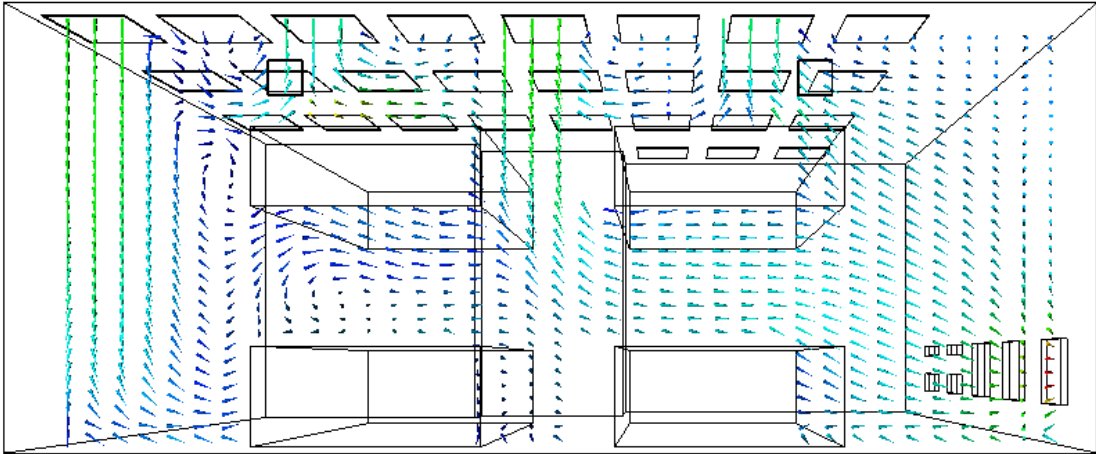
รูปที่ 5.8 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane A ($z = 1.9$ m)



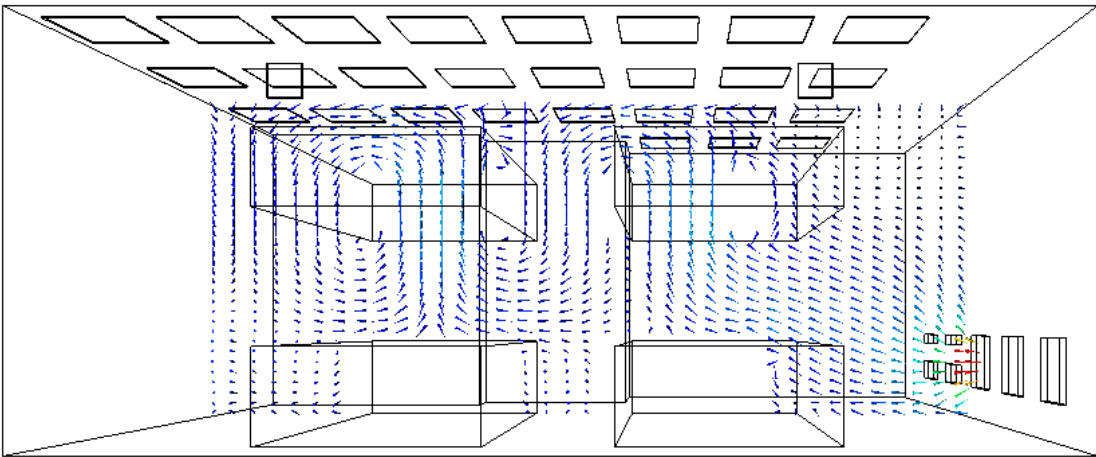
รูปที่ 5.9 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane B ($z = 3.7$ m)



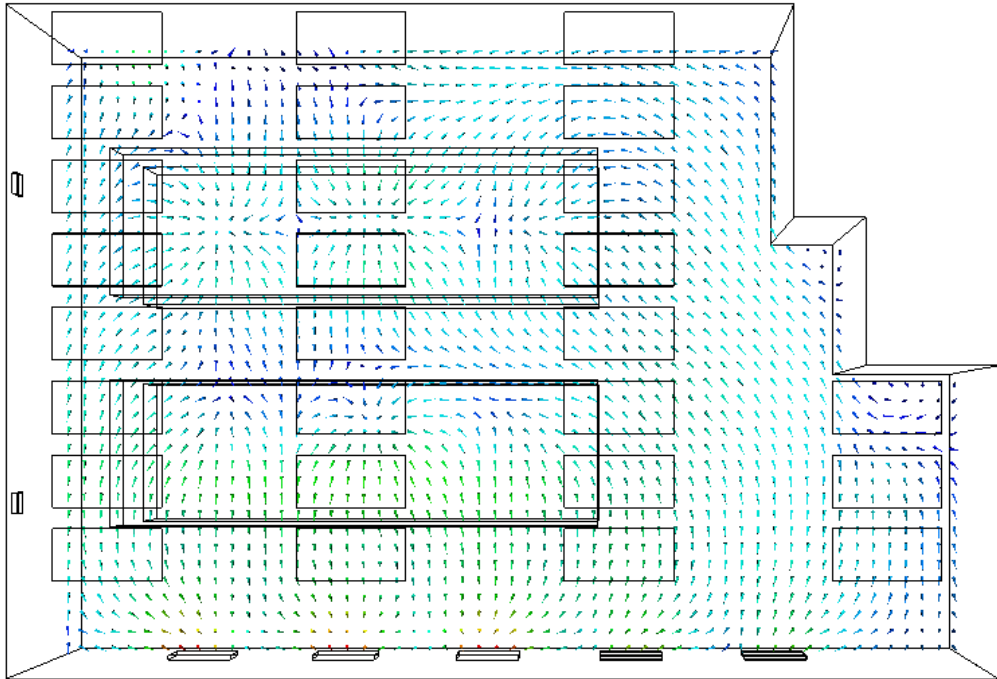
รูปที่ 5.10 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane C ($z = 5$ m)



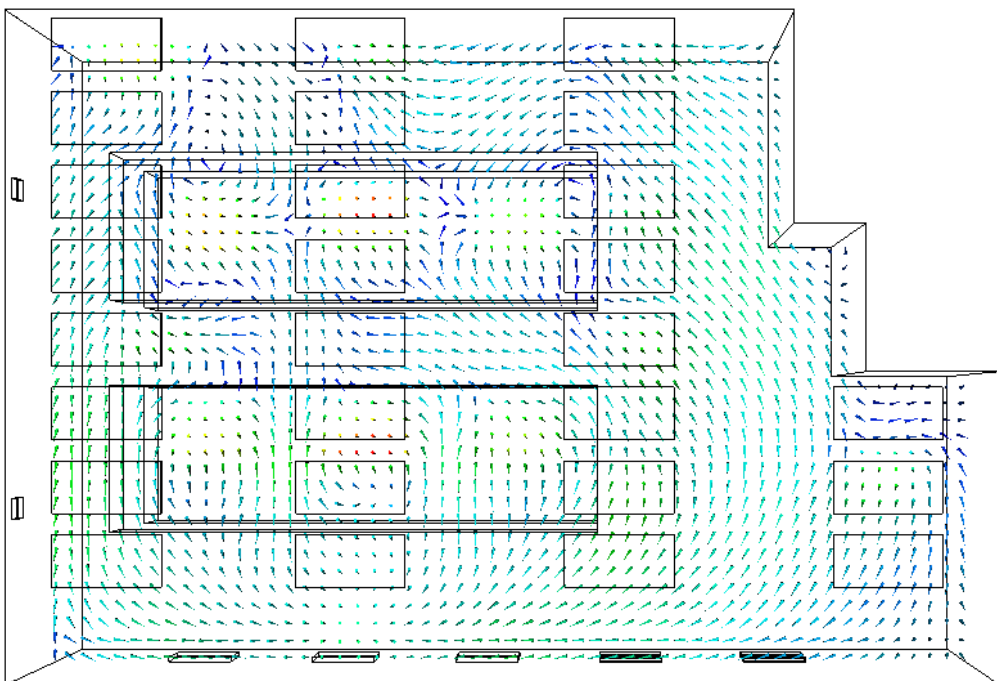
รูปที่ 5.11 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane D ($x = 1.1$ m)



รูปที่ 5.12 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane E ($x = 5.4$ m)



รูปที่ 5.13 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane F ($y = 1$ m)



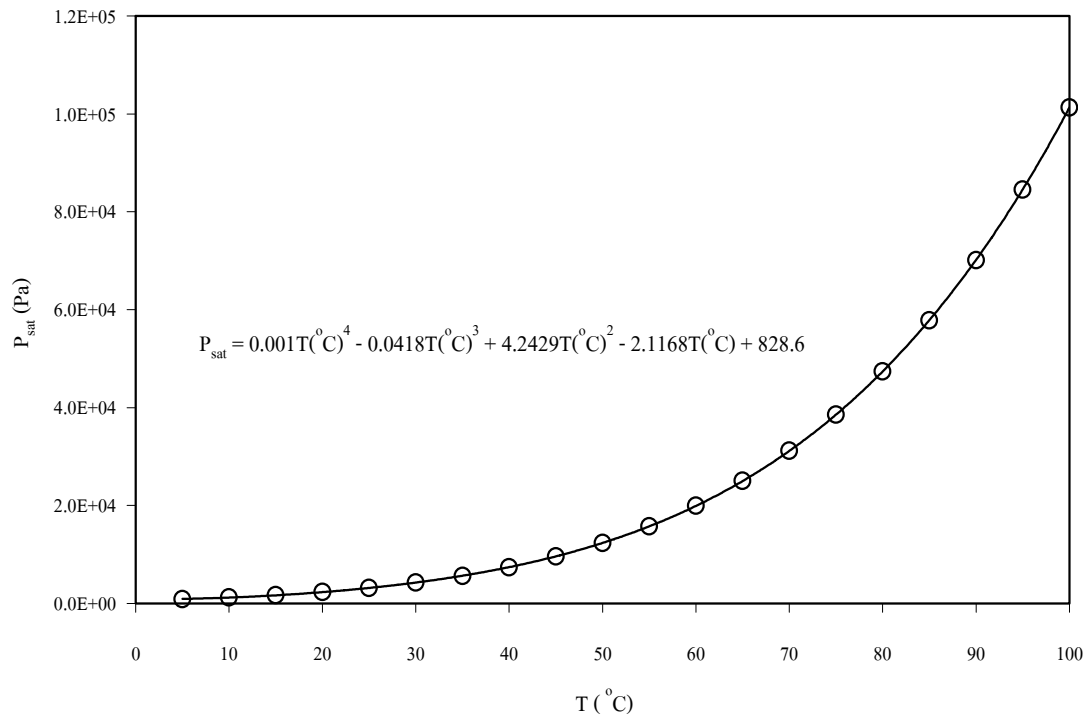
รูปที่ 5.14 เวกเตอร์ความเร็วที่ Plane G ($y = 1.5$ m)

5.4 พฤติกรรมของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องสะอาด

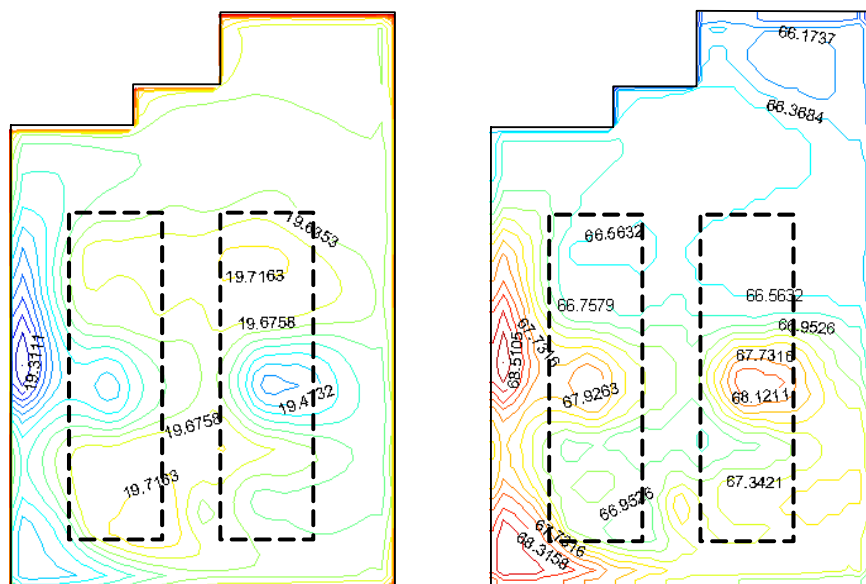
ในขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมของความชื้นนั้น ได้กำหนดให้อากาศเป็นก๊าซอุดมคติที่ประกอบด้วย 2 พันธุมวลคือ อากาศแห้งและไอน้ำ คุณสมบัติของไอน้ำไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่น ความหนืด ความร้อนจำเพาะ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของอากาศตามกฎหมายของก๊าซผสมทางอุดมคติ พิจารณาว่าภายในห้องสะอาดไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างอากาศแห้งและไอน้ำ และไม่มีอุปกรณ์ใดที่สามารถสร้างและทำลายปริมาณของไอน้ำในอากาศได้ ตัวอย่างเช่น ปริมาณไอน้ำที่ปลดปล่อยมาจากผู้ปฏิบัติงานหรือมาจากการทำอาหาร เป็นต้น ความชื้นที่พิจารณาในที่นี้เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้หลังจากการแก้สมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ เงื่อนไขขอบเขตของเศษส่วนมวลของไอน้ำที่ HEPA และช่องลมสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดของ ปรารโมทย์ สิงห์ทอง และคนอื่นๆ (2546) ส่วนผนังและช่องลมกลับกำหนดเงื่อนไขเป็นการเปลี่ยนแปลงของเศษส่วนมวลของไอน้ำในทิศทางตั้งฉากกับผนังดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ การศึกษาการจำลองพฤติกรรมของอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องสะอาดในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดช่วงของอุณหภูมิไว้ที่ 5°C - 100°C เพื่อนำข้อมูลของความดันอิมตัวของไอน้ำในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิมตัวของไอน้ำกับอุณหภูมิ ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิมตัวของไอน้ำและอุณหภูมิเป็นแบบสมการพหุนามอันดับ 4 ดังแสดงในสมการ (5.1) รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอิมตัวของไอน้ำกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 5°C - 100°C

$$P_{\text{sat}} \text{ (Pa)} = 0.001T(^{\circ}\text{C})^4 - 0.0418T(^{\circ}\text{C})^3 + 4.2429T(^{\circ}\text{C})^2 - 2.1168T(^{\circ}\text{C}) + 828.6 \quad (5.1)$$

พิจารณาผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ในรูปของการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m ดังแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่าอุณหภูมิภายในห้องสะอาดมีค่าอยู่ในช่วง 19°C - 20°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิควบคุมปกติภายในห้องสะอาดที่มีค่า $22 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ตามคำแนะนำของ สุรพล พุกษพานิช (2546) ส่วนปริมาณของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 66 %-69 % ซึ่งสูงกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ปกติที่ต้องควบคุมภายในห้องสะอาดที่มีค่า 50 ± 2.5 % ตามคำแนะนำของ สุรพล พุกษพานิช (2546) อิทธิพลของอากาศเย็นที่ออกมาจาก HEPA ทำให้พื้นที่บริเวณใต้ HEPA มีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในห้องสะอาด

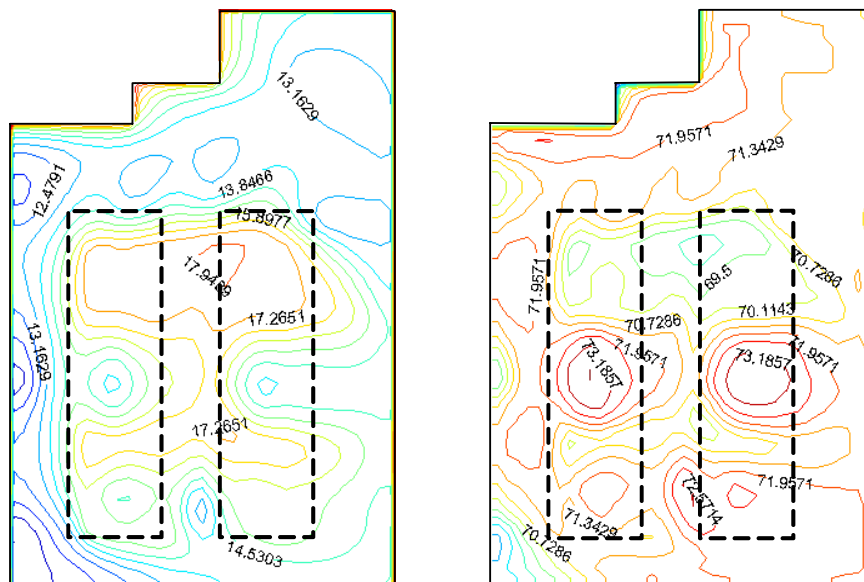


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันอิ่มตัวของไอน้ำในช่วง 5°C - 100°C

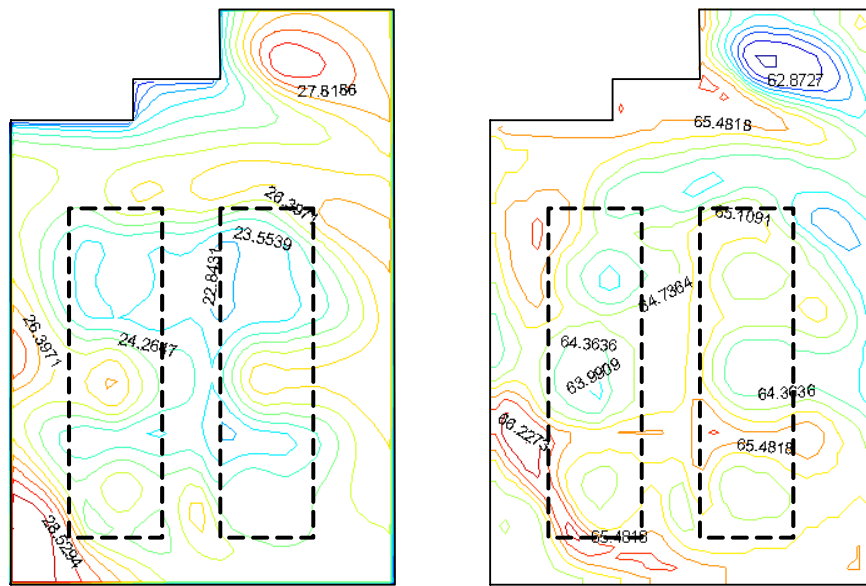


รูปที่ 5.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m

ผลการศึกษาระบายตัวของอากาศในกรณีที่อุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจาก HEPA มีการเปลี่ยนแปลงพบว่า หากอุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจาก HEPA มีอุณหภูมิ 10°C ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิควบคุมปกติ อุณหภูมิบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในห้อง โดยความชื้นสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 73 % การปฏิบัติงานในสภาวะแวดล้อมเช่นนี้มีความไม่เหมาะสมเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิตที่มีส่วนประกอบของชิ้นงานเป็น โลหะ เนื่องจากทำให้มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดสนิมบนชิ้นงาน สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจาก HEPA มีอุณหภูมิ 30°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิควบคุมปกติ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ ภายในห้อง โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าประมาณ 24°C และ 65 % ตามลำดับ รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณีที่อุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 10°C และ 30°C ตามลำดับ

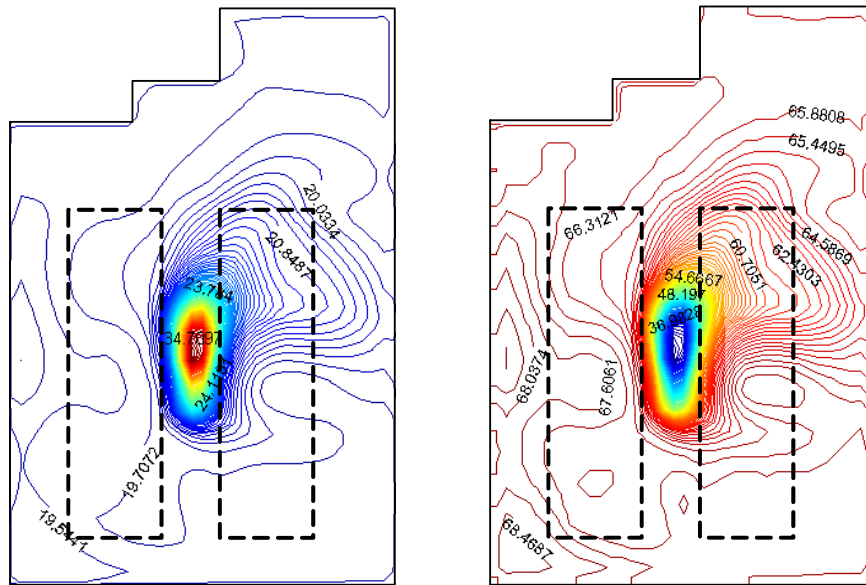


รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 10°C



รูปที่ 5.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 30°C

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อน เพื่อใช้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในกรณีที่อยู่ในห้องสะอาดมีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งผลิตความร้อน โดยแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการศึกษามีขนาด 10 kW ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์จำนวน 35 เครื่องตามข้อมูลงานวิจัยของ Zhzo, Li, and Yan (2003) ติดตั้งไว้บริเวณกลางห้องสะอาด ผลจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนนั้น ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดความร้อนมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 35°C และ 39 % ตามลำดับ ช่องลมกลับจะทำหน้าที่ระบายอากาศที่มีอุณหภูมิสูง อันเนื่องมาจากการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนออกจากห้องสะอาด ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณช่องลมกลับมีอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 5.19

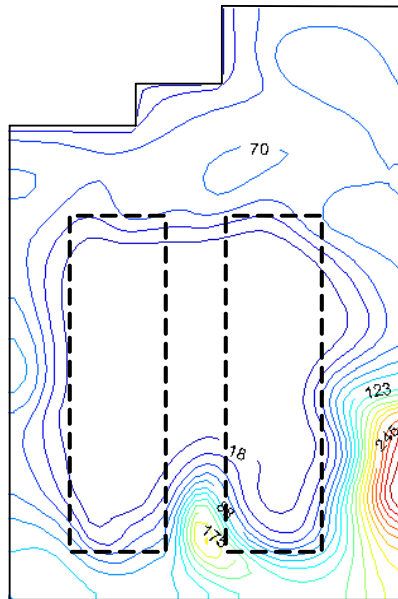


รูปที่ 5.19 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และความชื้นสัมพัทธ์ (%) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m กรณีมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนไว้บริเวณกลางห้องสะอาด โดยอุณหภูมิที่ออกมาจาก HEPA มีค่า 20°C

5.5 พฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

จากการวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด พบว่าอนุภาคของฝุ่นละอองไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ของอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดจึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองที่ถูกกระทำโดยการใช้ของอากาศ พฤติกรรมของฝุ่นละอองถูกศึกษาผ่านสมการการขนถ่ายของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่แสดงถึงจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยในปริมาตร 1 m^3 เงื่อนไขขอบเขตของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ HEPA สามารถคำนวณได้โดยการพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกรองฝุ่นละอองของ HEPA ที่มีค่า 99.97% และห้องสะอาดที่พิจารณามีระดับความสะอาด Class 10,000 ซึ่งมีการกำหนดจำนวนอนุภาคขนาด $0.5 \mu\text{m}$ ไม่เกิน 353,000 อนุภาคในปริมาตร 1 m^3 ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ HEPA มีค่า $106 \text{ Particles/m}^3$ สำหรับระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ช่องลมนั้นพิจารณาจากผนังของช่องลมอยู่ติดกับห้องสะอาด Class 100 จึงได้กำหนดระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ช่องลมมีค่า $3,530 \text{ Particles/m}^3$ นอกจากนี้ยังได้พิจารณาการกรองฝุ่นละอองของแผ่นกรองฝุ่นละอองที่ติดตั้งภายใน Laminar Flow Hood ด้วยเทอมที่ก่อให้เกิดการสูญเสียเพื่อให้สามารถรักษาระดับความสะอาด Class 100 ในบริเวณพื้นที่การปฏิบัติงาน ผลการคำนวณเชิงตัวเลข

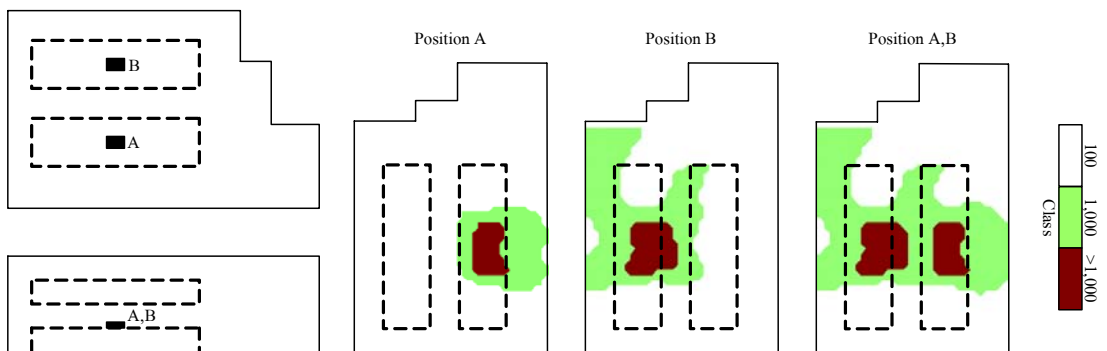
ที่ได้แสดงการกระจายตัวของระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ยที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m ดังรูปที่ 5.20 ซึ่งพบว่าปริมาณฝุ่นละอองจำนวนมากที่มาจากช่องลมสามารถระบายออกจากห้องสะอาดได้เป็นอย่างดีด้วยช่องลมกลับตำแหน่งที่ 6 และ 7 และพบว่าบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood มีปริมาณฝุ่นละอองน้อยมาก



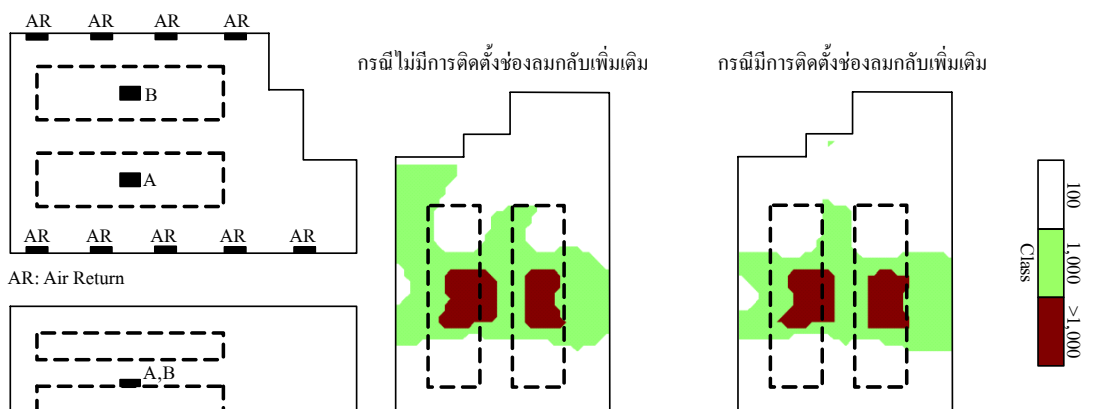
รูปที่ 5.20 การกระจายตัวของความเข้มข้นของฝุ่นละออง (Particles/m³) ที่ระนาบสูงจากพื้น 1 m

หลังจากการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่มาจาก HEPA และช่องลม ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองที่เกิดจากการปฏิบัติงานในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ซึ่งถูกจำลองด้วยแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง ตามข้อมูลงานวิจัยของ Rouaud and Havet (2005) เป็นปริมาณฝุ่นละอองที่สอดคล้องกับปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการผลิตภายในห้องสะอาดมีขนาด 10⁷ Particle/s โดยได้ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองจำนวน 1 ตำแหน่งและ 2 ตำแหน่งที่เปรียบเสมือนมีกระบวนการผลิตภายในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood จำนวน 1 บริเวณ และ 2 บริเวณ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.21 สำหรับกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง 1 ตำแหน่งในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ที่ใกล้กับช่องลมกลับ พบว่าฝุ่นละอองที่ปลดปล่อยมาจากแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองสามารถระบายออกจากห้องสะอาดได้เป็นอย่างดีด้วยช่องลมกลับตำแหน่งที่ 6 และ 7 ทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ภายในห้องมีปริมาณฝุ่นละอองอยู่ในระดับความสะอาด Class 100 แต่สำหรับกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองอยู่ในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ที่ใกล้กับผนังที่ไม่มีการติดตั้งช่องลมกลับ พบว่าฝุ่นละอองที่ปลดปล่อยมาจากกระบวนการ

ผลิตในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ใกล้กับผนังที่ไม่มี การติดตั้งช่องลมกลับจะแพร่กระจายเป็นบริเวณกว้าง เนื่องจากผลของรูปแบบการไหลในบริเวณดังกล่าวที่มีลักษณะการไหลของอากาศส่วนหนึ่งเมื่อออกจาก Laminar Flow Hood แล้วไม่ได้เคลื่อนที่ไปยังช่องลมกลับแต่กลับถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าไปยัง Laminar Flow Hood ทางด้านบนด้วยอิทธิพลของแหล่งกำเนิดโมเมนตัมภายใน Laminar Flow Hood ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5.12 ทำให้ฝุ่นละอองในบริเวณดังกล่าวถูกระบายออกได้ยาก ส่วนอากาศที่ไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปใน Laminar Flow Hood จะใช้เวลานานในการเคลื่อนที่ไปยังช่องลมกลับเนื่องจากระยะทางที่ไกล ส่งผลให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 ภายในห้องสะอาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด วิธีการที่จะช่วยลดปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานได้ Laminar Flow Hood ในบริเวณดังกล่าวสามารถทำได้โดยการติดตั้งช่องลมกลับเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ซึ่งพบว่าพื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 มีพื้นที่เพิ่มขึ้น 20 %



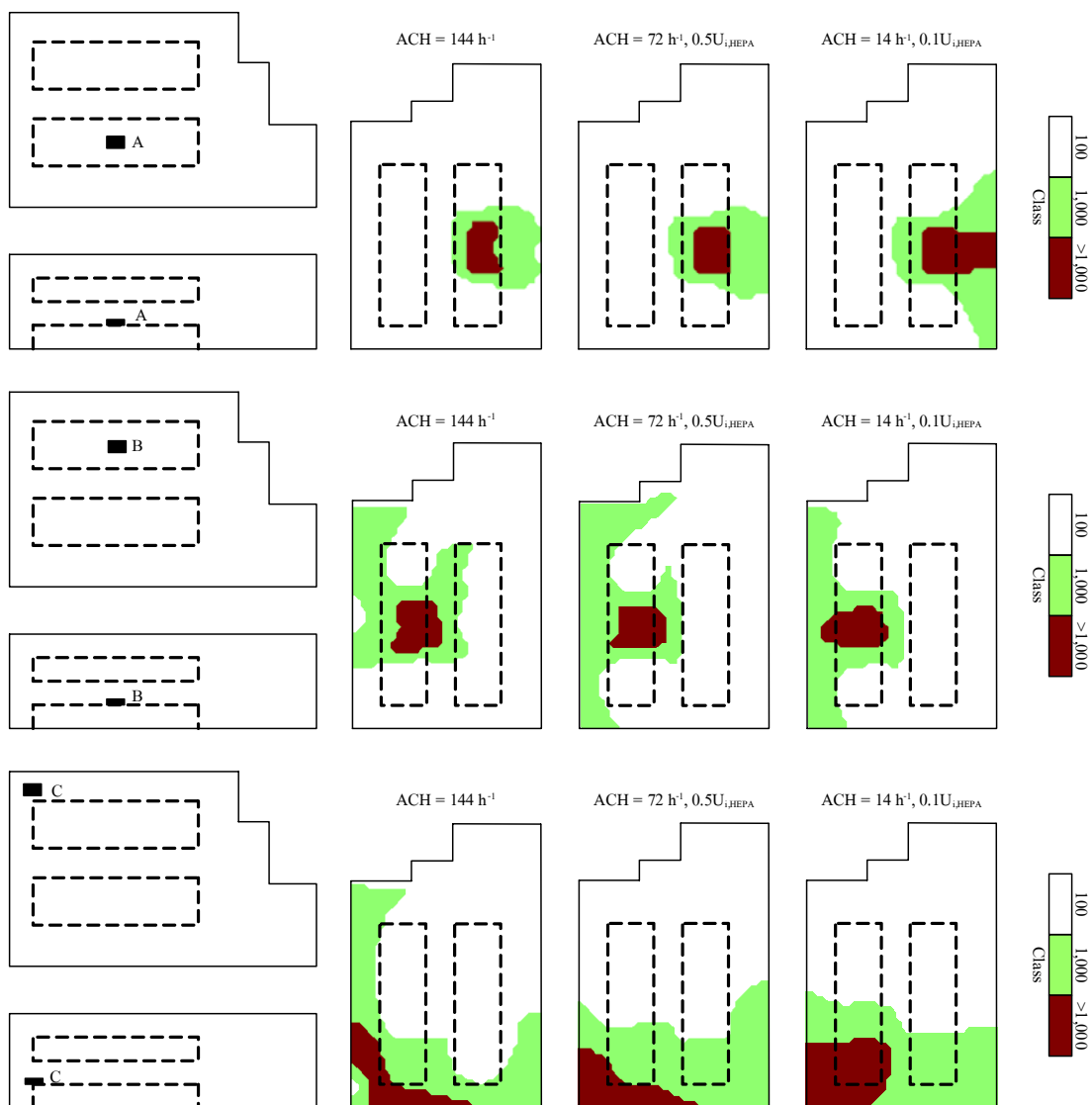
รูปที่ 5.21 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองและระดับความสะอาดที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m



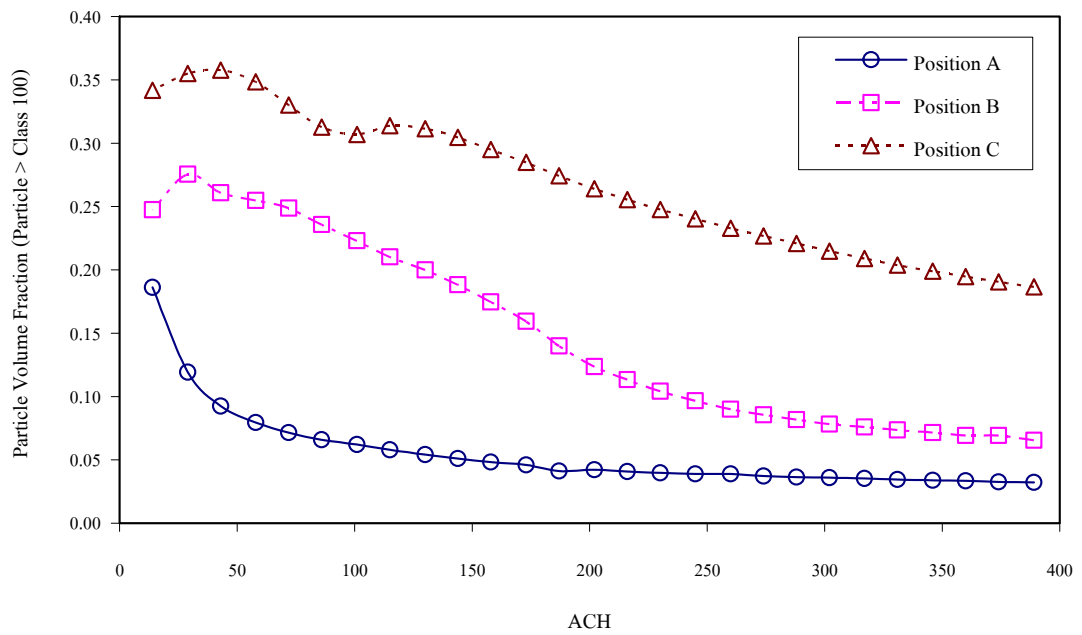
รูปที่ 5.22 การติดตั้งช่องลมกลับเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการระบายฝุ่นละอองออกจากห้องสะอาด

5.6 ผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด

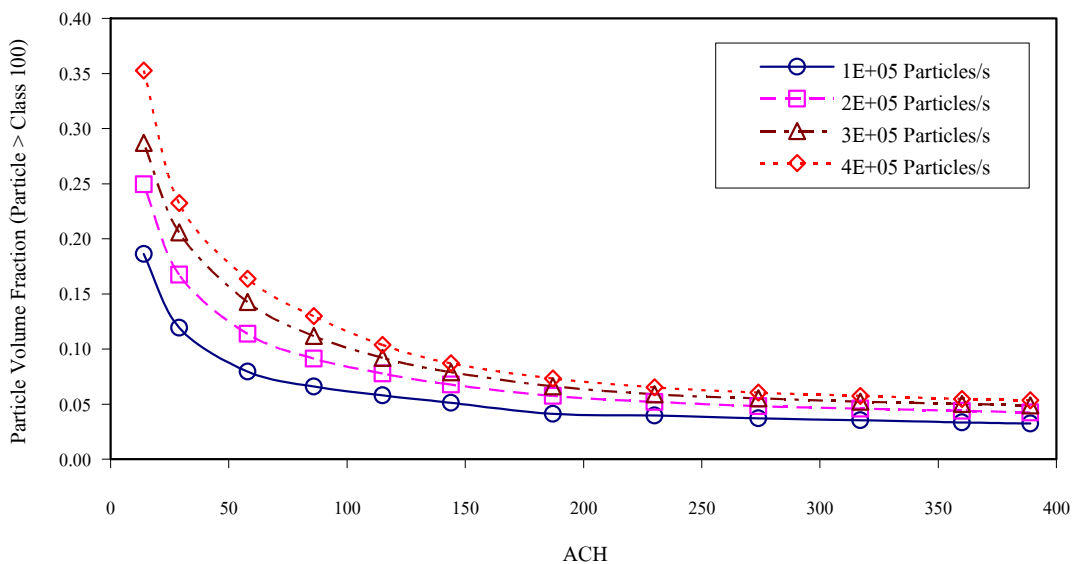
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลกระทบของ ACH ที่มีต่อการควบคุมระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่า ACH ที่เหมาะสมต่อการปฏิบัติงานภายในห้องสะอาด ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ACH กับปริมาณฝุ่นละอองที่แสดงอยู่ในรูปของเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองที่มีระดับความสะอาดมากกว่า Class 100 โดยพิจารณาบริเวณที่มีการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง 3 บริเวณด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และ 5.24 ซึ่งขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่ใช้พิจารณามีขนาด 10^7 Particles/s จากผลการคำนวณที่ได้พบว่าระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง การติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองไว้ในบริเวณที่อากาศไม่สามารถถ่ายเทได้สะดวกจะทำให้การควบคุมระดับความสะอาดเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณ ACH ก็ไม่แน่ว่าจะสามารถช่วยรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาดได้มากขึ้น การเพิ่มปริมาณ ACH โดยปราศจากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมแล้วอาจจะทำให้เกิดความสับสนเปลืองของต้นทุนในการผลิต ซึ่งการจะหาค่าปริมาณ ACH ที่เหมาะสมจำเป็นต้องทำการหาค่าตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองหรือเปรียบเสมือนกับการหาบริเวณที่จะใช้ในการปฏิบัติงานให้ได้เสียก่อน ดังห้องสะอาดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปฏิบัติงานมากที่สุดคือบริเวณตำแหน่ง A และปริมาณ ACH ที่เหมาะสมต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องควรอยู่ที่ 150 h^{-1} ปริมาณ ACH ที่ต่ำกว่า 50 h^{-1} จะทำให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด โดยเลือกติดตั้งแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองไว้ที่ตำแหน่ง A ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 5.25 ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของฝุ่นละอองมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือพื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 จะลดลงอย่างรวดเร็วที่ปริมาณ ACH ค่าหนึ่ง และปริมาณ ACH ที่มากกว่า 150 h^{-1} จะทำให้พื้นที่ที่มีระดับความสะอาด Class 100 มีค่าค่อนข้างคงที่



รูปที่ 5.23 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฝุ่นละออง และระดับความสะอาดที่ระนาบความสูง 1 m ที่ ปริมาณ ACH = 144 h⁻¹, 72 h⁻¹ และ 14 h⁻¹



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง ACH กับ เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองที่มีระดับความสะอาดมากกว่า Class 100



รูปที่ 5.25 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่มีต่อระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยโดยสรุปและข้อเสนอแนะในการดำเนินการทำวิจัยต่อไป หัวข้อ 6.1 กล่าวถึงผลสรุปของการวิจัย ได้แก่ กรรมวิธีต่างๆ ที่นำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและผลของการศึกษาพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด หัวข้อ 6.2 กล่าวถึงข้อเสนอแนะในการดำเนินการทำวิจัยต่อไปเพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงขึ้นในการศึกษาพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อมภายในห้องสะอาด

6.1 สรุปผลการวิจัย

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกพัฒนาขึ้นบนภาษา Visual C++ พิจารณาการไหลเป็นแบบไม่อัดตัวที่สภาวะคงตัวและเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ เลือกใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัดร่วมกับระบบกริดแบบจตุรร่วม โดยตัวแปรทั้งหมดถูกเก็บไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันเพื่อลดความซับซ้อนของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เลือกใช้การแก้ปัญหาตามขั้นตอนวิธี SIMPLE ร่วมกับการประมาณในช่วงของ Rhie and Chow (1983) เพื่อป้องกันการไม่เกี่ยวพันกันของสนามความเร็วกับสนามความดัน เลือกใช้วิธีต้นลมอันดับหนึ่งเพื่อประมาณอิทธิพลของเทอมการพาในสมการควบคุม แบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ $k-\epsilon$ ถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมของความปั่นป่วนของการไหล โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปใช้ในการจำลองปัญหาการไหลพื้นฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ผลการตรวจสอบพบว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ ผลการทดลอง และผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่เป็นที่ยอมรับของปัญหาการไหลพื้นฐานเป็นอย่างดี

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาพฤติกรรมของสภาวะแวดล้อม ได้แก่ พฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้นและฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด SQE C/R ของบริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd. จ. นครราชสีมา พบว่าการไหลของอากาศที่ระนาบความสูงจากพื้น 1 m ซึ่งเป็นระนาบของการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตภายในห้องสะอาดมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง พบการไหลหมุนวนเป็นบริเวณเล็กน้อยตามมุมของห้อง การ

กระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ระนาบดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 19°C - 20°C และ 64 %-68 % ตามลำดับ ส่วนการศึกษาพฤติกรรมของฝุ่นละอองพบว่า หากมีการปฏิบัติงานในพื้นที่ใต้ Laminar Flow Hood ใกล้กับผนังของห้องที่ไม่มีการติดตั้งช่องลมกลับจะทำให้ฝุ่นละอองที่เกิดจากการปฏิบัติงานกระจายตัวออกเป็นบริเวณกว้าง และบางส่วนไม่สามารถระบายออกไปจากห้องสะอาดได้ ส่งผลเสียต่อการรักษาระดับความสะอาดภายในห้องสะอาด โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากผลการวิจัยในครั้งนี้ยังคงต้องมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถต่อไป แต่ประโยชน์ที่สำคัญจากผลการวิจัยครั้งนี้คือ ความรู้พื้นฐานที่เป็นหัวใจของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อการสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการในระยะยาว และแสดงให้เห็นว่าพลศาสตร์ของเชิงคำนวณนั้นมีความสามารถเพียงพอที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และการออกแบบทางวิศวกรรม

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปัญหาการไหลที่ใช้ในการวิจัยเป็นปัญหาการไหลในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ ดังนั้นปัญหาสำคัญที่พบคือปัญหาของหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่อย่างจำกัด ปัญหานี้ได้ส่งผลต่อการกำหนดจำนวนปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหล ซึ่งมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้และประสิทธิภาพในการจำลองความปั่นป่วนของแบบจำลองความปั่นป่วนเชิงเส้นเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ต่ำที่เลือกใช้ การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการคำนวณแบบขนาน (Parallel Computing) ร่วมกับเทคนิคการแบ่งโดเมนแบบหลายบล็อก (Multiblock Technique) เพื่อแบ่งโดเมนของปัญหาการไหลออกเป็นโดเมนย่อย ซึ่งจะช่วยให้สามารถกำหนดจำนวนปริมาตรควบคุมได้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการคำนวณเนื่องจากมีการแก้ปัญหของแต่ละโดเมนย่อยไปพร้อมกัน นอกจากนี้การใช้เทคนิคหลายบล็อกจะช่วยทำให้การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหามีความสะดวกและสมจริงมากขึ้น

การประเมินอิทธิพลของเทอมการพาในสมการควบคุมด้วยวิธีที่ให้ความถูกต้องมากกว่าวิธีต้นลมอันดับหนึ่ง เช่น วิธี SOU (Second Order Upwind) และ QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convection Kinematics) จะทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การนำวิธีการหลายระดับ (Multigrid) มาใช้ในการแก้ระบบสมการเชิงเส้นจะสามารถช่วยเร่งการลู่เข้าของผลการคำนวณได้

รายการอ้างอิง

- ก้อง อุทโยภาส. (2545). การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทวิช จิตรสมบูรณ์ และ สุวรรณ อรรธนาเมศร์. (ธันวาคม 2542). โมย่า: โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์การไหล. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 (เล่ม 1 หน้า 124-131). กรุงเทพมหานคร: วิวีจ พรีนติ้ง.
- บุญลือ สวัสดิ์มงคล. (2544). การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อจำลองการไหลแบบสองมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บุญลือ สวัสดิ์มงคล และ เอกชัย จันทสาโร. (พฤศจิกายน 2544). การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อจำลองการไหลแบบสองมิติ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 (เล่ม 1 หน้า 6-13). กรุงเทพมหานคร.
- ปราโมทย์ สิงห์ทอง, พัทธินันท์ จินดาหลวง, มลธิดา สุภาภรณ์ และ เศรษฐกิจ ป่วงกลาง. (2546). การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมทางกายภาพของห้องสะอาดขนาดเล็ก. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ภูคิด เกษสนิท, ขรรยง ปลิวไธสง และ ชัยวิวัฒน์ เกียรติรัมย์รงค์. (2545). การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมทางกายภาพของห้องสะอาดขนาดเล็ก. โครงการปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ยุทธนา พลอยฉาย. (2544). การทำนายนการไหลแบบปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนในห้องขนานที่มีกรีบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรพงศ์ พงศ์บุญชู. (2545). การศึกษาการหมุนเวียนของอากาศและการปรับอากาศในพื้นที่ปิดโดยใช้วิธีการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนไม่เชิงเส้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สอาด สุกฤษณ์. (2544). การประยุกต์ใช้วิธีการหลายระดับกับปัญหาการไหลแบบ 2 มิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุรพล พฤษพานิช. (2546). การออกแบบห้องสะอาด. ใน เอกสารการสัมมนาวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีและการออกแบบห้องสะอาด. สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.
- เอกชัย จันทสาโร, วรารัตน์ จันทสาโร และ กุชงค์ อุทัยภาส. (มีนาคม 2548). CFD software for airflow simulation in a clean room. ใน การประชุมประจำปี สวทช: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสู่เศรษฐกิจยุคโมเดล. ปทุมธานี: อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย.
- เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2546). การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17. ปราจีนบุรี.
- เอกรงค์ สุขจิต, จักรพงศ์ แก้วกล้า, จิระพล ศรีเสริฐผล และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2548). จำนวนและตำแหน่งของพัดลมเพื่อการระบายความร้อนที่เหมาะสมภายในกล่องคอมพิวเตอร์โดยใช้การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร.
- เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2548). การวิเคราะห์ระบบระบายอากาศแบบท่อดูดและแบบพัดลมเจ็ทภายในลานจอดรถชั้นใต้ดินด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. ภูเก็ต.
- เอกรงค์ สุขจิต, วรารัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2547). การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องสะอาด. บทความวิชาการ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย 9: 45-52.
- Ampofo, F., and Karayiannis, T.G. (2003). Experimental benchmark data for turbulent natural convection in an air filled square cavity. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 46: 3551-3572.
- Anderson, J. D. (1995). **Computational fluid dynamics: The basics with applications**. New York: McGraw-Hill.
- Awbi, H. B. (1998). Energy efficient room air distribution. **Renewable Energy** 15: 293-299.

- Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N. (2002). **Transport phenomena** (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Sons.
- Blay, D., Mergui, S., and Niculae, C. (1992). Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet. **ASME HTD 213: Fundamentals of Mixed Convection**: 65-72.
- Cengel, Y. A., and Boles, M. A. (1998). **Thermodynamics: An engineering approach** (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Cai, W. J., and Lee, E. L. (1999). Approaches for improving airflow uniformity in unidirectional flow cleanrooms. **Building and Environment** 34: 275-284.
- Chow, T. T., and Yang, X. Y. (2003). Performance of ventilation system in a non-standard operating room. **Building and Environment** 38: 1401-1411.
- Chow, W. K. (2001). Numerical studies of airflows induced by mechanical ventilation and air-conditioning (MVAC) systems. **Applied Energy** 68: 135-159.
- Chow, W. K., and Fung, W. Y. (1996). Numerical studies on the indoor air flow in the occupied zone of ventilated and air-conditioned space. **Building and Environment** 31: 319-344.
- Fluent Inc. (2001). **Fluent user's guide: Version 6.1**. United States of America: Fluent Inc.
- Gan, G. (1995). Numerical investigation of local thermal discomfort in offices with displacement ventilation. **Energy and Buildings** 23: 73-81.
- Gan, G. (1995). Evaluation of room air distribution systems using computational fluid dynamics. **Energy and Buildings** 23: 83-93.
- Gavrilakis, S. (1992). Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct. **Journal of Fluid Mechanics** 244: 101-129.
- Ghia, U., Ghia, K. N., and Shin, C. T. (1982). High-Re solution for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. **Journal of Computational Physics** 48:387-411.
- Gracia, J., and Crespo, A. (2000). A turbulent model for gas-particle jets. **Journal of Fluids Engineering** 122: 505-509.
- Heyerichs, K., and Pollard, A. (1996). Heat transfer in separated and impinging turbulent flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 39: 2385-2400.

- Hishida, K., Ando, A., and Maeda, M. (1992). Experiment on particle dispersion in a turbulent mixing layer. **International Journal of Multiphase Flow** 18: 181-194.
- Hoffman, J. D. (1992). **Numerical methods for engineers and scientists**. Singapore: McGraw-Hill.
- Hu, S. C., Chuah, Y. K., and Yen, M. C. (2002). Design and evaluation of a minienvironment for semiconductor manufacture processes. **Building and Environment** 37: 201-208.
- Iaccarino, G. (2001). Predictions of a turbulent separated flow using commercial CFD codes. **Journal of Fluids Engineering** 123: 819-828.
- Incropera, F. P., and De Witt, D. P. (1985). **Fundamentals of heat and mass transfer** (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Sons.
- Karki, K. C., Rosenbluth, E., Patankar, S. V., and Levy, S. (2000). CFD model for jet fan ventilation systems. In **Proceedings of the 10th Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels** (pp 355-380). BHR Group 2000 Vehicle Tunnels.
- Kays, W. M., and Crawford, M. E. (1993). **Convective heat and mass transfer** (3rd ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Kim, J., Moin, P., and Moser, R. (1987). Turbulent statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. **Journal of Fluid Mechanics** 177: 133-136.
- Lang, N. J., and Shin, T. H. (1991). **A critical comparison of two-equation turbulence models**. Ohio: ICOMP. (NASA Technical Memorandum 105237).
- Lauder, B. E., and Sharma, B. I. (1974). Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in Heat and Mass Transfer** 1: 131-138.
- Patankar, S. V. (1980). **Numerical heat transfer and fluid flow**. United States of America: Hemisphere.
- Peng, S. H., and Davidson, L. (1999). Computational of turbulent buoyancy flows in enclosed with low-Reynolds-number $k-\omega$ model. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 20: 172-184.
- Posner, J. D., Buchanan, C. R., and Dunn-Rankin, D. (2003). Measurement and prediction of indoor air flow in a model room. **Energy and Buildings** 35: 515-526.

- Prasad, A. K., and Koseff, J. R. (1989). Reynolds number and end-wall effects on a lid-driven cavity flow. **Physics of Fluids A** 1 (2): 208-218.
- Reddy, J. N., and Satake, A. (1980). A comparison of a penalty finite element model with the stream function-vorticity model of natural convection in enclosures. **Journal of Heat Transfer** 102: 659-666.
- Rhie, C. M., and Chow, W. L. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA Journal** 21 (11): 1525-1532.
- Rouaud, O., and Havet, M. (2002). Computation of the airflow in a pilot scale clean room using $k - \varepsilon$ turbulence models. **International Journal of Refrigeration** 25: 351-361.
- Rouaud, O., and Havet, M. (2005). Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts. **Journal of Food Engineering** 68: 163-174.
- Sinha, S. L., Arora, R. C., and Roy, S. (2000). Numerical simulation of two-dimensional room air flow with and without buoyancy. **Energy and Buildings** 32: 121-129.
- Sukjit, E., Juntasaro, V., Uthayopas, P., and Juntasaro E. (2003). Numerical simulation of turbulent flow in three-dimensional space. In **Proceedings of the 7th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Bangkok.
- Sukjit, E., Juntasaro, V., and Juntasaro E. (2004). Application of computational fluid dynamics for predicting a small clean room. In **Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Nakhon Ratchasima.
- Sulak, S., Sukjit, E., Juntasaro, V., and Juntasaro, E. (2004). Numerical prediction of natural convection in a square cavity. In **Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena**. Bangkok.
- Teodosiu, C., Hohota, R., Rusaouen, G., and Woloszyn, M. (2003). Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment. **Building and Environment** 38: 655-664.
- Varaksin, A. Y., Polezhaev, Y. V., and Polyakov, A. F. (2000). Effect of particle concentration of fluctuating velocity of the disperse phase for turbulent pipe flow. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 21: 562-567.

- Versteeg, H. K., and Malalasekera, W. (1995). **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. Malaysia: Longman Scientific & Technical.
- Wansophark, N., and Dechaumphai, P. (2003). Enhancement of segregated finite element method with adaptive meshing technique for viscous incompressible thermal flow analysis. **ScienceAsia** 29: 155-162.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., and Wilson, R. E. (1983). **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer** (3rd ed.). Wiley.
- White, F. M. (1999). **Fluid mechanics** (4th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Wilcox, D. C. (1993). **Turbulence modeling for CFD**. California: DCW.
- Xu, W., Chen, Q., and Nieuwstadt. (1998). A new turbulent model for near-wall natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 41: 3161-3176.
- Zhang, W., and Chen, Q. (2000). Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic subgrid scale model. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 43: 3219-3231.
- Zhao, B., Li, X., and Yan, Q. (2003). A simplified system for indoor airflow simulation. **Building and Environment** 38: 543-552.

ภาคผนวก ก

เทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียบนพิสัย 3 มิติ
ของสมการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1 สมการโมเมนต์ในแนวแกน x

$$\begin{aligned} S^u &= \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g_x \beta (T - T_r) + S_x \end{aligned}$$

ก.2 สมการโมเมนต์ในแนวแกน y

$$\begin{aligned} S^v &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g_y \beta (T - T_r) + S_y \end{aligned}$$

ก.3 สมการโมเมนต์ในแนวแกน z

$$\begin{aligned} S^w &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ &\quad - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\rho k) - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g_z \beta (T - T_r) + S_z \end{aligned}$$

ก.4 สมการพลังงาน

$$\begin{aligned}
 S^h = & -\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial x} \right] \\
 & -\frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial y} \right] \\
 & -\frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{k_T}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) T \frac{\partial C_p}{\partial z} \right] \\
 & + S_h
 \end{aligned}$$

ก.5 สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\begin{aligned}
 S^k = & \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\
 & - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \\
 & - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial w}{\partial z} \\
 & + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \\
 & + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\
 & + \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\
 & + \frac{\mu_t}{\sigma_T} g_x \beta \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} g_y \beta \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} g_z \beta \frac{\partial T}{\partial z} \\
 & - \rho \varepsilon - 2 \mu \left[\left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial z} \right)^2 \right] + S_k
 \end{aligned}$$

ก.6 สมการอัตราการผลิตเสียดทานของความร้อนจากความปั่นป่วน

$$S^e = -\rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$

$$+ C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{4}{3} \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \\ - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial w}{\partial z} \\ + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \\ + \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ + \mu_t \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 2 \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \mu_t \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ + C_{\varepsilon 3} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_T} g_x \beta \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} g_y \beta \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} g_z \beta \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{array} \right\}$$

$$+ 2 \mu_t \frac{\mu_t}{\rho} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z \partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial z} \right)^2 \end{array} \right\}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

การคำนวณเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองที่มีต่อการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด โดยฝุ่นละอองที่พิจารณามีขนาด 0.5 μm และการกำหนดจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองในระดับความสะอาดต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐาน Federal Standard 209E Airborne Particulate Cleanliness Classes (1999)

ข.1 การคำนวณเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด

การคำนวณเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด เริ่มจากการคำนวณหาปริมาตรของบริเวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ปริมาตรของห้องสะอาดที่ไม่มีสิ่งของใดๆ อยู่ภายในห้อง

$$\begin{aligned} &= [(10.81 \times 7.32) - (1.45 \times 1.61) - (0.78 \times 2.31)] \times 3 \\ &= 224.9787 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรของ Laminar Flow Hood จำนวน 2 เครื่อง

$$\begin{aligned} &= (5.49 \times 1.65 \times 0.57) \times 2 \\ &= 10.3266 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรของโต๊ะปฏิบัติงาน จำนวน 2 ตัว

$$\begin{aligned} &= (5.49 \times 1.65 \times 0.72) \times 2 \\ &= 13.0442 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรของที่วางภายในห้องสะอาด

$$\begin{aligned} &= 224.9787 - (10.3266 + 13.0442) \\ &= 201.6078 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรของพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood ซึ่งกำหนดให้มีระดับความสะอาด Class 100 จำนวน 2 บริเวณ

$$\begin{aligned} &= (5.49 \times 1.65 \times 1) \times 2 \\ &= 18.1170 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรในส่วนที่เหลือที่มีระดับความสะอาด Class 10,000

$$\begin{aligned} &= 201.6078 - 18.1170 \\ &= 183.4908 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากการหาปริมาตรของพื้นที่ในส่วนการปฏิบัติงานที่มีระดับความสะอาด Class 100 และ ปริมาตรในส่วนที่ไม่ใช่พื้นที่ปฏิบัติงานที่มีระดับความสะอาด Class 10,000 ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองในบริเวณทั้งสอง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{จำนวนฝุ่นละอองในพื้นที่ปฏิบัติงานใต้ Laminar Flow Hood จำนวน 2 บริเวณ} \\ & = 3,530 \times 18.1170 \\ & = 63,953 \text{ อนุภาค} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{จำนวนฝุ่นละอองในส่วนที่ไม่ใช่พื้นที่ปฏิบัติงาน} \\ & = 353,000 \times 183.4908 \\ & = 64,772,252 \text{ อนุภาค} \end{aligned}$$

การคำนวณหาจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองในลักษณะนี้ เป็นการพิจารณาจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองที่สามารถมีได้มากที่สุดภายในห้องสะอาด ภายใต้เงื่อนไขในการทำงานของห้องสะอาดที่เป็นกรณีศึกษา โดยขนาดของฝุ่นละอองที่พิจารณามีขนาด $0.5 \mu\text{m}$ หากสมมติให้อนุภาคของฝุ่นละอองมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังนั้นปริมาตรของฝุ่นละอองจำนวน 1 อนุภาคจึงมีค่าเท่ากับ $6.5450 \times 10^{-20} \text{ m}^3$ และสามารถคำนวณหาปริมาตรของฝุ่นละอองทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{ปริมาตรของฝุ่นละอองทั้งหมดภายในห้องสะอาด} \\ & = 6.5450 \times 10^{-20} \times (63,953 + 64,772,252) \\ & = 4.2435 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรของฝุ่นละอองทั้งหมดสามารถนำไปหาเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละออง ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของฝุ่นละอองทั้งหมดกับปริมาตรของที่ว่างทั้งหมดภายในห้องสะอาด

$$\begin{aligned} & \text{เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละออง} \\ & = 4.2435 \times 10^{-12} / 201.6078 \\ & = 2.1048 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

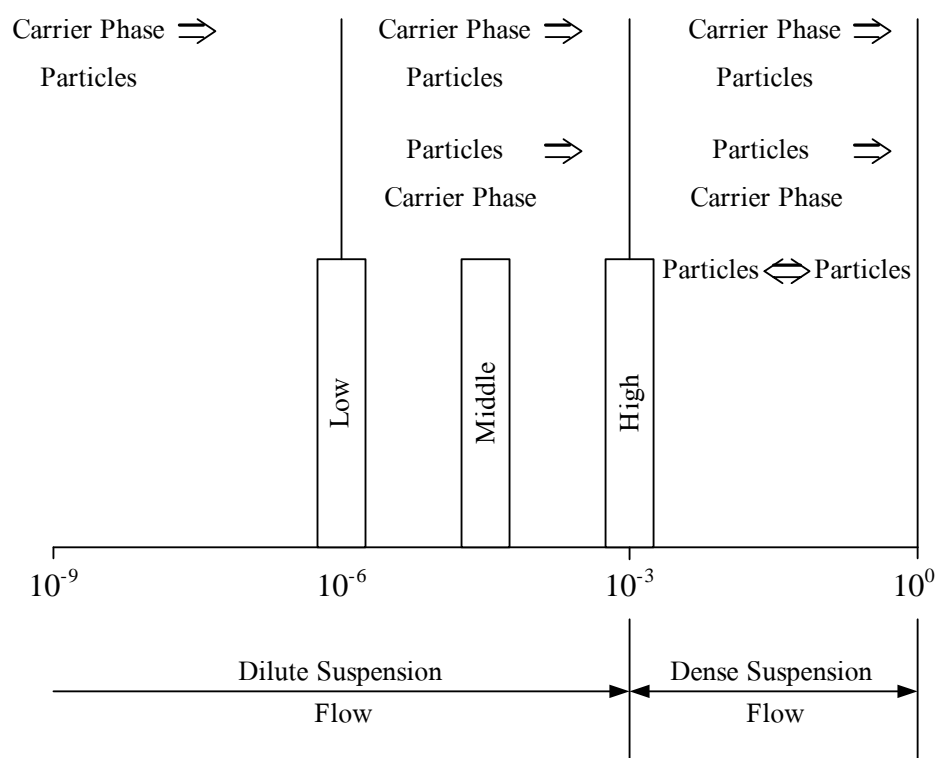
ข.2 การวิเคราะห์เศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละออง

การจำแนกการไหลที่มีอนุภาคจะมีค่าที่สามารถแสดงลักษณะของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อ การไหลได้ดังนี้

1. Stokes Number
2. Particle Mass Concentration
3. Particle Reynolds Number
4. Size of Particle

จากการสืบค้นเอกสารพบว่าค่าที่สามารถระบุผลกระทบของอนุภาคที่มีต่อการไหลภายในห้องสะอาดได้เหมาะสมที่สุดคือ Particle Mass Concentration ซึ่งเป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างมวลของอนุภาคกับปริมาตรควบคุม แต่เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดไม่มีการระบุอย่างแน่ชัด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าเศษส่วนปริมาตรของฝุ่นละอองในการที่จะระบุผลกระทบของอนุภาคฝุ่นละอองที่มีต่อการไหลภายในห้องสะอาด

พิจารณางานวิจัยของ Varaksin et al. (2000) ซึ่งระบุช่วงของเศษส่วนปริมาตรของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อการไหล ดังแสดงในรูปที่ ข.1 พบว่าเศษส่วนของอนุภาคภายในห้องสะอาดมีค่าน้อยกว่า 10^{-6} ทำให้การไหลที่มีฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดเป็นการไหลที่มีอนุภาคเจือจาง (Dilute Flow) จึงสามารถพิจารณาได้ว่า อนุภาคของฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดไม่มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศภายในห้องสะอาด



รูปที่ ข.1 ช่วงของเศษส่วนปริมาตรของอนุภาคที่มีผลกระทบต่อการไหล

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา Visual C++ 6.0 บนพื้นฐานของระเบียบวิธี ปริมาตรจำกัด ประกอบด้วยไฟล์การทำงาน 3 ไฟล์ด้วยกัน คือ main.cpp, NavierStoke.cpp และ NavierStoke.h ฟังก์ชันต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาถูกสร้างขึ้นในไฟล์ NavierStoke.cpp โดย ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ถูกประกาศไว้ในไฟล์ NavierStoke.h ส่วนไฟล์ main.cpp ทำหน้าที่เป็นไฟล์หลัก ในการเรียกใช้ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาในไฟล์ NavierStoke.cpp เพื่อทำการแก้ปัญหาด้วย วิธีการคำนวณแบบทำซ้ำ รายละเอียดต่างๆ ภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังนี้

ค.1 ชื่อของตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับตัวแปรทั่วไป

ตัวแปรหลักต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาถูกประกาศเป็นตัวแปร Global ชนิด Double ชื่อของตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับตัวแปรทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ ค.1

ค.2 หน้าที่ในการทำงานของฟังก์ชันต่างๆ

ฟังก์ชันหลักที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรม ของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด ซึ่งถูกสร้างในไฟล์ NavierStoke.cpp สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานได้ดังนี้

ฟังก์ชัน AirReturnBoundary ทำหน้าที่ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของช่องลมกลับ

ฟังก์ชัน AirReturnConstantBCs ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าคงที่ให้กับขอบเขตของช่องลม กลับ

ฟังก์ชัน Allocate ทำหน้าที่ในการจองหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ให้กับตัวแปร ต่างๆ พร้อมกับกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรให้มีค่าเท่ากับ 0

ฟังก์ชัน BlockOff ทำหน้าที่ในการใช้เทคนิคการกันค่าเพื่อกำหนดค่าคงที่ให้กับจุดต่อใดๆ

ฟังก์ชัน BlockZoneFluxWall ทำหน้าที่ในการกำหนดฟลักซ์การไหลในบริเวณขอบของสิ่ง กีดขวางให้มีค่าเท่ากับ 0

ฟังก์ชัน BlockZoneWall ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความชันของตัวแปรที่บริเวณขอบของ สิ่งกีดขวางให้มีค่าเท่ากับ 0

ฟังก์ชัน BoundaryGradient ทำหน้าที่ในการหาค่าความชันของตัวแปรที่ขอบของโดเมน

ฟังก์ชัน CalculationData ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าให้กับตัวแปรต่างๆ

ฟังก์ชัน CalFluidProperty ทำหน้าที่ในการคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศซึ่งถูก กำหนดให้เป็นก๊าซผสมทางอุดมคติ

ฟังก์ชัน CheckConverge ทำหน้าที่ในการหาค่าเศษตกค้างที่มากที่สุดของตัวแปรหลักในสมการควบคุม ที่ได้คำนวณครบ 1 รอบการคำนวณ

ฟังก์ชัน ConstantValueInsideBlockOff ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าคงที่ให้กับจุดต่อใดๆ ในบริเวณที่มีการใช้เทคนิคการกันค่า

ฟังก์ชัน Deallocate ทำหน้าที่ในการลบหน่วยความจำของตัวแปรที่ได้ประกาศของหน่วยความจำเอาไว้

ฟังก์ชัน Extrapolate ทำหน้าที่ในการหาค่าของตัวแปรที่ขอบของโดเมนด้วยวิธีการประมาณค่านอกช่วง

ฟังก์ชัน GaussElimination ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของระบบสมการเชิงเส้น ในขั้นตอนการสร้างกริด

ฟังก์ชัน GaussSiedel ทำหน้าที่ในการแก้ระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีการคำนวณแบบทำซ้ำเพื่อหาค่าตอบของตัวแปรที่จุดต่อ P

ฟังก์ชัน Gradient ทำหน้าที่ในการหาค่าความชันที่จุดต่อใดๆ ภายในโดเมน

ฟังก์ชัน Grid ทำหน้าที่ในการสร้างกริด

ฟังก์ชัน HEPAParticleSink ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสูญเสียฝุ่นละอองที่จุดต่อภายในบริเวณที่เป็นแผ่นกรองฝุ่นละอองของ Lamianr Flow Hood

ฟังก์ชัน InitialCondition ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรหลักในสมการควบคุม

ฟังก์ชัน LaminarFlowHoodFluxWall ทำหน้าที่ในการกำหนดฟลักซ์การไหลที่ขอบของ Laminar Flow Hood ให้มีค่าเป็น 0

ฟังก์ชัน LaminarFlowHoodWall ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความชันของตัวแปรที่ขอบของ Laminar Flow Hood ให้มีค่าเป็น 0

ฟังก์ชัน LFHSourceEnergy ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างพลังงาน อันเนื่องมาจากการใช้เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

ฟังก์ชัน LFHSourceEPS ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน อันเนื่องมาจากการใช้เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

ฟังก์ชัน LFHSourceKTB ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน อันเนื่องมาจากการใช้เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

ฟังก์ชัน LFHSourceMomentum ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างโมเมนตัม อันเนื่องมาจากการใช้เทคนิคแหล่งกำเนิดโมเมนตัม

ฟังก์ชัน ModViscosity ทำหน้าที่ในการคำนวณค่าความหนืดของความปั่นป่วน

ฟังก์ชัน SecondGradient ทำหน้าที่ในการหาค่าความชันอันดับสอง (Second Gradient) ของตัวแปรที่จุดต่อใดๆ ภายในโดเมน

ฟังก์ชัน SetBoundary ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ HEPA ช่องลม และแผงหลอดไฟ

ฟังก์ชัน SetMemory ทำหน้าที่ในการจองหน่วยความจำให้กับตัวแปร

ฟังก์ชัน SolveEnergy ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของเอนทาลปีในสมการพลังงาน

ฟังก์ชัน SolveEpsilon ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

ฟังก์ชัน SolveKinetic ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

ฟังก์ชัน SolveMomentum ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของความเร็วในสมการ โมเมนตัม

ฟังก์ชัน SolveParticle ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของความเข้มข้นของฝุ่นละอองในสมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย

ฟังก์ชัน SolveWaterVapor ทำหน้าที่ในการหาค่าตอบของเศษส่วนมวลของไอน้ำในสมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

ฟังก์ชัน SourceEnergy ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการพลังงาน

ฟังก์ชัน SourceEpsilon ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการอัตราการสูญเสียพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

ฟังก์ชัน SourceKinetic ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

ฟังก์ชัน SourceMomentum ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการ โมเมนตัม

ฟังก์ชัน SourceParticle ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย

ฟังก์ชัน SourceWaterVapor ทำหน้าที่ในการหาค่าของเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างหรือการสูญเสียในสมการเศษส่วนมวลของไอน้ำ

ฟังก์ชัน TableParticleSource ทำหน้าที่ในการกำหนดเทอมที่ก่อให้เกิดการสร้างฝุ่นละอองอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตบริเวณ โต๊ะปฏิบัติงาน

ฟังก์ชัน TransportCoefficient ทำหน้าที่ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ A_W, A_E, A_S, A_N, A_B และ A_T

ฟังก์ชัน VelocityInsideBlockOff ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความเร็วภายในบริเวณสิ่งกีดขวางให้มีค่าเป็น 0

ฟังก์ชัน WallNormalGradient ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความชันของตัวแปรที่ขอบของโดเมนให้มีค่าเป็น 0

ฟังก์ชัน WorkBenchFluxWall ทำหน้าที่ในการกำหนดฟลักซ์การไหลที่ขอบของโต๊ะปฏิบัติงานให้มีค่าเป็น 0

ฟังก์ชัน WorkBenchWall ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความชันของตัวแปรที่ขอบของโต๊ะปฏิบัติงานให้มีค่าเป็น 0

ตารางที่ ก.1 ชื่อตัวแปรต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับตัวแปรทั่วไป

ชื่อตัวแปร	ตัวแปรทั่วไป	ชื่อตัวแปร	ตัวแปรทั่วไป
AB	A_B	FVAMU	$\Phi_{va,\mu}$
AE	A_E	FVVKC	Φ_{vv,k_T}
AN	A_N	FVVMU	$\Phi_{vv,\mu}$
AP	A_P	GRAV	g_y
AS	A_S	KCA	$k_{T,a}$
AT	A_T	KCN	k_T
AW	A_W	KCV	$k_{T,v}$
BETA	β	KTB	k
CEPS1	$C_{\epsilon 1}$	MDF	$D_{i,m}$
CEPS2	$C_{\epsilon 2}$	MFP	c
CEPS3	$C_{\epsilon 3}$	MOA	M_a
CMUE	C_μ	MOV	M_v
CP	C_P	MUA	μ_a
CPA	$C_{P,a}$	MUV	μ_v
CPV	$C_{P,v}$	P	P
DEL_X	Δx	RETH	ϕ
DEL_Y	Δy	RUS	R
DEL_Z	Δz	SIGMA[IDK]	σ_k
DENS	ρ	SIGMA[IDE]	σ_ϵ
ENP	h	SIGMA[IDT]	σ_T
EPS	ϵ	SIGMA[IDH]	$Sc_{t,m}$
FAAKC	Φ_{aa,k_T}	SIGMA[IDF]	$Sc_{t,c}$
FAAMU	$\Phi_{aa,\mu}$	SU	S^u
FAVKC	Φ_{av,k_T}	SV	S^v
FAVMU	$\Phi_{av,\mu}$	SW	S^w
FEPS1	$f_{\epsilon 1}$	TEM	T
FVAKC	Φ_{va,k_T}	TREF	T_r

ตารางที่ ก.1 ชื่อตัวแปรต่างๆ ใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกับตัวแปรทั่วไป (ต่อ)

ชื่อตัวแปร	ตัวแปรทั่วไป	ชื่อตัวแปร	ตัวแปรทั่วไป
U	u	W	w
V	v	WVM	m
VISC	μ	X	x
VIST	μ_i	Y	y
VOL	ΔV	Z	z

ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. เอกรงค์ สุขจิต, วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2546). การจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลของอากาศภายในห้องสะอาดขนาดเล็ก. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17**. ปรานินบุรี.

2. เอกรงค์ สุขจิต, จักรพงศ์ แก้วกล้า, จิระพล ศรีเสริฐผล และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2548). จำนวนและตำแหน่งของพัคลมเพื่อการระบายความร้อนที่เหมาะสมภายในกล่องคอมพิวเตอร์โดยใช้การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน **การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 5**. กรุงเทพมหานคร.

3. เอกรงค์ สุขจิต, วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (ตุลาคม 2548). การวิเคราะห์ระบบระบายอากาศแบบท่อคู่และแบบพัคลมเจ้ภายในลานจอดรถชั้นใต้ดินด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19**. ภูเก็ต.

4. เอกรงค์ สุขจิต, วรารักษ์รัตน์ จันทสาโร และ เอกชัย จันทสาโร. (2547). การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ และความชื้นภายในห้องสะอาด. **บทความวิชาการ สมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย 9**: 45-52.

5. Sukjit, E., Juntasaro, V., Uthayopas, P., and Juntasaro E. (2003). Numerical simulation of turbulent flow in three-dimensional space. In **Proceedings of the 7th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Bangkok.

6. Sukjit, E., Juntasaro, V., and Juntasaro E. (2004). Application of computational fluid dynamics for predicting a small clean room. In **Proceedings of the 8th Annual National Symposium on Computational Science and Engineering**. Nakhon Ratchasima.

7. Sulak, S., Sukjit, E., Juntasaro, V., and Juntasaro, E. (2004). Numerical prediction of natural convection in a square cavity. In **Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena**. Bangkok.

ประวัติผู้เขียน

นายเอกรงค์ สุขจิต เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พุทธศักราช 2521 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พุทธศักราช 2544 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นระยะเวลา 1 ปี ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พุทธศักราช 2545 พร้อมกับทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร ในโครงการการพัฒนาซอฟต์แวร์ซีเอฟดีสำเร็จรูปสำหรับการจำลองห้องสะอาดโดยใช้กระบวนการคำนวณแบบตามลำดับและแบบขนาน หลังจากสิ้นสุดโครงการ ในปี พุทธศักราช 2548 ได้รับทุนการศึกษาจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท