

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทอากาศในอาคารโดยระบบ
การพาความร้อนอิสระผ่านห้องหลังคารับแดด

นางสาวพรสวรรค์ ทองใบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974 533 3174

**NUMERICAL ANALYSIS OF AIR VENTILATION IN
BUILDING BY FREE CONVECTION
THROUGH SOLAR ATTIC**

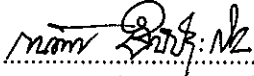
Miss Pornsawan Tongbai

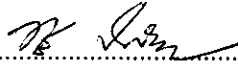
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-317-4**

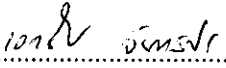
การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทอากาศในอาคารโดยระบบ
การพาความร้อนอิสระผ่านห้องหลังคารับแดด
NUMERICAL ANALYSIS OF AIR VENTILATION IN BUILDING BY
FREE CONVECTION THROUGH SOLAR ATTIC

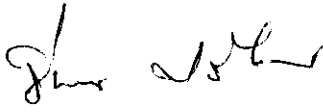
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

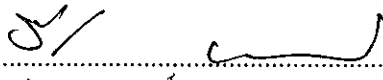
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

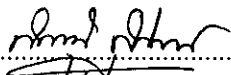

.....
(รองศาสตราจารย์ ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
ประธานกรรมการ



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร)
กรรมการ


.....
(อาจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสรีภูมิ)
กรรมการ


.....
(อาจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน)
กรรมการ


.....
(รองศาสตราจารย์ น.ท.ดร.สรารุทธิ สุจิตจร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ


.....
(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ จำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรสวรรค์ ทองใบ : การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายเทอากาศในอาคารโดยระบบการพาความร้อนอิสระผ่านห้องหลังคารับแดด (NUMERICAL ANALYSIS OF AIR VENTILATION IN BUILDING BY FREE CONVECTION THROUGH SOLAR ATTIC) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 178 หน้า. ISBN 974-533-317-4

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากายการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติในอาคารสองชั้นด้วยวิธีการพาความร้อนอิสระ ทั้งนี้โดยการช่วยเพิ่มการไหลของห้องหลังคารับแดดและปล่องลมแดด (solar chimney) ซึ่งติดตั้งอยู่บนหลังคา อาคารสองชั้นได้ถูกออกแบบให้เป็นทั้งแบบสมมาตร และไม่สมมาตร ที่มีหลังคาเอียงทำจากกระจกใส กำหนดให้มีช่องเปิดเพื่อให้อากาศไหลเข้าที่ด้านล่างของอาคาร และมีช่องเปิดให้อากาศไหลเวียนภายในอาคาร ตลอดจนไหลเข้าสู่ห้องใต้หลังคาและออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องลมแดด ขั้นตอนการคำนวณได้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาการไหลสำเร็จรูป “CFX-5” ซึ่งเป็นโปรแกรมกลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่คำนวณด้วยกรรมวิธีปริมาตรจำกัด และใช้ระบบกริดแบบไร้โครงสร้าง (Unstructured grid) ได้สมมุติให้การไหลเป็นระบบสองมิติ แบบราบเรียบ และเป็นกรไหลแบบพาความร้อนอิสระ สำหรับตัวอาคารกำหนดให้มีความกว้าง 10 m และสูง 6 m โดยทำการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของอาคาร ได้แก่ มุมเอียงของหลังคา ความสูงและความกว้างของปล่อง ความเข้มของแสงแดด ตลอดจนเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างอาคารแบบสมมาตรกับไม่สมมาตร ผลการศึกษาบ่งบอกว่าการเพิ่มมุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องลมแดด ตลอดจนการเพิ่มความเข้มของแสงแดด ต่างส่งผลให้ปริมาณการถ่ายเทอากาศสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศจากการเพิ่มมุมเอียงหลังคาเป็นประเด็นที่น่าสนใจมาก ซึ่งควรได้รับการศึกษาวิจัยในเชิงลึกต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าอาคารแบบไม่สมมาตรส่งผลให้อัตราการถ่ายเทอากาศเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ช่วยให้แนวของเส้นการไหลผ่านบริเวณคนอยู่อาศัยได้มากกว่า และทำให้อากาศไหลเข้าอาคารได้เร็วขึ้น ผลการวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับอาคารที่มีลักษณะรูปทรงคล้ายกับอาคารที่กำหนด ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานในการทำให้เกิดความสบายในการพักอาศัยของมนุษย์ นอกจากนี้ยังอาจใช้ได้กับโรงเลี้ยงเห็ด และสัตว์เศรษฐกิจ เพื่อเพิ่มผลผลิตอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา Wanm...
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr. T. J.

**PORNSAWAN TONGBAI : NUMERICAL ANALYSIS
OF AIR VENTILATION IN BUILDING BY FREE
CONVECTION THROUGH SOLAR ATTIC. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWIT CHITSOMBOON,
Ph.D. 178 PP. ISBN 794-533-317-4**

AIR VENTILATION/SOLAR CHIMNEY/SOLAR ATTIC/FREE CONVECTION

The purpose of this thesis is to study the ventilation of air in two-storey buildings by natural convection with the help of solar attic and solar chimney attached to it. The buildings were shaped to be symmetric and asymmetric with respect to the mid-plane, with inclined transparent roofs. They had inlet air opening on the 1st floor with flow passage ports on the 2nd floor and at edges of the attic; the opening on top of the attic roof was attached to the base of a solar chimney which finally vent the air to the atmosphere. The commercial computational fluid dynamics program, "CFX-5", was used to compute the results for all the study cases using the finite volume method together with unstructured mesh topology. Two dimensional, laminar flows were assumed in all the computations. The size of the building was set to be 10 m. wide and 6 m. high with various building parameters investigated, namely, roof inclination, height and width of solar chimney, solar intensity, and the symmetric/non-symmetric shape of the roof. The results indicated that increases of roof inclination, height and width of chimney, and solar intensity give higher ventilation. The increased ventilation due to roof inclination is unexpected and should be further investigated. It was found that the asymmetric roof gave about the same ventilation as the symmetric case but air velocity in the building was higher and had a longer path. The findings in this study can also be applied to ventilate agricultural buildings such as mushroom and livestock buildings, in order to increase productivity at a low cost.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2003

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจาก ท่านอาจารย์ทวิช จิตรสมบูรณ์ ซึ่งเป็นทั้งอาจารย์ที่ผู้วิจัยเคารพรัก และเปรียบเสมือนพ่อคนที่สองของผู้วิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำการวิจัย ตลอดจนสนับสนุนด้านหน้าที่การงานให้ผู้วิจัยมีกำลังใจ และกำลังใจในการดำเนินงานให้ผ่านลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้รับข้อคิดดี ๆ และสิ่งที่เป็นประโยชน์มากมายจากการทำงานร่วมกับอาจารย์ ทั้งในด้านการปฏิบัติงาน และการดำเนินชีวิตประจำวัน ซึ่งผู้วิจัยจักไม่มีวันลืม และจะนำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตในภายภาคหน้าต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ วรพจน์ จำพิศ ท่านอาจารย์กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ท่านอาจารย์เอกชัย จันทสาโร ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ และคอยกระตุ้นให้ผู้วิจัยได้มีกำลังใจในการดำเนินการวิจัยอยู่เสมอ

ขอขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยจักระลึกถึงตลอดไป

- คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และ คุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่และธุรการประจำสำนักวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
- คุณจารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ คุณ โศรฎา แข็งการ คุณศรัทธา โพธิสว่าง คุณวสันต์ จันทร์ห้วยวก คุณอาทิตย์ คุณศรีสุข คุณวิกันดา ศรีเดช และคุณเกรียง ไกร เพ็ชรน้ำเขียว ซึ่งเป็นเพื่อนรุ่นน้องรุ่นพี่ร่วมสถาบัน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่สงวน และคุณพ่อสมหมาย ทองใบ ที่ได้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนให้โอกาสทางการศึกษาเล่าเรียนและให้กำลังใจอยู่ตลอด และขอบคุณน้องสาวและพี่ชายที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

พรสวรรค์ ทองใบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 สมมุติฐานการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 การถ่ายเทอากาศ.....	6
2.3 การพาอิสระ.....	8
2.3.1 กลไกทางฟิสิกส์ของการพาอิสระ.....	9
2.3.2 ค่าเลขกราชอฟ (The Grashof Number).....	13
2.3.3 การพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง.....	14
2.3.4 สมการชั้นผิวบาง (The Boundary-Layer Equations).....	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	29
3.1	กล่าวนำ	29
3.2	การทดสอบโปรแกรม CFX-5	29
3.2.1	การกำหนดสถานะเริ่มต้นของการไหล	30
3.2.2	การกำหนดย่านการไหล (Geometry)	31
3.2.3	การสร้างเมช (Mesh)	32
3.2.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	34
3.2.4.1	พื้นผิวของแผ่นร้อน	35
3.2.4.2	พื้นผิวด้านล่างของโดเมน	35
3.2.4.3	พื้นผิวด้านบนของโดเมน	36
3.2.4.4	พื้นผิวด้านตรงข้ามแผ่นร้อน	36
3.2.4.5	พื้นผิวด้านหน้าและด้านหลัง	37
3.2.4.6	พื้นผิวส่วนที่เหลือ	37
3.2.5	การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น	37
3.2.6	แบบจำลองแรงลอยตัว	38
3.2.7	ผลลัพธ์จากการจำลอง	39
3.3	การจำลองปัญหาการไหลของอากาศผ่านอาคารสองชั้น	43
3.3.1	ลักษณะทางกายภาพของอาคารและหลักการทำงาน	43
3.3.2	การจำลองอาคารและสมมุติฐานการวิจัย	46
3.3.3	การสร้างเมช	46
3.3.3.1	การสร้างเมชเบื้องต้น	47
3.3.3.2	การปรับเมช	48
3.3.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	49
3.3.4.1	พื้นผิวของช่องเปิดที่ผนังชั้นล่าง	49
3.3.4.2	พื้นผิวหน้าต่างที่ปลายปล่อง	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4.3	พื้นผิวแนวตั้งที่อยู่กึ่งกลางอาคาร	50
3.3.4.4	พื้นผิวด้านหน้าและด้านหลัง.....	50
3.3.4.5	พื้นผิวด้านที่เหลือ.....	50
3.3.5	การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น	50
4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล.....	51
4.1	กล่าวนำ	51
4.2	ผลการจำลอง	57
4.2.1	ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m ²	58
4.2.2	ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 550 W/m ²	81
4.2.3	ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 800 W/m ²	103
4.2.4	เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลง ค่าความเข้มของแสงแดด	123
4.2.5	ผลการจำลองกรณีปล่องกว้าง 1.5 m และ 0.5 m	126
4.2.6	ผลการจำลองกรณีอาคารแบบไม่สมมาตร	131
4.3	การอภิปรายผล	133
4.3.1	ผลกระทบจากความสูงของปล่อง	134
4.3.2	ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา	134
4.3.3	ผลกระทบจากความกว้างของปล่อง.....	135
4.3.4	ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด	136
4.3.5	ผลกระทบจากอาคารแบบสมมาตรกับไม่สมมาตร	138
4.3.6	ผลกระทบจากตัวแปรต่อปริมาณการถ่ายเทอากาศ	138
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	141
5.1	สรุปผล	141
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	141
	เอกสารอ้างอิง	143

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก	ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหลโดยการพหุอิสระ ผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง.....	146
ภาคผนวก ข	โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล CFX-5.....	158
ประวัติผู้เขียน	178

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วัสดุที่ใช้สำหรับ RSC แต่ละรูปแบบ.....	24
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของอาคารแต่ละกรณี	53
4.2	ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 1 – 12.....	79
4.3	ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 13 – 24.....	101
4.4	ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 25 – 36.....	121
4.5	ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 37, 38 และ 27	129
4.6	ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 39 และ 29	133

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การพาโดยอิสระของแก่น้ำร้อน9
2.2	การพาอิสระของวัตถุเย็น..... 10
2.3	การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง14
3.1	ชั้นผิวบางของการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง..... 30
3.2	ขนาดของโดเมนในการจำลองการไหลโดยการพาอิสระ ผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ($Z= 0.001$ m).....32
3.3	เมชที่ใช้ในการคำนวณขนาด 50×50 เมช (เมชแบบหยาบ)33
3.4	ภาพขยายของเมชขนาด 50×50 เพื่อแสดงลักษณะของเมชบริเวณชั้นผิวบาง.....34
3.5	รูปด้านข้างความเร็วที่เงื่อนไขขอบเขตบริเวณพื้นผิวตรงข้ามแผ่นร้อนต่าง ๆ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....37
3.6	รูปด้านข้างความเร็วที่จำนวนเมชต่าง ๆ ($Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....39
3.7	รูปด้านข้างความเร็วในรูปตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....40
3.8	รูปด้านข้างอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m)41
3.9	รูปด้านข้างความเร็วและอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....41
3.10	รูปด้านข้างความเร็วและอุณหภูมิ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....42
3.11	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($Pr = 0.711$, $X= 0.085$ m).....42
3.12	ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบสมมาตร44
3.13	ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบไม่สมมาตร45
3.14	ลักษณะเมชเบื้องต้น (7,512 เมช 2,185 จุด 3,492 หน้า)47
3.15	ตัวอย่างเมชที่ผ่านการปรับเมชแล้วสำหรับกรณีที่ 35 (17,677 เมช 4,615 จุด 5,970 หน้า)49
4.1	อาคารแบบสมมาตร51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	อาคารแบบไม่สมมาตร	52
4.3	เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบสมมาตร (เส้นตามลูกศร).....	55
4.4	เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบไม่สมมาตร (เส้นตามลูกศร).....	56
4.5	ค่าส่วนตกค้างของตัวแปรสำหรับกรณีที่ 8.....	58
4.6	เส้นการไหลกรณีที่ 1.....	59
4.7	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 1	59
4.8	เส้นการไหลกรณีที่ 2.....	60
4.9	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 2	60
4.10	เส้นการไหลกรณีที่ 3.....	60
4.11	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 3	60
4.12	เส้นการไหลกรณีที่ 4.....	61
4.13	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 4	61
4.14	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 1.....	62
4.15	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 2.....	62
4.16	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 3.....	62
4.17	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 4.....	62
4.18	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m.....	63
4.19	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m.....	64
4.20	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m.....	65
4.21	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m.....	65
4.22	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m.....	66
4.23	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m.....	67
4.24	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m.....	67
4.25	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m.....	68
4.26	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m 69
4.28	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m..... 69
4.29	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m..... 70
4.30	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15° 71
4.31	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15° 71
4.32	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15° 72
4.33	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15° 72
4.34	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30° 73
4.35	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30° 73
4.36	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30° 74
4.37	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30° 74
4.38	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45° 75
4.39	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45° 76
4.40	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45° 76
4.41	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45° 77
4.42	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 77
4.43	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 78
4.44	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 78
4.45	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 79
4.46	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศกรณีที่ 1 – 12..... 81
4.47	เส้นการไหลกรณีที่ 17..... 83
4.48	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 17..... 83
4.49	เส้นการไหลกรณีที่ 18..... 83
4.50	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 18..... 83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51	เส้นการไหลกรณีที่ 19.....84
4.52	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 1984
4.53	เส้นการไหลกรณีที่ 20.....84
4.54	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 2084
4.55	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 17.....85
4.56	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 18.....85
4.57	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 19.....85
4.58	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 20.....85
4.59	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m86
4.60	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m87
4.61	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m.....87
4.62	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m88
4.63	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m89
4.64	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m89
4.65	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m.....90
4.66	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m90
4.67	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m91
4.68	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่สูงของปล่อง 7 m.....91
4.69	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่สูงของปล่อง 7 m92
4.70	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m92
4.71	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15° 93
4.72	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15° 93
4.73	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15° 94
4.74	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15° 94
4.75	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30° 95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.76	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°	95
4.77	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°	96
4.78	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°	96
4.79	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°	97
4.80	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°	97
4.81	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°	98
4.82	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°	98
4.83	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°	99
4.84	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°	99
4.85	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°	100
4.86	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°	100
4.87	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศกรณีที่ 13 – 24.....	102
4.88	เส้นการไหลกรณีที่ 33.....	104
4.89	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 33	104
4.90	เส้นการไหลกรณีที่ 34.....	104
4.91	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 34	104
4.92	เส้นการไหลกรณีที่ 35.....	105
4.93	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 35	105
4.94	เส้นการไหลกรณีที่ 36.....	105
4.95	เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 36	105
4.96	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 33.....	106
4.97	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 34.....	106
4.98	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 35.....	106
4.99	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 36.....	106
4.100	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m	107

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.126	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 120
4.127	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60° 121
4.128	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศกรณี 25 – 36..... 123
4.129	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูล ที่ค่าความชื้นของแสงแดดต่าง ๆ 124
4.130	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูล ที่ค่าความชื้นของแสงแดดต่าง ๆ 125
4.131	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูล ที่ค่าความชื้นของแสงแดดต่าง ๆ 125
4.132	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูล ที่ค่าความชื้นของแสงแดดต่าง ๆ 126
4.133	เส้นแนวการไหลกรณี 37 127
4.134	เส้นแนวการไหลกรณี 38 127
4.135	เวกเตอร์ความเร็วกรณี 37 127
4.136	เวกเตอร์ความเร็วกรณี 38 127
4.137	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณี 37..... 128
4.138	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณี 38..... 128
4.139	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ 130
4.140	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ 130
4.141	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ 131
4.142	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูล ที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ..... 131
4.143	เส้นแนวการไหลกรณี 39 132
4.144	เวกเตอร์ความเร็วกรณี 39 132
4.145	คอนทัวร์อุณหภูมิกรณี 39..... 133

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.146	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับกรณีปล่องสูง 3 m 134
4.147	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15° 135
4.148	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับกรณีปล่องกว้าง 1.0 m 136
4.149	อัตราการไหลโดยมวลกรณีปล่องสูง 5 m เทียบกับความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ 137
4.150	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับกรณี $Q = 300 \text{ W/m}^2$ 137
4.151	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับร้อยละการเพิ่มขึ้น ของความเข้มของแสงแดด ($h_c = 3 \text{ m}$) 138
4.152	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความสูงของปล่อง ($Q = 300 \text{ W/m}^2$) 139
4.153	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคา ($h_c = 3 \text{ m}$) 139
4.154	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความเข้มของแสงแดด ($\theta = 45^\circ$) 140
ก.1	ลักษณะทางกายภาพของปัญหา 147
ก.2	รูปด้านข้างตัวแปรไร้มิติของความเร็วและอุณหภูมิ 150
ก.3	รูปด้านข้างของความเร็วและอุณหภูมิ 150
ก.4	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบกับความยาวของแผ่นร้อน 152
ข.1	ลูกโซ่การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป CFX-5 160

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ρ	=	ความหนาแน่น
p	=	ความดัน
T	=	อุณหภูมิ
V	=	เวกเตอร์ความเร็ว
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ย
u	=	ความเร็วทางแกน X
v	=	ความเร็วทางแกน y
w	=	ความเร็วทางแกน Z
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
c_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะ
β	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร
μ	=	ความหนืดพลศาสตร์
ν	=	ความหนืดจลนศาสตร์
Pr	=	ค่าเลขพรินเทิล
Gr	=	ค่าเลขกราชอฟ
Ra	=	ค่าเลขราเลย์
δ	=	ความหนาของชั้นผิวบาง
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
RSC	=	Roof Solar Collector
SIL	=	The Stratification Interface Level
ach	=	air change per hour

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

การอยู่อาศัยที่สุขสบายเป็นสิ่งทีพึงปรารถนา ซึ่งหมายถึงการอยู่อาศัยได้ภาวะอากาศที่ไม่ร้อนหรือเย็นจนเกินไป และมีการถ่ายเทอากาศที่ดี ประโยชน์ของการถ่ายเทอากาศนอกจากจะช่วยให้รู้สึกสบายแล้ว ยังช่วยขจัดสิ่งเจือปนในอากาศโดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนระหว่างอากาศบริสุทธิ์กับอากาศที่มีสิ่งเจือปน โดยทั่วไปถือว่าอากาศบริสุทธิ์คืออากาศที่อยู่ภายนอกอาคาร ส่วนอากาศที่มีสิ่งเจือปนคืออากาศที่อยู่ภายในอาคารซึ่งได้รับสิ่งเจือปนจากสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ข้างใน เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากลมหายใจของคน ความร้อนจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น หากคนเราได้อยู่อาศัยภายในอาคารหรือบ้านด้วยความรู้สึกสบายแล้ว สุขภาพกายและจิตก็จะดีตามไปด้วย

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีต สิ่งปลูกสร้างสำหรับอยู่อาศัยของคนไทยมีรูปร่างลักษณะที่เอื้อให้เกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ (**natural ventilation**) ที่ดี เช่น มีได้ถุนสูง หน้าจั่วของหลังคามีรูปทรงเป็นมุมแหลม และมีจำนวนหน้าต่างหรือช่องลมมาก ทำให้ลมสามารถพัดผ่านได้โดยง่าย ผู้อยู่อาศัยจึงรู้สึกเย็นสบายโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องปรับอากาศเช่นสมัยนี้ ประกอบกับความร่มรื่นรอบ ๆ บริเวณบ้านยังมีอยู่มาก ลมที่พัดจึงนำความเย็นเข้ามาด้วย ทำให้รู้สึกสบายยิ่งขึ้น

ปัจจุบัน อากาศร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี อันเนื่องมาจากการตัดไม้ทำลายป่าทำให้ปริมาณต้นไม้ที่สร้างความร่มรื่นมีจำนวนลดน้อยลง อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจึงสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิของอากาศอาจสูงถึง 40°C นอกจากนี้ ลักษณะของอาคารแบบใหม่ที่มีการรับเอาสถาปัตยกรรมจากตะวันตกมาผสมผสานกับลักษณะอาคารรูปแบบเดิม โดยมีมูลเหตุจูงใจด้านความสวยงามภายนอกเป็นหลัก จึงลืมนำถึงความรู้สึกสบายในการอยู่อาศัย ลักษณะของอาคารรูปแบบใหม่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นบ้านแบบ 2 ชั้น และไม่มีได้ถุนบ้านดังเช่นในอดีต วัสดุที่ใช้ในการปลูกสร้างส่วนใหญ่ทำจากคอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนได้ดี ทำให้บ้านร้อนขึ้น โดยเฉพาะในตอนกลางวันซึ่งไม่มีแสงแดดตกกระทบอาคารแล้ว แต่เกิดการปลดปล่อยความร้อนที่ดูดซับไว้ในเวลากลางวันของผนังอาคาร จึงทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกร้อนอบอ้าว

สืบเนื่องจากการออกแบบบ้านสมัยใหม่ที่ไม่เหมาะสมต่อการเกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ ทำให้ผู้อยู่อาศัยหันมาใช้เครื่องปรับอากาศ (**air conditioner**) หรือพัดลม (**fan**) แต่อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาค่อนข้างแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องปรับอากาศ ประชากรส่วนใหญ่ในภาคเกษตรกรรมของประเทศมีฐานะค่อนข้างยากจนจึงยังไม่มีศักยภาพพอที่จะซื้ออุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อมาช่วยเพิ่มความสะดวกให้กับตนเองและครอบครัว และแม้จะสามารถจัดหาซื้อมาได้ก็จะมีภาระเพิ่มในการจ่ายค่าไฟแต่ละเดือน และยังเป็นภาระเพิ่มให้กับประเทศในการจัดหาพลังงานเพิ่มเติม รวมทั้งเป็นภาระต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นหากสามารถลดความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันของแต่ละอาคาร หรือบ้านเรือน ก็จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมาก เป็นประโยชน์ทั้งต่อตนเองและสังคม

ทางเลือกหนึ่งในการอยู่อาศัยที่รู้สึกสบาย สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และยังช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้า คือ การใช้การถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ โดยใช้หลักการของอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้น และอากาศเย็นกว่าเข้ามาแทนที่ตามหลักของการพาอิสระ (**free convection**) ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า ปล่องลมแดด (**solar chimney**) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมรรถนะในการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ จากการทำงานของปล่องลมแดดร่วมกับหลังคาบ้านซึ่งทำขึ้นจากวัสดุโปร่งใส โดยอาศัยหลักของการพาความร้อนโดยอิสระภายในอาคาร 2 ชั้น

แนวทางในการศึกษากระบวนการทางวิศวกรรมศาสตร์มีอยู่ 3 แนวทาง คือ

1. การทดลอง (**Experiment**)
2. การศึกษาเชิงทฤษฎี (**Analytical analysis**)
3. การศึกษาเชิงตัวเลข (**Numerical analysis**)

การทำการศึกษาทดลอง นับเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องลงทุนสร้างอาคารขึ้นจริง อีกทั้งยังยากต่อการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์บางตัว ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงได้ยากและใช้เวลานาน ตลอดจนไม่สามารถควบคุมปัจจัยหรือเงื่อนไขภายนอกเพื่อศึกษาถึงบางสภาวะการณ์ได้ ส่วนการศึกษาเชิงทฤษฎีนั้น ความยากอยู่ที่การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์และการเลือกใช้สมมุติฐานที่เหมาะสม

การศึกษาเชิงตัวเลข คือ การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณหาคำตอบของปัญหา ซึ่งในปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมาก ในแขนงวิชากลศาสตร์ของไหล คอมพิวเตอร์สามารถช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน ตลอดจนตัวแปรทางเทอร์โมฟิสิกส์อื่น ๆ เรียกว่า พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (**Computational Fluid Dynamics, CFD**) วิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลผสมผสานกับความรู้ทางด้าน

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (**numerical method**) โดยทำการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (**partial differential equations**) ซึ่งเป็นสมการที่ควบคุมการไหล ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟฟิกในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้นักวิจัยสามารถเข้าใจถึงปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถปรับปรุง คัดเลือกรูปแบบของการออกแบบในคอมพิวเตอร์ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจก่อนที่จะนำไปสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ หรือทำการทดลองเพื่อเพิ่มความมั่นใจต่อไป นอกจากนี้ กระบวนการออกแบบด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลดังกล่าว ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาลงไปเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการทดลองแต่เพียงอย่างเดียว เพราะช่วยในการวิเคราะห์และลดขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองหรือในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดลองได้ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์หลังไปในรายละเอียดของการไหลในบางบริเวณเพื่อหาผลลัพธ์และข้อมูลที่ต้องการความสมบูรณ์

ด้วยเหตุผลดังกล่าว สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาปัญหาการถ่ายเทอากาศในอาคารด้วยกรรมวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยเลือกใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูปซึ่งถือว่าเป็นการศึกษาที่ลงทุนต่ำกว่าการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง เพราะสามารถประหยัดเวลาได้เป็นอย่างมาก โปรแกรมที่เลือกใช้มีชื่อว่า “CFX-5” อยู่ภายใต้เครื่องหมายการค้าของ **The MacNeal Schwendler Corporation** ซึ่งเป็นโปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหลที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาการไหลได้หลากหลายรูปแบบและกำลังได้รับความนิยมทั่วโลก

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.3.1 ศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติในอาคารสองชั้นที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านห้องหลังคาและปล่องลมแดดโดยใช้กรรมวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.3.2 หาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทอากาศ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลกระทบต่อการถ่ายเทอากาศอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความสูงของปล่อง ความกว้างของปล่อง มุมเอียงของหลังคา ความเข้มของแสงแดด และลักษณะของตัวอาคาร โดยมีขอบเขตของการศึกษาเป็นดังนี้

- 1.4.1 ความสูงของปล่อง (วัดจากยอดหลังคาที่เอียง 45°) 3 m, 5 m และ 7 m
- 1.4.2 มุมเอียงของหลังคา 15° , 30° , 45° และ 60°
- 1.4.3 ความกว้างของปล่อง 0.5 m, 1.0m และ 1.5 m
- 1.4.4 ความเข้มของแสงแดด 300 W/m², 550 W/m² และ 800 W/m²

1.4.5 ลักษณะของอาคารแบบสมมาตร และไม่สมมาตร

1.5 สมมุติฐานการวิจัย

1.5.1 สมมุติให้อากาศใต้หลังคาได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรแบบเอกลักษณะ (**uniform**) โดยมีเหตุผลประกอบคือ ภายในห้องหลังคามีรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการแผ่รังสีความร้อน (**radiation**) เป็นสำคัญ (**dominant heat transfer mode**) การดูดซับความร้อนของหลังคามีน้อยมาก ความร้อนจากแสงแดดส่วนใหญ่ทะลุผ่านหลังคากระจกใสเข้ามาภายในห้องหลังคา และถ่ายเทความร้อนสู่อากาศจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมด

1.5.2 เป็นการไหลในช่วงราบเรียบ (**laminar flow**) โดยมีเหตุผลคือ การไหลภายในอาคารเป็นการไหลที่ถูกขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัว ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และมีค่าเลขเรโนลด์ในการไหลต่ำ จึงสามารถอนุมานให้เป็นการไหลในช่วงราบเรียบได้

1.5.3 เป็นการไหลที่สถานะคงตัว (**steady state flow**) โดยมีเหตุผลคือ ได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นเวลานานพอสมควร จึงสามารถอนุมานว่าการไหลเข้าสู่สถานะคงตัวได้

1.5.4 สมมุติให้ผนังและพื้นเป็นฉนวนสมบูรณ์ (**adiabatic**) ในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลในภาพรวม เช่น เส้นการไหล และการกระจายความเร็ว การจำลองการไหลในเบื้องต้น จึงสมมุติให้ผนังและพื้นเป็นฉนวนสมบูรณ์ ซึ่งจะมีความผิดพลาดเล็กน้อยที่ยอมรับได้

1.5.5 เป็นการไหลในสองมิติ เนื่องจากเป็นการศึกษาในเบื้องต้นซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ในภาพรวม การสมมุติเช่นนี้นอกจากจะสามารถประหยัดเวลาในการคำนวณของโปรแกรมแล้วยังอาจจะใช้ได้ดีกับโรงเรือนที่มีขนาดหนามากในมิติที่สาม เช่น โรงเลี้ยงไก่ เป็นต้น

1.5.6 ใช้ **Boussinesq approximation** โดยวิเคราะห์จากการทดสอบโปรแกรมว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้การประมาณการนี้เหมาะสมแล้ว ซึ่งจะกล่าวเหตุผลโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หากผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นที่น่าพอใจ จะทำให้มีทางเลือกใหม่ในการเพิ่มความรู้สึกสบายเมื่ออาศัยอยู่ในบ้าน อาคาร หรือห้องทำงาน ซึ่งข้อดีของระบบการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติคือ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสามารถนำไปปรับใช้กับอาคารหรือบ้านเรือนที่มีอยู่เดิมได้อีกด้วย ระบบนี้น่าจะเป็นระบบที่เหมาะสมกับประเทศไทย เพราะประชากรส่วนใหญ่ของประเทศอยู่ในภาคเกษตรกรรม และมีฐานะยากจนถึงปานกลาง ดัง

นั่นหากหันมาใช้ระบบการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาตินอกจากจะเป็นการเพิ่มความรู้สึกสบายในการพักอาศัยแล้วยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้ ทำให้มีเงินเหลือเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ของครอบครัว อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปล่ระบบนี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ได้ เช่น โรงบ่มเพาะเห็ด และ โรงเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

21 กล่าวนำ

การออกแบบอาคารที่ดีเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานจะต้องออกแบบให้มีพื้นที่ที่ต้องการการปรับอากาศ (Air Conditioning) จริง ๆ ให้น้อยที่สุด และพยายามใช้การถ่ายเทอากาศ (Air Ventilation) เข้ามาช่วยในพื้นที่ส่วนที่เหลือ การถ่ายเทอากาศก็ควรใช้วิธีทางธรรมชาติให้มากที่สุด ที่เหลือจึงใช้การถ่ายเทอากาศทางกล เพราะการถ่ายเทอากาศทางกลจำเป็นต้องใช้พลังงาน นอกจากการถ่ายเทอากาศจะช่วยให้ห้องมีภาวะอากาศที่เหมาะสมแล้ว การถ่ายเทอากาศยังมีหน้าที่ในการนำอากาศเสียออกไปด้วย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติโดยอาศัยหลักการพาอิมสัระผ่านห้องหลังคารับแดด ซึ่งมีปล่องลมแดดติดตั้งที่ด้านบนของหลังคาเพื่อช่วยเพิ่ม stack height ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศได้

ในบทนี้จะอธิบายถึงการถ่ายเทอากาศและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทอากาศ โดยเฉพาะทฤษฎีการพาอิมสัระซึ่งเป็นมูลเหตุในการไหลของอากาศสำหรับกรณีศึกษาที่ตลอดจนนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่น่าสนใจ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

22 การถ่ายเทอากาศ

การถ่ายเทอากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับห้องที่มีกลิ่น คว้น ไอเสียต่าง ๆ เช่น ห้องประชุม ห้องอาหาร บริเวณสุขาบุหรี ห้องน้ำ ที่จอดรถ ห้องเครื่อง ห้องครัว ห้องขยะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทอากาศจากห้องที่มีอากาศเสีย เช่น ห้องครัวและห้องขยะ ควรถ่ายเททิ้งที่ระดับสูง เพื่อป้องกันไม่ให้กลิ่นตกค้างอยู่รอบบริเวณอาคาร การถ่ายเทอากาศเสียให้ได้ผล จะต้องพยายามดูดอากาศเสียออกที่จุดต้นกำเนิด เช่น จุดที่มีอากาศร้อน เตาไฟ ต้นกำเนิดของกลิ่น หากปล่อยให้ความร้อน กลิ่น คว้น ไอน้ำกระจายออกไป การที่จะดูดทิ้งให้ได้ผลก็จะทำได้ยาก ในบางกรณีจึงนิยมที่จะทำฝาครอบ (hood) ครอบเสียเลย

การถ่ายเทอากาศยังมีความสำคัญในการช่วยควบคุมความดันอากาศภายในห้อง มักจะออกแบบห้องปรับอากาศให้มีความดันอากาศภายในห้องสูงกว่าภายนอก โดยอาศัยการนำอากาศบริสุทธิ์เข้ามาแทนที่เพื่อป้องกันฝุ่นและความชื้นที่จะแทรกตัวเข้าไป ห้องที่ควรจะมีมีความดันอากาศ

คำคือ ห้องที่มีกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น ห้องน้ำ ห้องอาหาร ห้องครัว ห้องจำพวกนี้จะอาศัยการถ่ายเทอากาศทิ้งไปบางส่วนทำให้ความดันต่ำกว่าบริเวณอื่น ในอาคารประเภทโรงพยาบาลหรือโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ การกำหนดค่าความดันอากาศของห้องต่าง ๆ จะมีความสำคัญมาก โดยการกำหนดจะกำหนดเป็นลำดับชั้น เช่น ห้องผ่าตัดจะต้องมีความดันสูงกว่าบริเวณหน้าห้องผ่าตัด และบริเวณหน้าห้องผ่าตัดจะต้องมีความดันสูงกว่าบริเวณภายนอกเพื่อป้องกันการติดเชื้อ

ตัวอย่างการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ เช่น การจัดให้บริเวณทางเดินอยู่ภายในสวนภายในที่เรียกว่า “inner court” ทำให้ได้บรรยากาศที่ร่มรื่นบริเวณทางเดินหรือโถงโดยทั่วไป โดยไม่ต้องมีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศในส่วนนี้ ตัวอย่างการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่ได้ผลมากอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้หลักการของอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้น และอากาศที่เย็นกว่าจะเข้ามาแทนที่ ซึ่งเรียกว่า “stack effect” หลักการนี้จะเห็นได้จากโบสถ์คริสต์ ซึ่งจะมีการเจาะช่องลมด้านล่างของผนังโดยรอบ และมีช่องถ่ายเทอากาศออกในที่สูง จะทำให้เกิดกระแสลมมากพอที่จะใช้ประโยชน์ได้ แต่หากมีผู้คนมากก็อาจจะไม่เพียงพอ สาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องมาจากหลังคาภายในไม่มีฉนวนกันความร้อน ทำให้หลังคาอมความร้อนและแผ่รังสีกลับลงมา ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงไม่สามารถถูกกำจัดโดยกระแสลมได้ และในปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้กับที่พักอาศัย และมีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาความสามารถของปล่องลมแคบในการทำให้เกิด stack effect ดังกล่าว การใช้ stack effect ให้ได้ผล จะต้องพยายามให้มีความสูง (stack height) ระหว่างช่องลมเข้าด้านล่าง และช่องถ่ายเทอากาศออกด้านบนที่สูงพอ (5 m ขึ้นไป) จึงจะเริ่มเห็นผล โดยที่ขนาดช่องเปิดก็ต้องมากพอด้วย นอกจากนี้ จะต้องระมัดระวังไม่ให้กระแสลมเกิดการลัดวงจรเพราะทำให้ stack height เสียไป และต้องให้กระแสลมผ่านห้องตามแนวกระแสลมที่ต้องการ (เกชา ชีระโกเมน, www, 2000)

ภาวะอากาศที่ทำให้คนส่วนใหญ่รู้สึกสบายจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ $23^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C}$ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 55% (เกชา ชีระโกเมน, www, 2000) ทั้งอุณหภูมิและความชื้นเป็นเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกัน หากพิจารณาห้อง ๆ หนึ่งที่มีปริมาณความชื้นในอากาศอยู่จำนวนหนึ่ง ถ้าห้องนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นสัมพัทธ์ก็จะลดลง หรือถ้าห้องนั้นมีอุณหภูมิลดลง ความชื้นสัมพัทธ์ก็จะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์คือสัดส่วนปริมาณไอน้ำในอากาศต่อปริมาณไอน้ำอิ่มตัว (ณ ความดันอิมตัวที่อุณหภูมินั้น ๆ) ดังนั้น ในการกำหนดภาวะอากาศจึงต้องระบุทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ควบคู่ไปด้วยกันเสมอ และเป็นที่น่าสังเกตว่า หากลดความชื้นสัมพัทธ์ให้ต่ำลง เช่น จากปกติ 55% เป็น 45% ถึงแม้อุณหภูมิจะสูงขึ้นจาก 24°C เป็น 27°C คนก็ยังสามารถรู้สึกสบายอยู่ได้ นอกจากภาวะอากาศจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นเป็นอย่างมากแล้ว ยังขึ้นกับลมที่พัดผ่านร่างกายอีกด้วย ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงรู้สึกเย็นสบายเมื่อยืนอยู่กลางทุ่งที่มีแดดจ้าที่

อุณหภูมิ $35^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 80% แต่มีลมพัด โกรก ยิ่งถ้าอยู่ใต้ร่มไม้ก็ยิ่งสบายเพราะไม่ต้องรับแสงแดดโดยตรง จึงสรุปได้ว่า ความรู้สึกสบายเกิดจากปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากร่างกายออกสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณที่เหมาะสมกับความรู้สึกสบายของบุคคล

ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศ (air change per hour, ach) คือ ปริมาณการถ่ายเทอากาศคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง ในปัจจุบัน เทศบัญญัติมีกระบวนให้อาคารจอครถได้คินต้องมีปริมาณการถ่ายเทอากาศไม่น้อยกว่า 4 ach อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบมักจะออกแบบที่ประมาณ 6 ach เนื่องจากพฤติกรรมการใช้รถที่ไม่เหมาะสม เช่น การติดเครื่องยนต์ทิ้งไว้เป็นต้น

โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศเป็นดังนี้

ห้องใช้งานทั่วไป	15 ach
ห้องเก็บของ	10 ach
ห้องน้ำ	20 – 30 ach
ห้องเครื่อง/โรงงาน/ห้องครัว	30 – 40 ach (เกชา ธีระ โกเมน, www, 2000)

2.3 การพาอิสระ

ความแตกต่างของการพาอิสระ (หรือ การพาโดยธรรมชาติ (natural convection)) กับ การพาโดยบังคับ (forced convection) คือ การเคลื่อนที่ของของไหลในการพาอิสระเกิดจากแรงลอยตัว (buoyancy) ในขณะที่การเคลื่อนที่ของของไหลในการพาโดยบังคับเกิดจากแรงที่กระทำจากภายนอก เช่น พัดลม (fan) และ บLOWER (blower) เป็นต้น

ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อน คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection heat transfer coefficient, h) มีหน่วยเป็น $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุเป็นสำคัญ กล่าวคือ หากของไหลไหลด้วยความเร็วสูง ย่อมหมายถึงว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงด้วย (เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลได้มากกว่า) แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นของของไหลในการพาอิสระมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การพาโดยบังคับ (โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าน้อยกว่า 1 m/s) จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการพาอิสระส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าการพาโดยบังคับ

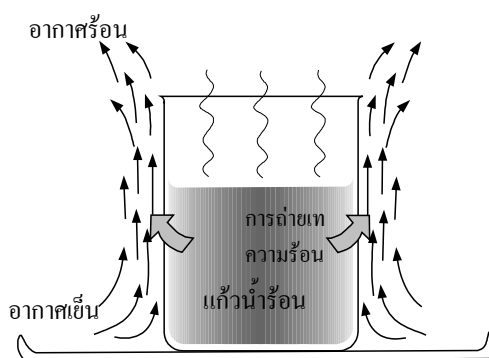
อุปกรณ์หลายอย่างมีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาอิสระ เพราะในการพาอิสระไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์กลใด ๆ ในการทำให้เกิดการไหลของของไหล จึงง่ายและประหยัดกว่าการพาโดยบังคับ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาอิสระเป็นกลไกพื้นฐานที่เกิดขึ้นของ

กระบวนการการถ่ายเทความร้อนที่พบเห็นได้ทั่วไป ตัวอย่างเช่น การทำความเย็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการถ่ายเทความร้อนออกจากร่างกายของมนุษย์และสัตว์

ก่อนที่จะดำเนินการวิจัย ควรศึกษาเกี่ยวกับกลไกทางฟิสิกส์ของการพาอิสระ ตลอดจนตัวแปรไร้มิติ (dimensionless variable) ที่สำคัญของการพาอิสระ นั่นคือ ค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.1 กลไกทางฟิสิกส์ของการพาอิสระ

แก๊วน้ำร้อนที่วางบนแผ่นราบดังรูปที่ 2.1 จะถูกทำให้เย็นลงด้วยอากาศที่ล้อมรอบ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นประกอบด้วย การพาความร้อนจากน้ำสู่แก๊วน้ำสู่อากาศ และการแผ่รังสีความร้อนจากแก๊วน้ำสู่พื้นผิวอื่น ๆ ที่อยู่โดยรอบ หากไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีแล้ว สามารถอธิบายกลไกทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นจากการทำความเย็นของแก๊วน้ำร้อน (หรือวัตถุร้อนอื่น ๆ) ด้วยอากาศที่แวดล้อมซึ่งเย็นกว่าได้ดังนี้



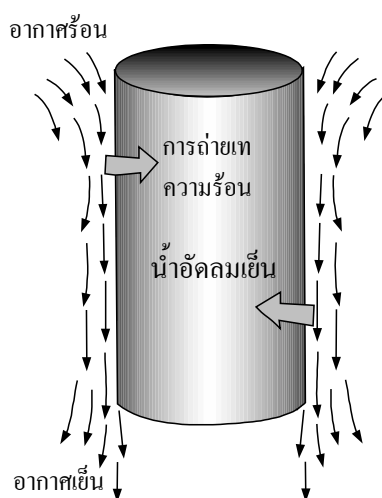
รูปที่ 2.1 การพาอิสระของแก๊วน้ำร้อน

ในช่วงแรก อุณหภูมิน้ำจะต่ำลง ส่วนอุณหภูมิของอากาศบริเวณใกล้ผิวของแก๊วน้ำจะสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการนำความร้อนจากน้ำสู่แก๊วน้ำ และจากแก๊วน้ำสู่อากาศ ดังนั้น แก๊วน้ำจึงถูกล้อมรอบด้วยชั้นบาง ๆ ของอากาศที่ร้อนขึ้น กระบวนการลดความร้อนของแก๊วน้ำจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ เพราะแก๊วน้ำถูกล้อมรอบด้วยชั้นของอากาศร้อนอยู่เสมอ โดยไม่มีโอกาสสัมผัสกับอากาศเย็นที่อยู่ชั้นที่ไกลออกไป

อุณหภูมิของอากาศที่ล้อมรอบแก๊วน้ำที่ร้อนขึ้น ทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง (หากพิจารณาที่ความดันคงที่ ความหนาแน่นของแก๊สจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) และถูกล้อมรอบด้วยชั้นของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า ความแตกต่างของความหนาแน่นทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงดันสถิตย (hydrostatic pressure) ซึ่งเป็น

แรงขับเคลื่อนให้อากาศร้อนที่ชั้นซิดผิวของแก้วน้ำลอยตัวสูงขึ้น และอากาศซึ่งเย็นกว่าด้านนอกออกไปก็จะไหลเข้ามาแทนที่ การลอยตัวขึ้นของอากาศร้อนและการไหลของอากาศเย็นเข้ามาแทนที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิของแก้วน้ำเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่แวดล้อม เรียกการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากการแทนที่อากาศร้อนด้วยอากาศเย็นบริเวณใกล้เคียงซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องนี้ว่า “กระแสการพาอิสระ (free convection current)” และเรียกการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกิดจากกระแสการพาอิสระนี้ว่า “การถ่ายเทความร้อนโดยการพาอิสระ (free convection heat transfer)”

การกล่าวที่ผ่านมาเป็นการพาอิสระที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดความร้อน ในทางกลับกัน การพาอิสระสามารถเกิดในกระบวนการให้ความร้อนสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิเย็นกว่าสิ่งแวดล้อมได้ เช่น นำกระป๋องน้ำอัดลมที่เย็นจัดมาวางที่อุณหภูมิห้องซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของกระป๋องน้ำอัดลม อากาศที่ล้อมรอบจะถ่ายเทความร้อนให้กับกระป๋องน้ำอัดลม ในกรณีนี้ การเคลื่อนที่ของอากาศด้านนอกจะเกิดในทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีแรก นั่นคือ อากาศจะเคลื่อนตัวลง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การพาอิสระของวัตถุเย็น

พิจารณาสนามแรงโน้มถ่วง จะเกิดแรงลัพธ์สุทธิที่คั่นของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำให้ลอยตัวขึ้น เพื่อให้ของไหลที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเข้ามาแทนที่ แรงที่กระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ในของไหลในทิศขึ้นนี้ เรียกว่า “แรงลอยตัว (buoyancy force)” ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ นั่นคือ

$$F_{\text{buoyancy}} = \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{body}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ_{fluid} คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของของไหล
 g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วง (gravitational acceleration)
 V_{body} คือ ปริมาตรส่วนที่จมอยู่ในของไหลของวัตถุ (ถ้าวัตถุจมอยู่ในของไหลทั้งหมด เอมนี้จะมีค่าเท่ากับปริมาตรทั้งหมดของวัตถุนั้น)

หากยังไม่พิจารณาถึงแรงอื่น ๆ ที่กระทำต่อวัตถุแล้ว แรงสุทธิที่กระทำต่อวัตถุในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ ส่วนต่างระหว่างน้ำหนักของวัตถุและแรงลอยตัว ดังสมการ

$$\begin{aligned} F_{\text{net}} &= W - F_{\text{buoyancy}} \\ &= \rho_{\text{body}} g V_{\text{body}} - \rho_{\text{fluid}} g V_{\text{body}} \\ &= (\rho_{\text{body}} - \rho_{\text{fluid}}) g V_{\text{body}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.2) จะเห็นว่า แรงสุทธิแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลกับ วัตถุที่จมอยู่ในของไหลนั้น ๆ น้ำหนักที่หายไปของวัตถุที่จม (weight loss) จะมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุแทนที่ ตามหลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle)

หากพิจารณาสมการ (2.2) ประกอบกับรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นกระบวนการลดความร้อนของแก้วน้ำ ρ_{body} คือความหนาแน่นของอากาศร้อน ดังนั้น แรงสุทธิที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางขึ้นด้านบน ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอากาศขึ้นด้านบน ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

ตัวแปรหลักที่สำคัญสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อน คือ อุณหภูมิ จากสมการของแรงสุทธิซึ่งเป็นฟังก์ชันของผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของไหลบริเวณใกล้กับผิววัตถุ และของไหลบริเวณไกลออกไปนั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิได้ โดยใช้สมการของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (volumetric thermal expansion coefficient, β) นิยามโดย

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.3)$$

และสามารถประมาณให้เทอมของอนุพันธ์พาเชียลให้เป็นเทอมผลต่างเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ได้ดังนี้

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta \rho}{\Delta T} \right) \rightarrow \Delta \rho \approx -\rho \beta \Delta T \quad (2.4)$$

หากพิจารณาให้ของไหลเป็นแก๊สในอุดมคติ (ideal gas) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ $p = \rho RT$ สามารถหาค่า β ได้จากความสัมพันธ์

$$\beta_{\text{ideal gas}} = \frac{1}{T} \quad (2.5)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) ขนาดของตัวแปร β ของของไหลใด ๆ แสดงถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยหาก β มีค่ามาก หมายถึง ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อให้อุณหภูมิเปลี่ยนไป ส่วนเทอม $\beta \Delta T$ แสดงถึงสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของไหลซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อพิจารณาให้ความดันคงที่ ซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่าแรงลอยตัวแปรผันตรงกับผลต่างของความหนาแน่น ย่อมหมายถึงแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิด้วย ดังนั้น หากผลต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลบริเวณใกล้กับวัตถุกับของไหลที่บริเวณไกลออกไปมีค่ามาก ก็จะเกิดแรงลอยตัวได้มาก ทำให้เกิดกระแสการพาอิสระมากขึ้นเป็นสัดส่วนกัน และทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นด้วย

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาอิสระที่พิจารณาระหว่างพื้นผิววัตถุใด ๆ กับของไหลจะมีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับอัตราการไหลโดยมวล (mass flow rate) ของของไหล หากอัตราการไหลโดยมวลมีค่าสูงก็จะเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงตามไปด้วย การถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะไม่มีการใช้เครื่องเป่าลม (blower) จึงไม่สามารถควบคุมปริมาณอัตราการไหลได้โดยตรง ทั้งนี้อัตราการไหลที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดยการสมดุลพลวัต (dynamic balance) ของแรงลอยตัวและแรงเสียดทาน

ดังได้ไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่า แรงลอยตัวเกิดจากผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของไหลที่ร้อน (หรือเย็น) บริเวณใกล้กับพื้นผิวของวัตถุกับของไหลที่เวดล้อมวัตถุนั้น ๆ ซึ่งแรงลอยตัวจะแปรผันตรงกับผลต่างของความหนาแน่นนี้ และปริมาตรที่วัตถุร้อนบรรจุอยู่ เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อมีวัตถุสองชนิดสัมผัสกัน (ของแข็ง-ของแข็ง ของแข็ง-ของไหล หรือ ของไหล-ของไหล) โดยมีการเคลื่อนที่ร่วมด้วย จะก่อให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวสัมผัสนั้น ๆ ในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของไหลช้าลง และอัตราการไหลของของไหลลดลง

232 ค่าเลขกราชอฟ (The Grashof Number)

เป็นค่าเลขไร้มิติที่ควบคุมขอบเขตการไหลของการพาอิสระซึ่งนิยามโดยสัดส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงเนื่องจากความหนืด (viscous force) ที่กระทำต่อของไหล ดังนี้

$$\text{Gr} = \frac{\text{buoyancy force}}{\text{viscous force}} = \frac{g\Delta\rho V}{\rho\nu^2} = \frac{g\beta\Delta TV}{\nu^2} \quad (2.6)$$

(ถ้าการไหลเกิดจากการพาโดยบังคับ จะใช้ค่าเลขเรย์โนลด์ในการควบคุมขอบเขตของการไหล ซึ่งนิยามโดยสัดส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงเนื่องจากความหนืด)

สามารถเขียนสมการ (2.6) ใหม่ในรูปที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากสนามแรงโน้มถ่วง, m/s^2

β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร, $1/\text{K}$ (สำหรับแก๊สในอุดมคติมีค่าเท่ากับ $1/T$)

T_s = อุณหภูมิของพื้นผิว, K

T_∞ = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ไกลจากพื้นผิว, K

x = ความยาวคุณลักษณะของโครงร่าง, m

ν = ความหนืดจลนศาสตร์ของของไหล, m^2/s

การพิจารณาว่าการไหลจะอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนสามารถพิจารณาได้จากขนาดของค่าเลขกราชอฟ สำหรับการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งนั้น ค่าเลขกราชอฟต้องไม่มากกว่า 1×10^9 จึงจะเป็นการไหลในช่วงราบเรียบ หากมากกว่านี้จะเป็นการไหลในช่วงปั่นป่วน (Cengel, 1998)

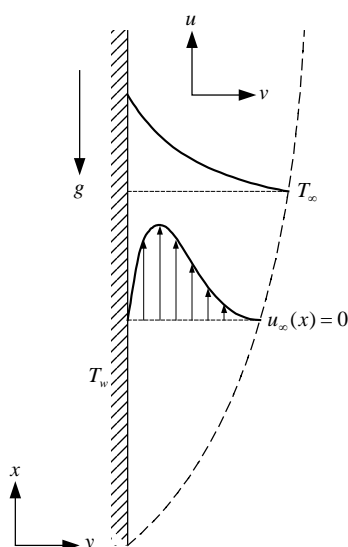
อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของของแข็งสู่ของไหลที่อยู่โดยรอบในการไหลแบบการพาอิสระสามารถคำนวณได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการ

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายเท และ h คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวนั้น ๆ

233 การพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

ปัญหาการไหลพื้นฐานของการไหลแบบการพาอิสระ คือ ปัญหาการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งซึ่งมีอุณหภูมิของแผ่นร้อนคงที่ การไหลในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นผิวบาง (boundary layer) ของการไหลขึ้น โดยมีจุดเริ่มต้นที่ขอบนำ (leading edge) ของแผ่นร้อน พิจารณาให้อากาศโดยรอบของแผ่นร้อนเป็นอากาศนิ่ง (ความเร็วเท่ากับศูนย์) และมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ระยะไกล (T_∞) ที่พื้นผิวของผนังมีเงื่อนไขการไหลเป็นแบบไม่ลื่นไถล (no-slip condition) ดังนั้น ความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งนี้จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ (พิจารณาให้แผ่นร้อนหยุดนิ่ง) ความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างแผ่นร้อนกับอากาศที่ระยะไกลทำให้เกิดแรงลอยตัว ส่งผลให้อากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้น ความเร็วสูงสุดของอากาศร้อนเกิดในช่วงของชั้นผิวบาง และเข้าสู่ศูนย์อีกครั้งที่ความหนาของความชั้นผิวบาง (boundary layer thickness) พอดี ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนอุณหภูมิของอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ผิวของแผ่นร้อนซึ่งเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นร้อน (T_w) พอดี และลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่เวดล้อมที่ความหนาของชั้นผิวบางเช่นกัน การเกิดขึ้นผิวบางนี้ในช่วงแรกจะเป็นแบบราบเรียบ และหากความยาวของแผ่นร้อนมีค่ามากพอก็อาจจะก่อให้เกิดชั้นผิวบางในช่วง transition และ turbulent ได้ ขึ้นอยู่กับค่าเลขกราชอฟของการไหล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวของแผ่นร้อนและผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างแผ่นร้อนกับของไหลที่ระยะไกล



รูปที่ 2.3 การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

2.3.4 สมการชั้นผิวบาง (The Boundary Layer Equations)

สมการของปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งมีรูปแบบเช่นเดียวกันกับสมการแม่บทของการไหลในชั้นผิวบาง (the governing boundary-layer equations) ของแผ่นในแนวนอน ยกเว้นแต่ว่าในสมการของปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งจะมีเทอมของแรงลอยตัวเพิ่มเข้ามาในสมการอนุกรมโมเมนตัม

หากพิจารณาให้ของไหลเป็นของไหลที่ไม่อัดตัว สมการอนุกรมโมเมนตัมในแนวแกน X ซึ่งกำหนดให้มีทิศทางเดียวกันกับความยาวของแผ่นร้อน เมื่อพิจารณาการไหลใน 2 มิติ เป็นดังนี้

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.9)$$

โดย ρg เป็นเทอมของแรงเนื่องจากน้ำหนัก (body force, \mathbf{X}) ของของไหล

สมการชั้นผิวบางดังแสดงในสมการ (2.9) นั้นเป็นสมการที่ได้จากการพิจารณาให้ของไหลเป็นของไหลที่ไม่มีการอัดตัว ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าของไหลที่ไม่อัดตัวคือของไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น ข้อมหมายถึงจะไม่เกิดแรงลอยตัวของไหลส่งผลให้ไม่มีการพาอิสระเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม มีฟังก์ชันการประมาณการ เรียกว่า “Boussinesq approximation” ซึ่งเป็นทฤษฎีการประมาณการที่นำมาใช้เพื่อประมาณให้ค่าความหนาแน่นของของไหลในทุก ๆ เทอมของสมการเป็นค่าคงที่ ยกเว้นในเทอมของแรงเนื่องจากน้ำหนักของของไหล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยนี้ก่อให้เกิดแรงลอยตัวขนาดใหญ่ได้

กรณีการไหลผ่านแผ่นร้อนในชั้นผิวบางนี้ สามารถประมาณให้เกรเดียนต์ของความดันในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นร้อนมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์ ดังสมการ (2.10)

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

ผลพวงของสมการ (2.10) ความดันภายในช่วงของชั้นผิวบางจะเหมือนกับความดันของของไหลหนึ่งที่อยู่ห่างออกไปจากชั้นผิวบาง ซึ่งยังผลให้

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\text{boundary layer}} = \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{\text{free stream}} = -\rho_{\infty} g \quad (2.11)$$

ดังนั้น สมการอนุรักษ์โมเมนตัมภายในชั้นพืดบางจะกลายเป็น

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = g(\rho_{\infty} - \rho) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.12)$$

หากหารตลอดสมการด้วยค่าความหนาแน่นที่สมมติให้เป็นค่าคงที่ (ยกเว้นที่เทอมของน้ำหนักของของไหล) จะได้ว่า

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{\rho} (\rho_{\infty} - \rho) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.13)$$

สามารถเขียนเทอมผลต่างของความหนาแน่นในสมการ (2.13) ในรูปของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรทางความร้อน (volumetric thermal expansion coefficient, β) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ นิยามโดย

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.14)$$

โดยปกติแล้วสำหรับการไหลแบบการพาความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถประมาณหาค่า β ได้โดยใช้ Boussinesq approximation ดังนี้

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \quad (2.15)$$

แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการโมเมนตัม จะได้ว่า

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.16)$$

สำหรับสมการ (2.16) นี้ จะเห็นว่าไม่ปรากฏเทอมของความหนาแน่นในสมการอีกต่อไป และแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของ β (ซึ่งเป็นคุณสมบัติของของไหล) กับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นร้อนและของไหลที่ล้อมรอบ

หากพิจารณาให้ของไหลที่ล้อมรอบเป็นก๊าซในอุดมคติ (ideal gas) จะสามารถหาค่า β ได้โดยแทนสมการสถานะ (equation of state, $\rho = p / RT$) ลงในสมการ (2.14) จะได้ว่า

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{p}{RT} \right)_p = \frac{1}{\rho} \frac{p}{RT^2} = \frac{RT}{p} \frac{p}{RT^2} = \frac{1}{T} \quad (2.17)$$

โดยอุณหภูมิต่างที่แทนค่าต้องเป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

เทอมของแรงลอยตัวจะปรากฏในสมการ โมเมนต์เท่านั้น ส่วนสมการอนุรักษ์มวล และสมการอนุรักษ์พลังงานมีรูปเหมือนกันกับสมการของการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นแนวนอน (boundary layer flow over a flat plate) สามารถเขียนสมการแม่บทที่อธิบายถึงการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งได้ดังชุดของสมการด้านล่าง ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.19)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.20)$$

พิจารณาสมการอนุรักษ์พลังงานจะเห็นว่าเทอมการสูญเสียเนื่องจากความหนืด (viscous-dissipation term) หายไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าโดยปกติแล้วความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลในลักษณะนี้มีค่าต่ำมาก เทอมนี้จึงมีค่าน้อยจนสามารถตัดทิ้งได้

จากสมการแม่บทของการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง จะเห็นว่าสมการอนุรักษ์โมเมนต์ในทิศทางกรไหลจะเกี่ยวพัน (couple) กับสมการอนุรักษ์พลังงาน เพราะ

มีตัวแปรอุณหภูมิที่ติดอยู่กับเทอมของแรงลอยตัว นอกจากนี้สมการอนุรักษ์พลังงานยังเกี่ยวพันอยู่กับสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลด้วยตัวแปรความเร็ว u และ V ที่ปรากฏในเทอมการพา (convection term)

24 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการถ่ายเทธรรมชาติอย่างเป็นระบบมีตั้งแต่ทศวรรษที่ 20 เป็นต้นมา ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านจากหลายประเทศทำการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อการอยู่อาศัยที่รู้สึกสบาย และส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย ทั้งยังช่วยประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติส่วนใหญ่จะศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากการทำให้เกิด stack effect โดยการทำให้มีช่องทางเข้าและทางออกของอากาศที่อยู่ต่างระดับกัน ดังได้กล่าวไว้ในส่วนต้นของบทนี้ การใช้ปล่องหรือช่องว่างอากาศเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเกิด stack effect ที่นักวิจัยให้ความสนใจและทำการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ความแตกต่างของงานวิจัยส่วนใหญ่อยู่ที่การออกแบบลักษณะของปล่อง หรือลักษณะของอาคาร เช่น ความสูงหรือขนาดของปล่อง ความเอียงของหลังคา ขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดต่าง ๆ เป็นต้น โดยมีทั้งการศึกษาเชิงตัวเลข และเชิงทฤษฎี ตลอดจนการทำการทดลอง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่จะทำการนำเสนอต่อไปนี้

พบบางงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ stack effect เพื่อนำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านปล่องลมแดด และนำพลังงานจากการเคลื่อนที่ของอากาศเพื่อไปหมุนกังหันเทอร์ไบน์ และนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแบบต่อเนื่อง โดยมีทั้งการศึกษาและวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี (Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) และการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การไหล “โมย่า” ในการจำลองระบบ (Chitsomboon and Unthmesra (1999)) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากแสงแดดผ่านปล่องลมแดด ตลอดจนมีการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาในเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลข (Chitsomboon, 2001) ซึ่งสนับสนุนกันเป็นอย่างดี ส่วนประกอบสำคัญของระบบปล่องลมแดดมี 3 ส่วน คือ หลังคารับแดด (transparent roof) ซึ่งยกตัวสูงอยู่เหนือระดับพื้นดิน, กังหันเทอร์ไบน์ (turbine) ติดตั้งไว้ภายในปล่องบริเวณที่มีความเร็วของอากาศสูงที่สุด และปล่อง (chimney) ที่มีลักษณะเป็นปล่องทรงกระบอกวางตัวอยู่ตรงกลางของหลังคารับแดดพอดี หลักการทำงานของระบบปล่องลมแดดอย่างกว้าง ๆ คือ การใช้พลังงานแสงแดดเพื่ออุ่นอากาศใต้หลังคารับแดดให้ร้อนขึ้น โดยปรากฏการณ์เรือนกระจก จากนั้นอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นเข้าไปในปล่องลมตามหลักการของการพาอิสระ อากาศที่ลอยตัวสูงขึ้นด้วยความเร็วนี้จะถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับกังหันเทอร์ไบน์ซึ่งสามารถนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทน

แหล่งใหม่ที่ราคาถูก ประหยัด และสะอาดปราศจากมลพิษ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นประโยชน์ของการใช้ปล่องลมดูดในด้านอื่นนอกเหนือจากการใช้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศภายในอาคาร

Li (2000) ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีถึงการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ โดยอาศัยหลักการของ stack effect ด้วยการสร้างห้องสี่เหลี่ยมที่มีช่องเปิดให้อากาศไหลเข้าที่ด้านล่างของผนังข้างซ้าย และช่องให้อากาศไหลออกที่ด้านบนของผนังข้างขวา จำลองการเพิ่มขึ้นของความร้อนด้วยการกำหนดให้มีแหล่งกำเนิดความร้อนหรือแหล่งกำเนิดแรงลอยตัว (buoyancy source) อยู่ตรงกลางของพื้นที่ห้อง ในการศึกษาได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นสอง 2 รูปแบบ มีชื่อว่า ‘empty air filling-box’ model I และ ‘empty air filling-box’ model II ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองของงานวิจัยที่ได้ศึกษาไว้แล้วก่อนหน้านี้ ได้แก่ ‘fully-mixed’ model (Andersen, 1995) (เป็นแบบจำลองที่สมมติให้อุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งห้อง โดยผนังทุกด้านมีลักษณะเป็นผนังฉนวนสมบูรณ์ และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในห้องสูงกว่าอากาศที่อยู่ภายนอกเสมอ) และอีกหนึ่งงานวิจัยคือ ‘emptying water-filling box’ model (Linden, Lane and Smeed, 1990) (ในแบบจำลองได้แบ่งอากาศเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านล่างซึ่งจะมีคุณสมบัติของอากาศเหมือนกับอากาศภายนอก และชั้นของอากาศด้านบนซึ่งอากาศบริเวณนี้จะเป็นอากาศอุ่นกว่าทำให้ความหนาแน่นน้อยกว่า) ความแตกต่างของแบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่เมื่อเปรียบเทียบกับสองแบบจำลองที่มีอยู่เดิมคือ ในแบบจำลองใหม่ได้พิจารณาผลกระทบเนื่องจากการแพร่ของความร้อนระหว่างผนังที่มีต่อระบบด้วย โดยยังคงแบ่งอากาศภายในอาคารออกเป็น 2 บริเวณ และกำหนดให้อุณหภูมิของอากาศด้านล่างมีค่ามากกว่าอุณหภูมิภายนอก ส่วนจะมากกว่าเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหลของอากาศโดยรวม โดยหากค่าอัตราการไหลของอากาศสูงอุณหภูมิของอากาศบริเวณด้านล่างก็จะเข้าไปใกล้อุณหภูมิของอากาศภายนอกมากยิ่งขึ้น ทำการสร้างสมการในการคำนวณหาตัวแปรที่มีผลต่อระบบต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของอากาศ (the ventilation airflow rate) ความสูงที่ทำให้ความดันภายในและภายนอกห้องมีค่าเท่ากัน (the neutral level height) และความสูงของชั้นอากาศบริสุทธิ์เมื่อเกิดการถ่ายเทอากาศ (clean zone height หรือ the stratification interface level, SIL) กำหนดให้ระยะห่างในแนวดิ่งระหว่างช่องเปิดทั้งสองของแบบจำลองที่ทำการศึกษาเท่ากับ 6 m และสมมติให้ผนังทุกด้านเป็นผนังฉนวนสมบูรณ์ จากผลลัพธ์พบว่า หากพิจารณาที่พื้นที่ช่องเปิดเข้าใกล้ศูนย์แล้วค่าทั้งสองที่ได้จากทุกแบบจำลองจะออกมาเหมือนกัน และเริ่มแตกต่างกันเมื่อพื้นที่ช่องเปิดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ‘fully mixed’ model จะให้ค่า SIL เท่ากับความสูงของอาคารซึ่งหมายถึงสามารถถ่ายเทอากาศได้ทั้งห้องโดยสม่ำเสมอ อีกทั้งยังให้ค่าอัตราการไหลของอากาศสูงมาก ($0.72 \text{ m}^3/\text{s}$) ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากสมมุติฐานที่ให้คุณสมบัติของอากาศภายในตัวอาคารทั้งหมดสม่ำเสมอ (uniform) หรือเป็น fully mixed นั่นเอง ในการทำนายค่า neutral level height พบว่า

ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เกิดความขัดแย้งกัน นั่นคือ จาก ‘fully mixed’ model จะให้ค่า neutral level height คงที่และมีค่าน้อยที่สุดไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงพื้นที่ช่องเปิดเป็นเท่าใดก็ตาม ส่วนจากแบบจำลองอื่น ๆ ที่เหลือ พบว่าค่านี้เพิ่มขึ้นเมื่อให้พื้นที่ช่องเปิดเพิ่มขึ้น และ ‘emptying water-filling box’ model จะให้ค่านี้ออกมาสูงที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้จะเห็นว่าไม่มีการกล่าวถึงลักษณะของการกระจายตัวของอนุภาคน้ำภายในห้อง และที่น่าแปลกคือ การจำลองให้แหล่งความร้อนหรือแหล่งกำเนิดแรงลอยตัวไว้ที่พื้นด้านล่าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วงานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการกำหนดให้แหล่งความร้อนอยู่ส่วนบนของอาคาร เช่น หลังคา หรือปล่อง เพราะเป็นส่วนที่จะได้รับความร้อนจากแสงแดดได้มากที่สุด

Chen, Li, and Mahoney (2001) เสนอเทคนิคในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติภายในอาคารห้องเดี่ยว โดยใช้หลักการของ electrolytic (การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนไปยังขั้วไฟฟ้า) เพื่อสร้างฟองของก๊าซไฮโดรเจนขนาดเล็ก ๆ เรียกกระบวนการนี้ว่า “fine-bubble technique” เพื่อช่วยในการสังเกตพฤติกรรมของการเกิด SIL จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปเปรียบเทียบกับผลการทำนายทางทฤษฎีของงานวิจัยในอดีต (Linden, Lane-Serff and Smeed, 1990) โดยพิจารณาแหล่งกำเนิดแรงลอยตัว ทั้งที่เป็นแบบ point source และ line source แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองขนาดเล็ก (small-scale) โดยสร้างห้องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กให้ลอยอยู่ในห้องซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ห้องเล็กเปรียบได้กับอาคารที่ต้องการพิจารณาโดยมีช่องเปิดอยู่ที่พื้นด้านล่างและด้านบน ห้องใหญ่เป็นขอบเขตของสิ่งแวดล้อมที่ล้อมรอบตัวอาคาร (ซึ่งค่อนข้างขัดแย้งกับลักษณะของอาคารในความเป็นจริงพอสมควร เนื่องจากการกำหนดตำแหน่งของช่องทางให้อากาศไหลเข้าอยู่ที่พื้นด้านล่าง ซึ่งไม่สอดคล้องกับลักษณะของอาคารหรือบ้านในปัจจุบันซึ่งส่วนใหญ่จะปลูกสร้างให้พื้นติดกับพื้นดิน แต่ก็อาจเป็นไปได้ว่างานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับอาคารหรือห้องพักที่อยู่ชั้น 2 เป็นต้นไป เพราะสามารถสร้างช่องให้อากาศไหลเข้าอยู่ที่พื้นได้) ความโดดเด่นของงานวิจัยอยู่ที่การศึกษาด้วยกรรมวิธีความเสมือน (similarity method) เพื่อหาตัวแปรไร้มิติ (dimensionless variable) โดยมีช่องไหลทำงานที่เลือกศึกษาคือน้ำ ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ fine-bubble technique พบว่า ตำแหน่งของการเกิด SIL สอดคล้องกันกับผลจากการทำนายทางทฤษฎีของงานวิจัยในอดีต นอกจากนี้ยังพบว่ามีความเหมือนกันของแบบจำลองกับต้นแบบอีกด้วย งานวิจัยได้สรุปถึงข้อดีของแบบจำลองด้วย fine-bubble technique นี้ว่ามีขนาดเล็ก และกะทัดรัดกว่าแบบจำลองเดิมในอดีต อีกทั้งยังประหยัดกว่า ลักษณะพิเศษของงานวิจัยนี้คือมีการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างกว้างขวางหากผลการวิเคราะห์นี้มีความถูกต้อง เพราะการใช้

ของไหลเป็นน้ำนั้นจะสามารถจำลองด้วยแบบจำลองที่มีขนาดเล็กลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการทำการทดลองได้เป็นอย่างมาก

Chen and Li (2002) ศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อหาสมการในการหาค่า SIL และอัตราการไหลของอากาศของระบบการถ่ายเทอากาศด้วยการไหลจากแรงลอยตัว ลักษณะของอาคารที่ทำการศึกษาคือเป็นอาคารห้องเดียวที่มีช่องเปิดทั้งหมด 3 ระดับด้วยกัน โดยมีอากาศไหลเข้าผ่านช่องเปิดด้านล่างของผนังด้านซ้าย และไหลออกที่ช่องเปิดด้านบนที่อยู่บนเพดานเสมอ ส่วนช่องเปิดกลางที่อยู่ผนังด้านเดียวกับทางเข้านั้นอากาศอาจจะไหลเข้าหรือไหลออกก็ได้ขึ้นอยู่กับความสูงจากพื้นของตำแหน่งช่องเปิดกลางและตำแหน่งของการเกิด neutral pressure level ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกับกรณีทดสอบ 3 กรณี คือ 1) ให้ตำแหน่งของช่องเปิดกลางอยู่ที่ SIL ในกรณีนี้อากาศจะไหลเข้าผ่านช่องเปิดกลาง 2) ให้ตำแหน่งของช่องเปิดกลางอยู่เหนือ SIL แต่อยู่ที่ the neutral pressure level ซึ่งในกรณีนี้อากาศจะไหลเข้าผ่านช่องเปิดกลาง และ 3) ให้ตำแหน่งของช่องเปิดกลางอยู่เหนือ SIL และ the neutral pressure level กรณีนี้อากาศจะไหลออกผ่านช่องเปิดกลาง โดยศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า SIL พบว่า ค่า SIL จะเป็นฟังก์ชันของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง (the geometrical parameters) ของอาคารเท่านั้น และเป็นอิสระต่อความเข้มของแหล่งกำเนิดแรงลอยตัว นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของช่องเปิดทั้งสามมีผลต่อลักษณะการไหลที่จะเกิดขึ้นทั้ง 3 กรณี เช่น หากให้ช่องเปิดด้านล่างมีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดอื่น ๆ พบว่า การไหลในกรณีที่ 1 จะให้ค่า SIL ออกมาสูงที่สุด แต่การไหลในกรณีที่ 2 จะให้ค่าอัตราการไหลสูงที่สุด เป็นต้น

Awbi (1996) ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติด้วยกรรมวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ชื่อว่า “VORTEX” โดยพิจารณาการไหลทั้งที่เกิดจากแรงลม และแรงลอยตัว ตัวแปรที่ให้ความสนใจ ได้แก่ ความเร็วในการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และคุณภาพของอากาศภายในอาคาร (การกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)) อาคารที่ทำการศึกษามี 2 ลักษณะ คือ ห้องทำงาน (office room) และห้องโถงใหญ่ (atrium) คณะวิจัยกล่าวว่าความยากของการออกแบบระบบอยู่ที่มีการควบคุมปริมาณการไหลของอากาศและการเคลื่อนที่ของอากาศภายในอาคาร จากผลลัพธ์พบว่าหากไม่พิจารณาการถ่ายเทที่เกิดจากแรงลมแล้ว การไหลเนื่องจากแรงลอยตัวสามารถถ่ายเทอากาศผ่านช่องเปิดได้อย่างพอเพียง และสามารถลดระดับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

Bender and Stowell (1998) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในโรงนา โดยการสร้างปล่องไว้บนหลังคา โรงนาที่ทำการศึกษามี 2 ชั้น ชั้นล่างของโรงนาใช้เป็นคอกของสัตว์เลี้ยง เช่น หมู วัว เป็นต้น ส่วนชั้น 2 ที่ติดกับหลังคาใช้เพื่อเก็บผลผลิตและอาหารสัตว์ เช่น หญ้า เป็นต้น ในงานวิจัยกล่าวถึงการวิเคราะห์หาจำนวนปล่องที่เหมาะสมต่อการถ่ายเท

อากาศโดยธรรมชาติอย่างเพียงพอต่อขนาดของโรงนา โดยไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างปล่อง เช่น ความสูง และขนาดของปล่อง นอกจากนี้ยังไม่พิจารณาถึงความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านช่องเปิดในส่วนล่างของโรงนา จนกระทั่งไหลออกที่ปล่อง และไม่กล่าวถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโรงนาแต่อย่างใด ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเพิ่มหรือลดจำนวนของปล่องหรือช่องเปิดทั้งสิ้น

Afonso and Olivera (2000) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการใช้ปล่องลมแดด ในการช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ และปรับปรุงคุณภาพของอากาศภายในอาคาร ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดที่ได้จากการทดลอง โดยได้สร้างเซลล์ทดสอบขึ้นที่เมือง Porto ประเทศโปรตุเกส แบ่งเซลล์ทดสอบเป็น 2 ห้อง แต่ละห้องทดสอบประกอบด้วยปล่องทางเข้าและปล่องทางออกของอากาศซึ่งอยู่ด้านบนของหลังคา ปล่องทางออกของแต่ละห้องทดสอบมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ยกเว้นที่ผนังด้านทิศใต้ของปล่องทางออกอันหนึ่งจะทำจากกระจก เรียกปล่องที่มีผนังด้านทิศใต้ทำจากกระจกนี้ว่า ปล่องลมแดด ส่วนปล่องทางออกของห้องทดสอบที่เหลือมีลักษณะเหมือนปล่องธรรมดาทั่วไป (conventional chimney) พื้นของเซลล์ทดสอบมีขนาดเท่ากับ 12 m^2 ($4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) ผนัง เพดาน และพื้นทำจากคอนกรีต และด้านบนอกหุ้มด้วยฉนวน ในการทดลองใช้ Tracer gas technique เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราการไหลที่เกิดขึ้น โดยมีหลักการคร่าว ๆ คือ ปล่อย tracer gas (ในงานวิจัยใช้ SF_6) เข้าไปในห้องทดสอบโดยควบคุมให้มีการแพร่อย่างคงที่ จากนั้นสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อความเข้มข้นของ tracer gas เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นต่อไป ผู้ทำการวิจัยได้กล่าวถึงจุดเด่นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นว่าเหนือกว่างานวิจัยของท่านอื่น ๆ ในอดีตอยู่ 2 ประการ หนึ่งคือ สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงของลักษณะอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั่วโมงของแต่ละวันเข้าไปในโปรแกรมช่วยในการคำนวณได้ และสองคือมีการพิจารณาการสะสมพลังงานความร้อนภายในผนังของปล่องต่อระบบ ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้กำหนดให้ความดันลอยตัว (buoyancy pressure) ที่เพิ่มขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นระหว่างทางเข้าและทางออกทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเฉพาะที่ (local losses) และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (friction losses) โดยพิจารณาให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีทั้งเกิดจากการพาแบบบังคับ (forced convection) (การไหลโดยแรงลม) และการพาอิสระ (การไหลโดยแรงลอยตัว) พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันดีกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยนักวิจัยได้สรุปไว้ว่า

- ประสิทธิภาพของปล่องแสงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง 10% - 20%

□ การสร้างปล่องแสงอาทิตย์ต้องทำการหุ้มฉนวนด้านนอกทุกครั้ง ไม่เช่นนั้นแล้วจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปล่องแสงอาทิตย์มีค่าลดลงมากกว่า 60% โดยความหนาของฉนวนที่เหมาะสมคือ 5 cm

□ ความหนาของผนังปล่องส่งผลต่ออัตราการไหล และควรเลือกใช้ให้เหมาะสม โดยในตอนกลางวันควรให้ผนังปล่องบางเพื่อลดการสะสมความร้อนในผนัง ส่วนตอนกลางคืนควรให้ผนังปล่องหนาเพื่อเพิ่มการสะสมความร้อนในผนัง และปลดปล่อยออกมา เพื่อช่วยในการเกิดการถ่ายเท ความหนาของผนังปล่องที่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมากนักทั้งในตอนกลางวันและตอนกลางคืน เท่ากับ 10 cm (จะเห็นว่าในความเป็นจริงการแยกใช้ผนังในตอนกลางวันและตอนกลางคืนออกจากกันกระทำได้ยาก โดยหากต้องการให้เกิดการถ่ายเทในตอนกลางคืนได้มากขึ้นก็ต้องใช้ผนังที่หนาดังแต่ในตอนกลางวันเพื่อทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนไว้เพื่อปลดปล่อยออกในตอนกลางคืน แต่ก็ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทในตอนกลางวันลดลง และหากใช้ผนังบางในตอนกลางวันก็จะส่งผลตรงกันข้าม)

□ ความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่าน้อยมาก ทั้งในวันที่มีความเข้มของแสงแดดน้อยและวันที่มีความเข้มของแสงแดดมาก ดังนั้น แบบจำลองจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้

เป็นที่น่าสังเกตว่า สมการสำหรับหาค่าความดันเนื่องจากแรงลอยตัวที่เพิ่มขึ้นนี้ค่อนข้างแตกต่างจากงานวิจัยของท่านอื่น ๆ ในแง่ของการพิจารณาเทอมเกี่ยวกับการสูญเสียที่มีต่อระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว หากเป็นงานวิจัยทั่วไปการศึกษาในเรื่องนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงปริมาณของความสามารถของระบบ จะยังไม่พิจารณาเทอมเกี่ยวกับการสูญเสียนี้ โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก โดยเฉพาะเมื่อค่าอัตราส่วนของความสูงของปล่องต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปล่อง (L/D) มีค่าน้อยมากเช่นนี้ (น้อยกว่า 50) ดังนั้นสมมุติฐานในการสร้างสมการนี้ค่อนข้างล่อแหลมต่อการเกิดความผิดพลาดของผลลัพธ์ที่ได้ แต่สุดท้ายกลับกลายเป็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองนี้มีความสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นที่น่าวิเคราะห์ต่อไปว่าเป็นเพราะเหตุใด

Delgado, Borges, and Conde (1996) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทอากาศ ตลอดจนความดันและอุณหภูมิภายในอาคารที่มีหลายชั้น โดยศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการใช้ปล่อง ลักษณะของอาคารที่ทำการศึกษาในงานวิจัยเป็นอาคาร 2 ชั้น แต่ละชั้นจะเชื่อมต่อกับสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านช่องเปิดซึ่งอยู่ด้านซ้ายของผนัง ส่วนปล่องจะวางอยู่ด้านข้างขวาของอาคาร โดยปล่องจะสูงกว่าอาคารเสมอ และมีช่องเปิดเชื่อมต่อกับแต่ละชั้นของอาคาร ในการจำลองกำหนดให้ชั้นล่างเป็นโรงงาน (workshop) จึงมีความร้อนที่

ปลดปล่อยออกมาจากการทำงาน ส่วนชั้น 2 ของอาคารมีไว้เพื่อใช้ประโยชน์อื่น ๆ ซึ่งไม่มีความร้อนเกิดขึ้น สมมุติฐานที่ใช้คือกำหนดให้อุณหภูมิภายในอาคารแต่ละชั้นมีค่าเป็นเอกลักษณ์ (uniform) และเป็นการพิจารณาที่สภาวะคงตัว ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางลม โดยกำหนดให้ลมไหลจากซ้ายไปขวา (upwind) และไหลจากขวาไปซ้าย (downwind) เมื่อพิจารณาที่ปลายปล่องเปิดและปิด ตามลำดับ ค่าความร้อนที่ใช้ในการจำลองมีสองระดับเพื่อศึกษาผลกระทบจากค่าความร้อนดังกล่าว จากผลการจำลองพบว่า หากพิจารณาที่ค่าความร้อนสูงจะได้อัตราการถ่ายเทอากาศจะมากกว่าการถ่ายเทที่ความร้อนต่ำ ทั้งนี้ทิศทางลมและปล่องล้วนส่งผลกระทบท่ออัตราการถ่ายเทอากาศที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังพบว่านอกจากปล่องจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศแล้วยังช่วยไม่ให้ความร้อนจากชั้นล่างเข้ามาปะปนกับอากาศที่อยู่ชั้น 2 อีกด้วย

Khedari, Hirunlabh, and Bunnag (1997) ทำการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดความสบายเชิงความร้อน (thermal comfort) ภายในบ้านสมัยใหม่ของประเทศไทย โดยออกแบบหลังคา เรียกว่า หลังคาเก็บแสงแดด (Roof Solar Collector, RSC) ซึ่งประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ ส่วนด้านบนเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ดูดซับความร้อนจากพลังงานแสงแดด ส่วนที่สองเป็นช่องว่างที่อากาศร้อนจะไหลตัวเข้าและออก และส่วนที่สามคือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่จะถ่ายเทเข้าไปในอาคาร รูปแบบของ RSC ที่ทำการศึกษาสามรูปแบบ แต่ละรูปแบบได้เลือกใช้วัสดุสามารถหาได้จากท้องถิ่นและนิยมใช้กันอยู่ทั่วไปสำหรับบ้านพักอาศัยหรืออาคารในประเทศไทยในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้สำหรับ RSC แต่ละรูปแบบ

รูปแบบ	วัสดุที่ใช้ทำส่วนด้านบน	วัสดุที่ใช้ทำส่วนด้านล่าง
RSC – M1	กระเบื้องคอนกรีตซีแพค โมเนียร์	ไม้อัดและหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอล์ย
RSC – M2	กระเบื้องคอนกรีตซีแพค โมเนียร์	ยิปซัมบอร์ด
RSC – M3	กระเบื้องคอนกรีตซีแพค โมเนียร์	ยิปซัมบอร์ดและหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอล์ย

ทำการทดลองเพื่อเลือกรูปแบบของ RSC ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้น จากนั้นศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากปัจจัยของโครงสร้าง เช่น ความยาวและมุมเอียงของ RSC ที่มีต่ออัตราการเกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ เมื่อกำหนดให้ความหนาของช่องว่างอากาศ (air gap) (ระยะห่างระหว่างส่วนด้านบนและส่วนด้านล่าง) เท่ากับ 14 cm พื้นที่ยังของ RSC เท่ากับ 2 m² (1m×2 m) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่ารูปแบบของ RSC ที่เหมาะสมที่สุดคือ RSC – M2 จากนั้นศึกษาผลกระทบจากความยาวและมุมเอียงของ RSC – M2 หาก

พิจารณาให้ความเข้มของแสงแดดที่ตกกระทบหลังคาของที่และเพิ่มขนาดมุมเอียงของ RSC ไปเรื่อย ๆ พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมุมเอียงมีขนาดเท่ากับ 45° อัตราการไหลของอากาศจึงเริ่มมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความยาวของ RSC เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความยาวของ RSC เท่ากับ 100 cm อัตราการไหลของอากาศจึงค่อนข้างคงที่ คณะวิจัยได้สรุปว่า มุมเอียงของ RSC ที่เหมาะสมที่สุดควรเท่ากับ 30° และความยาวของ RSC ที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 100 cm – 200 cm ซึ่งจะก่อให้เกิดอัตราการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่มากที่สุด ค่าอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง $0.08 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2 - 0.15 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ และจากการคำนวณพลังงานที่ถูกสะสมโดย RSC มีค่าอยู่ระหว่าง $150 \text{ W}/\text{m}^2 - 350 \text{ W}/\text{m}^2$ คณะวิจัยคาดว่าระบบ RSC นี้จะสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติได้ อีกทั้งยังประหยัด เพราะสามารถใช้วัสดุที่มีใช้ในท้องถิ่นอยู่แล้วในการทำโครงสร้างของระบบ

ภายหลังจากทำการทดลองและพบว่ารูปแบบของ RSC แบบใดที่เหมาะสมมากที่สุดแล้ว ทางคณะวิจัยซึ่งนำโดย Khedari ได้ทำการศึกษาต่อตั้งเอกสารงานวิจัยของ Hirunlabh, Wachirapuwadon, Pratinthong, and Khedari (2001) ซึ่งทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหลังคาเก็บแสงแดด (RSC) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขถึงสมรรถนะในการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติของ RSC โดยพิจารณาจากอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้น การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถช่วยให้การวิเคราะห์สามารถทำได้หลากหลายและรวดเร็ว ทีมนักวิจัยได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการสมดุลพลังงานที่สภาวะการเปลี่ยนตัว (the transient energy equation) เมื่อพิจารณาแต่ละองค์ประกอบของ RSC ได้แก่ ส่วนของกระเบื้องคอนกรีตซีแพคโมเนียร์ ส่วนของอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศ และส่วนของยิปซัมบอร์ด เพื่อนำไปพิจารณาหาค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้สมมุติฐานหลักดังต่อไปนี้

- ให้การไหลของการถ่ายเทความร้อนผ่านองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนของ RSC เป็นการไหลในหนึ่งมิติ
 - RSC มีขนาดยาวมากเมื่อเทียบกับขนาดของช่องว่างอากาศ
 - พิจารณาค่าความจุความร้อนของกระเบื้องซีแพคโมเนียร์
 - ไม่คิดผลกระทบจากลักษณะรูปร่างของหลังคากระเบื้องซีแพคโมเนียร์ โดยสมมุติให้พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และไม่คิดผลจากร่มเงา
 - ไม่คิดการรั่วของอากาศ

ทำการทดลองเพื่อนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากแบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งเป็นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่ต้องการได้อย่าง

มั่นใจ โดยเฉพาะสมมุติฐานที่ใช้ในข้อแรกนั้นพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ยกเว้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับปลายทั้งสองด้านของ RSC (end effect) อีกทั้งพบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจากการทดลองและที่ได้จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นมีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นที่บางช่วงเวลาของวันซึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากเงื่อนไขทางภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั่วโมงของวัน เช่น อาจมีฝนตก มีเมฆ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้ไม่สามารถนำไปร่วมพิจารณาในแบบจำลองเชิงตัวเลขได้ ภายหลังจากการเปรียบเทียบแบบจำลองเรียบร้อยแล้วจึงนำแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ของ RSC โดยพิจารณาที่ RSC ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 100 cm ขนาดของช่องว่างอากาศเท่ากับ 14 cm และกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศที่ทางเข้าและทางออกมีขนาดเท่ากัน จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าความจุความร้อนของหลังคากระเบื้องไม่มีผลต่อค่าอัตราการไหลมวลของอากาศมากนัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถจำลองปัญหาที่สภาวะคงตัว (steady state condition) ได้ และยังพบว่าค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศเป็นฟังก์ชันของมุมเอียงของ RSC และความชื้นในการแผ่รังสีของแสงแดด อย่างไรก็ตามความเอียงของ RSC ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 20° - 60° เท่านั้น หากมากกว่านี้แล้วจะไม่มีผลต่ออัตราการไหลโดยมวลของอากาศแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความยาวของ RSC เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของอากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ RSC แล้ว อัตราการไหลของอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวของ RSC เพิ่มขึ้น ดังนั้น ปริมาณของอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ RSC ที่มีขนาดความยาวกว่าเพียงตัวเดียวจะมีค่าต่ำกว่าจากการใช้ RSC จำนวนสองตัวที่มีความยาวรวมทั้งหมดเท่ากับ ความยาวของ RSC ที่ยาวกว่าตัวนั้น ซึ่งคณะวิจัยได้สรุปว่าขนาดความยาวของ RSC ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ควรอยู่ระหว่าง 100 cm – 200 cm จากนั้นคณะวิจัยได้นำเสนอหลังคาแบบใหม่ 4 ลักษณะโดยใช้ข้อมูลที่ได้รับ การวิจัยและทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่ารูปแบบของบ้านที่มีลักษณะคล้ายบ้านทรงไทยจะก่อให้เกิดปริมาณอัตราการไหลของอากาศได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ปริมาณอัตราการถ่ายเทโดยรวมที่เกิดขึ้นนี้ยังไม่เพียงพอต่อความรู้สึกสบายของผู้พักอาศัย แต่หากพิจารณาผลจากลมร่วมด้วยจะสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ถึงประมาณ 2 เท่า

Khedari, Ingkawanich, Waewsak, and Hirunlabh (2002) ทำการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของ RSC ด้วยการเพิ่มระบบถ่ายเทอากาศแบบ Photovoltaic System (PV) โดยเรียกระบบถ่ายเทอากาศแบบนี้ว่า “PV-powered RSC” เป็นการลดปริมาณความร้อนที่จะเพิ่มขึ้นภายในบ้านและเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศอีกทางหนึ่ง ห้องที่ทำการทดสอบมีขนาด 25 m^3 เป็นห้องเดี่ยวและมี RSC จำนวน 2 แผ่นติดตั้งบนหลังคาทางด้านทิศใต้ของบ้าน แต่ละแผ่นมีพื้นที่เท่ากับ 1.5 m^2 ระบบถ่ายเทอากาศ PV นี้ ประกอบด้วย พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 2 ตัว PV จำนวน 1 โมดูล และ

หน่วยควบคุม กำหนดขนาดของพัดลมและ PV module โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยของ Hirunlabh, Wachirapuwadon, Pratinthong, and Khedari (2001) โดยทำนายค่าอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ ซึ่งพบว่ามีความเร็วประมาณ $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลนี้ไปเลือกขนาดของพัดลมและ PV panel ซึ่งพบว่าต้องการพัดลมไฟฟ้าขนาด 0.1955 W และ PV module ขนาด 0.4401 W_p แต่ขนาดดังกล่าวของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดไม่สามารถหาได้ตามท้องตลาดที่มีอยู่ ดังนั้นจึงเลือกใช้พัดลมขนาด 7.3 W และ PV module ขนาด 27 W_p ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถหาได้ในท้องตลาด พัดลมทั้งสองตัวถูกติดตั้งไว้ภายในช่องว่างอากาศบริเวณใกล้กับทางเข้าของ RSC โดยมีมุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 25° ทำการทดลองเพื่อวัดค่าอุณหภูมิของอากาศที่แวดล้อม ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าของ RSC แต่ละอัน ความเข้มของแสงแดด อุณหภูมิพื้นผิวของกระเบื้องซีแพคโมเนียร์ อุณหภูมิพื้นผิวของชิปซัมบอร์ด อุณหภูมิภายในช่องอากาศ อุณหภูมิภายในห้อง เริ่มทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 06.00 น. จนถึง 18.00 น. บันทึกค่าทุก ๆ 15 นาที ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง พบว่า หากพิจารณาเวลาที่แสงแดดจ้ามาก (ความเข้มของแสงแดดประมาณ $900 \text{ W}/\text{m}^2$) อุณหภูมิของอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่แวดล้อมภายนอกเสมอ ซึ่งหมายถึงไม่มีการสะสมความร้อนภายในบ้านเลย ความต่างศักย์และกระแสที่ได้รับจากระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของแสงแดด ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง $0.03 \text{ m}^3/\text{s} - 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ และการแลกเปลี่ยนอากาศมีค่าประมาณ $4 - 8 \text{ ach}$ ซึ่งมากกว่าการใช้ระบบระบายอากาศด้วย RSC เพียงอย่างเดียว $2 - 4$ เท่า

นอกจากงานวิจัยทั้ง 3 ฉบับของ Khedari ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อขยายผลอีกจำนวนหลายฉบับ โดยได้ทำการศึกษารอบคลุมทั้งการศึกษาถึงผลกระทบของ stack effect ในรูปแบบต่างๆ (Hirunlabh, Kongduang, Namprakai, and Khedary, 1999, Khedary, Mansirisub, Chaima, Pratinthong, and Hirunlabh, 2000, Khedary, Yimsamerjit, and Hirunlabh, 2002) ตลอดจนการศึกษาด้านการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้เป็นส่วนผสมของผนัง เช่น โยมะพร้าว และเปลือกทุเรียน (Khedary, Suttisonk, Pratinthong, and Hirunlabh (2001), Khedary, Rawangkul, Chimchavee, Hirunlabh, and Watanasungsuit (2002)) เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวทั้งหมด ถือเป็นประโยชน์มากเพราะสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติต่อไป

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ เช่น การนำเอาระบบนี้ไปใช้กับห้องอาหารของสนามกีฬาประเทศออสเตรเลียที่ใช้ในการแข่งขันกีฬาโอลิมปิกปี 2000 ที่เมืองซิดนีย์ (Lomas, Eppel, Cook, and Mardaljevic, n.d.) ใช้กับคอกเลี้ยงเป็ดและไก่ (Janni and Jacobson, 1995) การศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติเมื่อพิจารณาทั้งที่เกิดจากแรงลมและแรงลอยตัวรวมกัน (Li and Delsante, 2001) การพิจารณาการเกิดความปั่นป่วนจากการถ่าย

เทอากาศโดยธรรมชาติที่การไหลเกิดจากแรงลอยตัวภายในห้องปิด (Khalifa and Sahib, 2002) การศึกษาถึงกรรมวิธีในการทำให้เกิดถ่ายเทอากาศรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน (Haves, n.d.) เป็นต้น

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

โดยทั่วไป การไหลในการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติสามารถแบ่งออกตามลักษณะแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการไหลได้ 2 ประเภท ได้แก่ การไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลม (wind-driven) และการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัว (buoyancy-driven) ซึ่งขอบเขตของงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาการไหลในการถ่ายเทธรรมชาติที่ขับเคลื่อนโดยแรงลม โดยจะทำการศึกษาเพียงการไหลของอากาศที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัวเท่านั้น สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยละเอียด เริ่มจากการทดสอบโปรแกรม ลักษณะของอาคารและหลักการทำงานของห้องหลังคากระจกใส และปล่องลมแดงในการก่อให้เกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ การสร้างเมช สมมติฐานการวิจัย ตลอดจนการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ก่อนทำการคำนวณ ดังนี้

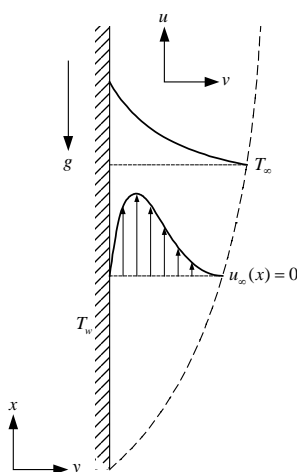
3.2 การทดสอบโปรแกรม CFX-5

การทดสอบโปรแกรม CFX-5 มีขึ้นเพื่อสร้างความมั่นใจในความถูกต้องแม่นยำและความมีเสถียรภาพในการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งความจริงแล้วก่อนที่จะนำโปรแกรมออกสู่ตลาด โปรแกรมนั้น ๆ ย่อมถูกทดสอบมาเป็นอย่างดีพอสมควร ดังนั้น ประโยชน์โดยแท้จริงของขั้นตอนนี้คือให้ผู้ใช้ได้มีโอกาสศึกษาการใช้งานโปรแกรมอย่างถูกต้อง ตลอดจนฝึกฝนและสร้างประสบการณ์จนเกิดความมั่นใจก่อนที่จะนำโปรแกรมไปจำลองกับปัญหาการวิจัย

สืบเนื่องจากการไหลของอากาศภายในอาคารสำหรับงานวิจัยนี้เป็นผลพวงจากแรงลอยตัว ซึ่งใช้หลักของการพาอิสระ จึงเลือกทดสอบโปรแกรมกับปัญหาการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง (free convection over vertical plate) ซึ่งมีอุณหภูมิของแผ่นร้อนสม่ำเสมอทั้งแผ่นเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาได้ด้วยกรรมวิธีความเสมือน (similarity method) (Kays and Crawford, 1993) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโปรแกรมกับปัญหาการไหลนี้เพียงปัญหาเดียว เพราะเห็นว่าเป็นปัญหาการไหลที่มีพฤติกรรมการไหลสอดคล้องและคล้ายคลึงกับปัญหาการไหลภายในอาคารที่ต้องการศึกษาอยู่แล้ว ดังนั้น ในหัวข้อการทดสอบโปรแกรมจึงขอแนะนำเสนอขั้นตอนต่าง ๆ โดยละเอียด เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการในการจำลองดังนี้

3.2.1 การกำหนดสถานะเริ่มต้นของการไหล

ลักษณะของการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง เป็นการไหลในชั้นผิวบางอย่างหนึ่งคล้ายกับปัญหาการไหลในชั้นผิวบางผ่านแผ่นราบ แตกต่างกันที่การไหลผ่านแผ่นราบถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดัน ส่วนการไหลผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ของไหลจะถูกขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัว ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของไหลที่ชั้นผิวบางของแผ่นร้อนกับของไหลที่ระยะไกล อากาศร้อนที่ชั้นผิวบางจะลอยตัวขึ้นตามหลักการของการพาอิสระดังอธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3 ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและสมการแม่บทสำหรับปัญหาการไหลนี้ได้ อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.3.3 อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกในการอธิบายถึงการกำหนดสถานะการไหล จึงขอแสดงรูปของการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งอีกครั้งดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชั้นผิวบางของการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

กำหนดสถานะของการไหลเป็นดังนี้

- เป็นการไหลในสองมิติ (two dimensional flow)
- พิจารณาการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ที่สภาวะคงตัว (steady state condition)
- อุณหภูมิของแผ่นร้อน (T_w) เท่ากับ 500 K (คิดเป็นประมาณ 227 °C)
- ของไหลที่ล้อมรอบแผ่นร้อนคืออากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ระยะไกล (T_∞) เป็น 300 K (ประมาณ 27 °C) ความดัน 1 บรรยากาศ (101,325 Pa)
- ความเร่งโน้มถ่วง (g เท่ากับ 9.81 m/s²)

3.2.2 การกำหนดย่านการไหล (Geometry)

ในการจำลองสมมติให้แผ่นร้อนมีความยาวตามแนวแกน X เท่ากับ 0.1 m แต่ที่ต้องพึงระวังคือการกำหนดความกว้างตามแนวแกน y ซึ่งจะสมมติให้เป็นค่าใดค่าหนึ่งตามใจชอบไม่ได้ ความกว้างที่กำหนดในแนวแกนนี้ต้องมากพอที่จะมั่นใจได้ว่า ที่ระยะความกว้างดังกล่าวจะไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความหนืดของของไหลบริเวณชั้นผิวบาง โดยทั่วไปจะกำหนดให้ระยะนี้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับห้าเท่าของความหนาชั้นผิวบาง (boundary-layer thickness, δ) ในการจำลองครั้งนี้กำหนดให้ย่านการไหลมีความกว้างเท่ากับความยาวของแผ่นร้อนพอดี ซึ่งคิดเป็นประมาณ 13.5 เท่าของความหนาชั้นผิวบาง (13.5δ) อย่างไรก็ตาม จำนวนเมชที่ใช้ในการคำนวณจะมากขึ้นเมื่อย่านการไหลมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เชื่อว่าที่ความกว้างนี้จะเพิ่มเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมไม่มากนัก เพราะเมชที่ใช้ด้านนี้เป็นเมชที่มีการขยายตัวค่อนข้างสูง โดยขนาดของเมชจะมีขนาดเล็กที่บริเวณชั้นผิวบางและมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ขนาดของเมชบริเวณด้านนอกจึงมีค่าใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของเมชบริเวณชั้นผิวบาง ขั้นตอนการคำนวณหาความหนาของชั้นผิวบางเพื่อวิเคราะห์ความหนาของชั้นผิวบางจะถูกแสดงเป็นลำดับดังนี้

เริ่มจากการคำนวณหาความหนาของชั้นผิวบาง เมื่อพิจารณาการไหลเป็นแบบราบเรียบ จากสมการ (Kays and Crawford, 1993)

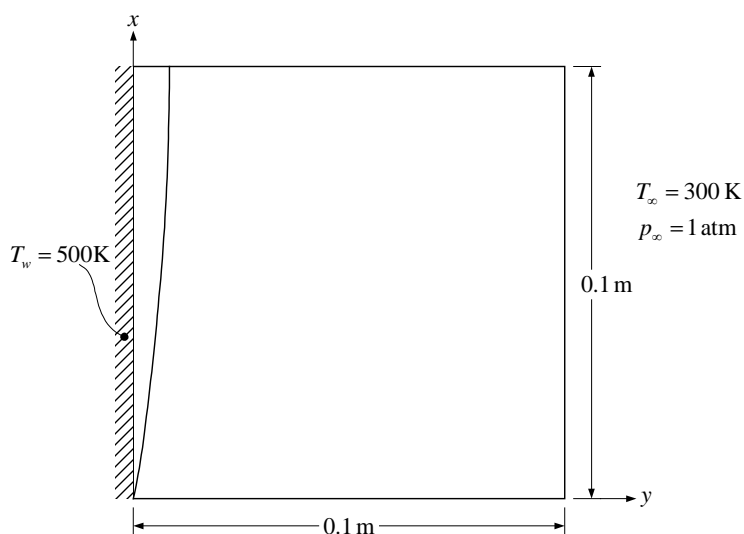
$$\frac{\delta}{x} = 3.93 \left(\frac{0.952 + \text{Pr}}{\text{Pr}^2} \right)^{1/4} Gr_x^{1/4} \quad (3.1)$$

การคำนวณตามสมการ (3.1) จะพิจารณาที่ค่า $X = L$ (L คือความยาวของแผ่นร้อน) เพราะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความหนาของชั้นผิวบางมากที่สุด เมื่อ Pr คือ ค่าเลขพรันเทิล (Prantl number) ซึ่งเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของของไหล และสามารถประมาณค่าได้จากตารางคุณสมบัติทั่วไป ส่วน Gr คือ ค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Gr_x = \frac{g\beta x^3 (T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (3.2)$$

โดยใช้ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 300 K ความดัน 1 บรรยากาศ คำนวณหาค่าความหนาของชั้นผิวบางที่ตำแหน่งความยาวของแผ่นร้อน ($X = 0.1$ m) จะได้ความหนาของชั้นผิวบางเท่ากับ 0.0074 m หากคำนวณจากค่า 0.1 m คิดเป็นประมาณ 13.5 เท่า

ในการคำนวณจะทำการจำลองการไหลในสองมิติ แต่ด้วยข้อจำกัดของโปรแกรม CFX-5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณบนขอบเขตโดเมนที่เป็นสามมิติเท่านั้น อย่างไรก็ตาม สามารถจำลองการไหลในสองมิติโดยโปรแกรม CFX-5 ได้โดยการกำหนดระยะทางแกน Z ของย่านการไหลให้มีความหนาเพียงประมาณหนึ่งความยาวเมช และให้ระนาบที่ตั้งฉากกับแกน Z มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Symmetry Plane สำหรับการจำลองปัญหาการไหลนี้กำหนดให้ความหนาทางแกน Z เท่ากับ 0.001 m ขนาดของย่านการไหลที่ทำการจำลองเป็นดังรูปที่ 3.2

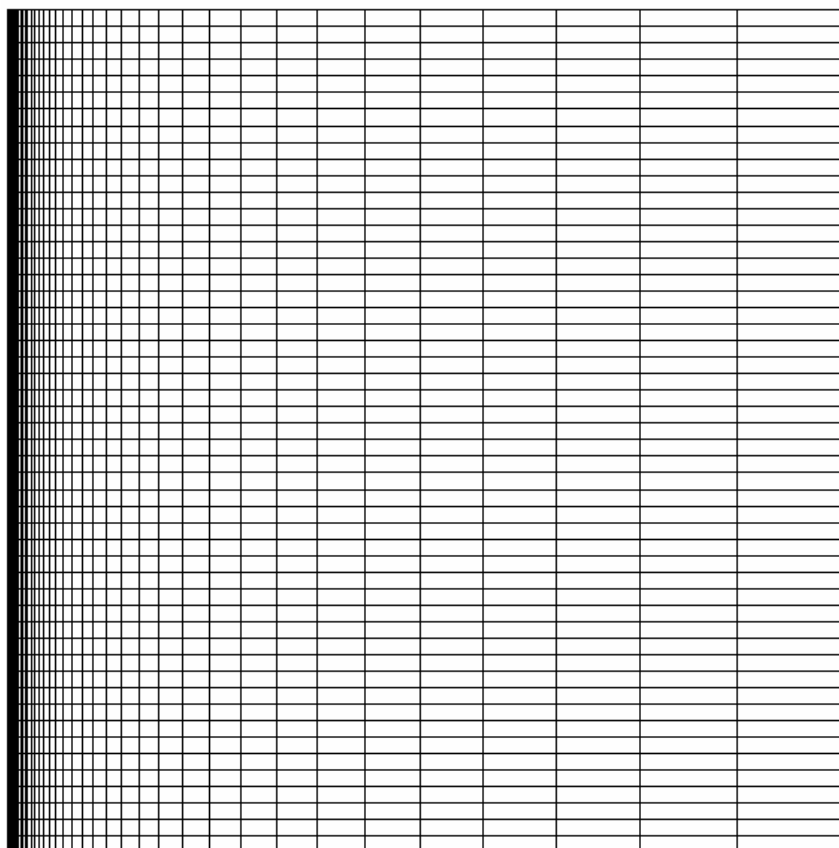


รูปที่ 3.2 ขนาดของโดเมนในการจำลองการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ($Z = 0.001$ m)

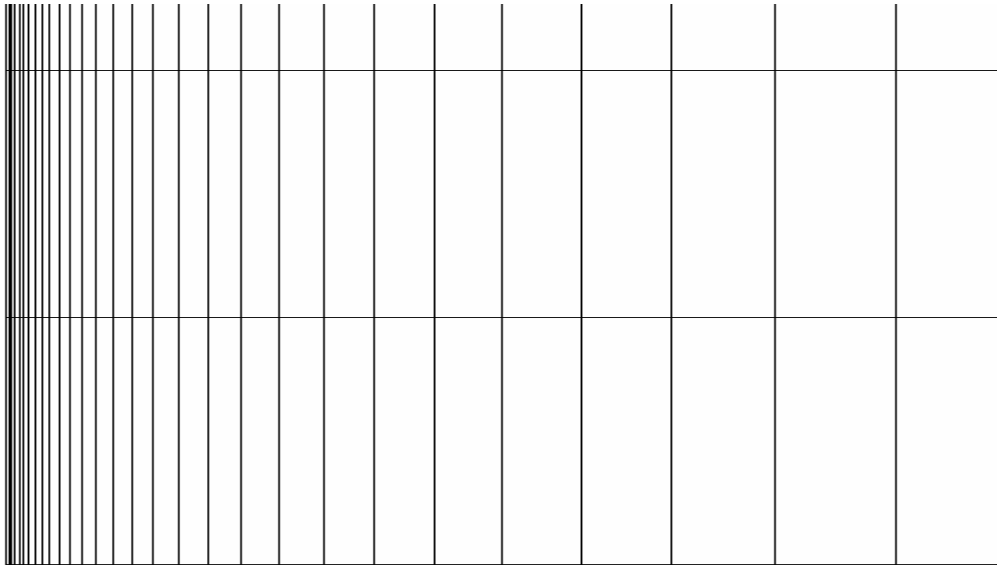
3.2.3 การสร้างเมช (Mesh)

เมชที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการจำลองการไหลนี้เป็นเมชแบบปริซึมสี่เหลี่ยม โดยมีเมชสองมิติ (surface mesh) เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความลึกเท่ากับความหนาของโดเมนทางแกน Z จำนวนเมชทางแกน Z เท่ากับ 1 เมช กำหนดให้เมชทางแกน X เป็นเมชแบบสม่ำเสมอ (uniform mesh) มีจำนวนทั้งสิ้น 50 เมช ซึ่งคำนวณความยาวแต่ละเมชได้เท่ากับ 0.002 m และกำหนดให้เมชทางด้านแกน X นี้มีค่าคงที่เท่ากับ 50 เมช เสมอ เพราะลองทำการคำนวณเมื่อเพิ่มจำนวนเมชในแนวแกนนี้พบว่าส่งผลต่อคำตอบที่ได้น้อยมาก ส่วนเมชทางด้านแกน Y นั้นกำหนดให้เป็นเมชที่มีการขยายตัวเพื่อสนับสนุนพฤติกรรมกรการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นผิวบางของแผ่นร้อน ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร (เช่น ความเร็ว และอุณหภูมิ) ก่อนข้างสูง จึงควรกำหนดเมชบริเวณนี้ให้มีขนาดเล็ก เพื่อช่วยให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในที่นี้

กำหนดให้ขนาดของเมชด้านนอกสุดมีค่าเป็น 1,250 เท่า ของเมชที่ชั้นชิดผิว (ผู้วิจัยได้ทดลองเพิ่ม และลดสัดส่วนการขยายตัวนี้ จนสรุปได้ว่าค่าที่กำหนดเหมาะสมสำหรับการจำลองแล้ว)



รูปที่ 3.3 เมชที่ใช้ในการคำนวณขนาด 50×50 เมช (เมชแบบหยาบ)



รูปที่ 3.4 ภาพขยายของเมชขนาด 50×50 เพื่อแสดงลักษณะของเมชบริเวณชั้นผิวบาง

3.2.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหลเป็นขั้นตอนที่สร้างความยุ่งยากพอสมควรในการจำลองปัญหาการไหลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป นอกจากต้องให้ความสนใจในลักษณะทางกายภาพของพฤติกรรมการไหลนั้น ๆ แล้วจะต้องเข้าใจและทราบถึงข้อจำกัดในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของโปรแกรมที่ใช้อีกด้วย สำหรับโปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล CFX-5 นี้มีชนิดของเงื่อนไขขอบเขตทั้งสิ้น 6 ประเภทให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม ดังนี้

Inlet : เป็นการกำหนดให้ทิศทางของการไหลเป็นการไหลเข้าเท่านั้น

Outlet : เป็นการกำหนดให้ทิศทางของการไหลเป็นการไหลออกเท่านั้น

Opening : กำหนดให้มีการไหลผ่านพื้นผิวได้ทั้งเข้าและออก เงื่อนไขขอบเขตชนิดนี้ไม่เหมาะสมกับปัญหาการไหลที่มีของไหลมากกว่าหนึ่งประเภท

Wall : เป็นการกำหนดให้ด้านนั้น ๆ เป็นผนังซึ่งหมายความว่า จะไม่มีของไหลไหลผ่านเข้าหรือออกผ่านพื้นผิวนี้ได้

Symmetry Plane : ของไหลไม่สามารถไหลเข้าหรือออกผ่านทะลุพื้นผิวนี้ได้ พื้นผิวสมมาตรจะทำหน้าที่เสมือนกระจกสะท้อนค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ หรือพฤติกรรมของการไหลภายในโดเมนที่อยู่เป็นระยะห่างเท่ากันเมื่อวัดจากพื้นผิวสมมาตรออกไปจะมีค่าเท่ากันเสมอ เงื่อนไขขอบเขตประเภทนี้ใช้กับปัญหาการไหลที่มีลักษณะสมมาตร

Periodic Pair : เป็นการถ่ายโอนข้อมูลที่คำนวณได้จากพื้นผิวหนึ่ง ไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่ง เงื่อนไขขอบเขตลักษณะนี้ไม่เหมาะกับการจำลองปัญหาการไหลแบบหลายสถานะ (Multiphase simulations)

ภายในเงื่อนไขขอบเขตแต่ละชนิดมีทางเลือก (Options) ต่าง ๆ ให้เลือกใช้เพื่อแจกแจงรายละเอียดของเงื่อนไขขอบเขตลงไปอีก ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับปัญหาการไหลโดย การพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งที่พื้นผิวต่าง ๆ ดังนี้

3.2.4.1 พื้นผิวของแผ่นร้อน

กำหนดให้พื้นผิวของแผ่นร้อนมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Wall แบบ Exterior-Stationary-No-Slip Wall>Fixed Temperature อธิบายได้ว่าพื้นผิวถูกกำหนดให้เป็นผนังที่ไม่มีเคลื่อนที่ ไม่ลื่นไถล และมีอุณหภูมิคงที่ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 500 K ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น อากาศจะไม่สามารถไหลเข้าหรือออกผ่านพื้นผิวนี้ และความเร็วของอากาศที่พื้นผิวนี้มีค่าเท่ากับความเร็วของแผ่นร้อนพอดีตามหลักของการไม่ลื่นไถล สำหรับปัญหานี้กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของแผ่นร้อน ดังนั้น ความเร็วของอากาศที่พื้นผิวนี้จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังจะเห็นได้จากรูปด้านข้างของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 3.1

3242 พื้นผิวด้านล่างของโดเมน

กำหนดให้พื้นผิวด้านล่างของโดเมนมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Inlet ซึ่งมีทิศทางการไหลเข้าตั้งฉากกับพื้นผิว อุณหภูมิของพื้นผิวนี้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ระยะไกล (300 K) และมีค่าความดันรวม (Total pressure) สัมพัทธ์เท่ากับศูนย์ (คิดเทียบกับความดันอ้างอิง [reference pressure, p_{ref}] ซึ่งกำหนดให้เท่ากับความดันบรรยากาศ) เมื่อความดันรวมมีค่าเท่ากับความดันจลน์บวกกับความดันสถิตย์ ดังแสดงในสมการ

$$P_{total} = P_{dynamic} + P_{static} \quad (3.3)$$

เนื่องจากความเร็วในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ (อากาศเริ่มจากหยุดนิ่ง) ดังนั้น ความดันจลน์ ($P_{dynamic}$) จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$P_{dynamic} = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.4)$$

ความดันสถิตย์ของปัญหาการไหล ซึ่งประกอบด้วยความดันจากภายนอกบวกกับความดันเนื่องจากน้ำหนักของของไหล (Hydrostatic pressure) สำหรับปัญหานี้การไหลเกิดจากแรงลอยตัวจึงไม่มี

ความดันจากภายนอกมาเกี่ยวข้อง และในขั้นตอนการคำนวณของ โปรแกรม CFX-5 โปรแกรมจะไม่พิจารณาความดันเนื่องจากน้ำหนักของของไหล จึงทำให้ความดันรวมสัมพัทธ์ของพื้นผิวนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ไปโดยปริยาย สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบนี้โปรแกรมจะทำการคำนวณเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณทางเข้า ซึ่งเป็นผลลัพธ์หนึ่งที่จะได้รับจาก โปรแกรม

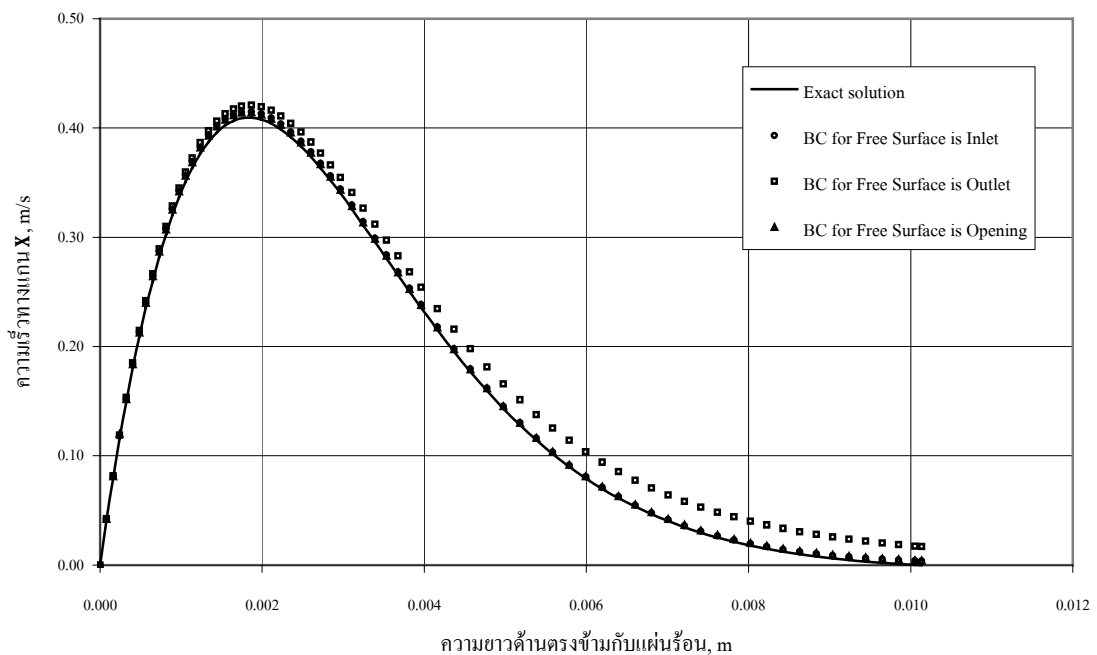
3.2.4.3 พื้นผิวด้านบนของโดเมน

กำหนดให้พื้นผิวด้านบนของโดเมนมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Outlet การไหลออกมีทิศตั้งฉากกับพื้นผิว และมีค่าความดันสถิตย์สัมพัทธ์ (relative static pressure) เท่ากับศูนย์ โปรแกรมจะทำการคำนวณอัตราการไหลออกที่พื้นผิวนี้ โดยใช้วิธีการประมาณการภายนอก (Extrapolation) ซึ่งเป็นคำตอบหนึ่งที่จะได้รับจากโปรแกรม

3.2.4.4 พื้นผิวด้านตรงข้ามแผ่นร้อน (Freestream)

กำหนดให้พื้นผิวด้านตรงข้ามแผ่นร้อนมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Inlet มีความดันสถิตย์สัมพัทธ์เท่ากับศูนย์ และอุณหภูมิเท่ากับ 300 K (เท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ระยะไกล) การกำหนดเช่นนี้เชื่อว่าสอดคล้องกับพฤติกรรมการไหล ถ้าพิจารณารูปด้านข้างของความเร็ว จะเห็นว่ามีความโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะ X เพิ่มขึ้น หากปริมาณของไหลที่ไหลเข้าผ่านพื้นผิวด้านล่างมีปริมาณเท่าเดิมแล้ว ย่อมหมายความว่าต้องมีของไหลไหลเข้าไปเพิ่มภายในโดเมน ซึ่งพื้นผิวที่จะสามารถยอมให้ของไหลไหลผ่านเข้ามาภายในโดเมนได้ก็คือพื้นผิวด้านตรงข้ามกับแผ่นร้อน ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตนี้เป็นที่น่าพอใจ ได้ทำการพิสูจน์แนวคิดนี้โดยลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตประเภทอื่น หากกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Outlet พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีค่าคลาดเคลื่อนจากค่าผลเฉลยแม่นยำตรงค่อนข้างมาก แต่หากกำหนดให้เป็นแบบ Opening พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการกำหนดให้เป็น Inlet นั่นเป็นเพราะว่า พื้นผิวแบบ Opening จะยอมให้ของไหลสามารถไหลเข้าหรือออกก็ได้ ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งในที่นี้ จะเกิดการไหลเข้าของอากาศสู่โดเมนด้วยปริมาณที่เท่ากันกับการกำหนดให้เป็นแบบ Inlet นั่นเอง

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขขอบเขตที่สามารถใช้ได้และเหมาะสมสำหรับปัญหาการไหลที่บริเวณพื้นผิวนี้คือเงื่อนไขขอบเขตแบบ Inlet และ Opening ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบรูปด้านข้างของความเร็วที่ได้จากการใช้เงื่อนไขขอบเขตทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 3.5 รูปด้านข้างความเร็วที่เงื่อนไขขอบเขตบริเวณพื้นผิวตรงข้ามแผ่นร้อนต่าง ๆ
(50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X = 0.085$ m)

3.2.4.5 พื้นผิวด้านหน้าและด้านหลัง

พื้นผิวทั้งสองถูกกำหนดให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบ Symmetry Plane เพราะในกรณีการจำลองการไหลใน 2 มิติ นั้น ต้องทำให้ความหนาในมิติที่ 3 มีขนาดเท่ากับหนึ่งความยาวเมช และกำหนดให้พื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกนมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Symmetry Plane หรือ Periodic Pair อย่างใดอย่างหนึ่ง

3.2.4.6 พื้นผิวที่ส่วนเหลือ

พื้นผิวในส่วนที่เหลือทั้งหมดที่ยังไม่ได้กล่าวถึง โปรแกรมจะกำหนดให้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็น Wall แบบ No-slip ทั้งหมดโดยอัตโนมัติ

3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมจะช่วยให้การลู่เข้าสู่คำตอบของโปรแกรมเร็วขึ้น หากผู้ใช้ไม่ระบุค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเอง โปรแกรมจะทำการกำหนดให้เองอัตโนมัติ แต่ค่าที่โปรแกรมกำหนดนั้นอาจไม่เหมาะสมเท่าใดนัก ซึ่งอาจจะส่งผลให้โปรแกรมใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้น หากผู้ใช้สามารถทราบค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่แล้วควรเป็นผู้กำหนดเอง เพื่อช่วยให้การลู่เข้าสู่คำตอบเป็นไปด้วยความรวดเร็วยิ่งขึ้น ในการจำลองครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการจำลองปัญหาให้กับโปรแกรม ดังนี้

ความดันสถิตย์ (Static pressure): กำหนดเป็นค่าความดันสัมพัทธ์เริ่มต้นเท่ากับศูนย์

อุณหภูมิ (Temperature): กำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 300 K

เวกเตอร์ความเร็ว (Cartesian Velocity Components): กำหนดความเร็วเริ่มต้นของ u และ w ซึ่งเป็นค่าความเร็วในแนวแกน X , Y และ Z ให้มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.6 แบบจำลองแรงลอยตัว

สำหรับ โปรแกรม CFX-5 จะมีแบบจำลองสำหรับปัญหาการไหลด้วยแรงลอยตัว 2 ประเภท ได้แก่ Boussinesq Model และ Full Buoyancy Model ซึ่ง โปรแกรมจะเลือกใช้อัตโนมัติ โดยพิจารณาจากลักษณะของของไหลที่ผู้ใช้กำหนด ดังนี้

1. หากกำหนดให้ของไหลเป็นแบบ General Fluid ซึ่งหมายถึงของไหลที่ค่าความหนาแน่นไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนไป การกำหนดลักษณะนี้ โปรแกรมจะเลือกใช้ Boussinesq Model โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าอุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ให้กับโปรแกรม ซึ่งส่วนใหญ่จะกำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่ระยะไกล

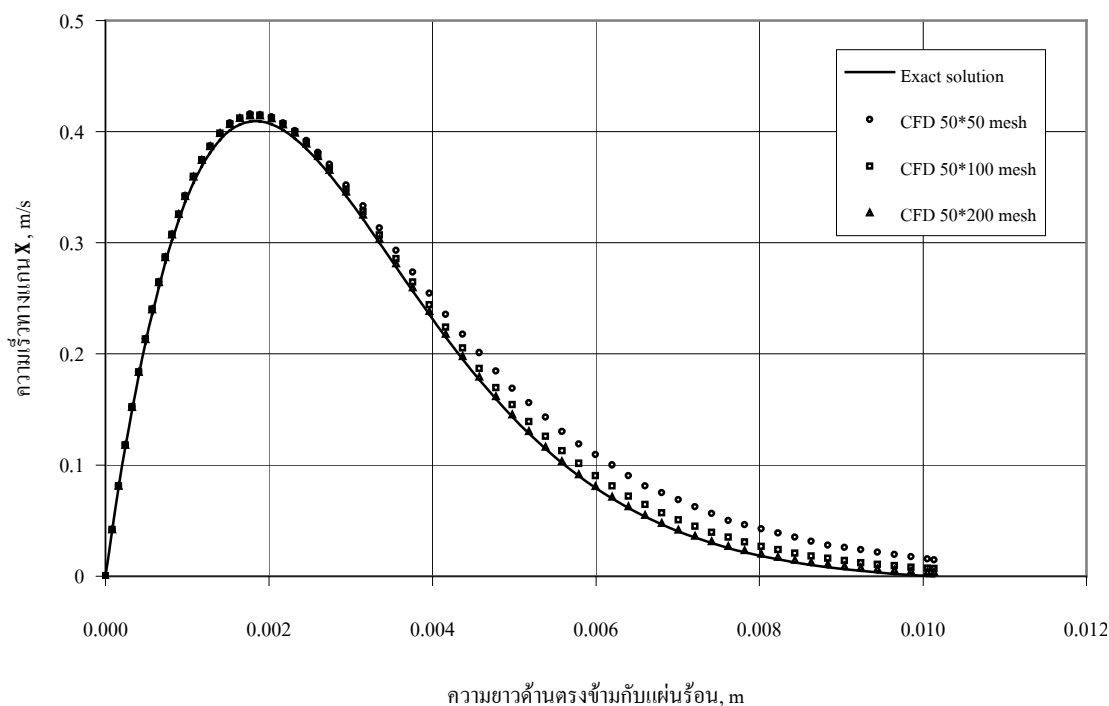
2. หากผู้ใช้กำหนดให้ของไหลเป็นของไหลในอุดมคติ (Ideal Gas) ซึ่งหมายถึงของไหลที่มีค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนไป ลักษณะนี้โปรแกรมจะเลือกใช้ Full Buoyancy Model โดยผู้ใช้งานจะต้องกำหนดค่าความหนาแน่นอ้างอิง (Reference Density) ให้กับโปรแกรม

สำหรับการจำลองในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้จำลองการไหลด้วย Boussinesq Model ซึ่งเป็นการจำลองเช่นเดียวกันกับกรณีวิธีในการหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ทดลองจำลองการไหลด้วย Full Buoyancy Model เพื่อพิสูจน์ว่ามีผลต่อผลลัพธ์ที่ได้มาน้อยเพียงใด ในการจำลองพบข้อจำกัดของโปรแกรมว่าหากใช้ของไหลเป็นของไหลในอุดมคติแล้วจะต้องจำลองการไหลด้วย Transient Model เท่านั้น ซึ่งการจำลองในลักษณะนี้ของโปรแกรม CFX-5 จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ลองคำนวณด้วย Full Buoyancy Model ซึ่งก็พบว่าจริงดังนั้น จึงไม่ได้ทำการรัน โปรแกรมจนกระทั่งได้ผลเฉลยเพราะจะเป็นการเสียเวลาโดยใช่เหตุ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลด้วย Boussinesq Model ค่อนข้างดี ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังคาดว่าจะใช้เวลาในการคำนวณของคอมพิวเตอร์น้อยกว่า นอกจากนี้ยังมีความเหมาะสมในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองกับผลเฉลยแม่นยำตรงอีกด้วย เพราะเกิดจากการจำลองด้วยกรณีวิธีเดียวกัน จึงเป็นเหตุผลที่เลือกใช้กรณีวิธีนี้ในการคำนวณ

327 ผลลัพธ์จากการจำลอง

ในขั้นตอนของการจำลอง จะเริ่มกำหนดเมชจากหยาบก่อน โดยกำหนดให้เมชทางด้านแกน y มีจำนวนเท่ากับ 50 เมช จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ หากยังพบว่าความแตกต่างของผลลัพธ์ไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จะเพิ่มจำนวนเมชให้มากขึ้นและนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำอีกครั้ง ทำอย่างนี้ไปจนกระทั่งผลลัพธ์จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำ โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งในการจำลองพบว่าจำนวนเมชทางด้านแกน y ที่เหมาะสมมีจำนวนเท่ากับ 200 เมช ดังนั้น จำนวนเมชที่ใช้สำหรับการจำลองครั้งนี้จึงมีค่าเป็น 50×200 เมช และขนาดของเมชด้านนอกสุดมีค่ามากกว่าเมชที่ชั้นชิดผิวเท่ากับ 1,250 เท่า ตัวอย่างเมชที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นภาพขยายเพื่อให้เห็นถึงการขยายตัวของเมชได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

เพื่อยืนยันว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่ 50×200 เมช มีความเหมาะสมต่อปัญหาการไหลนี้ จึงทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเมื่อใช้จำนวนเมชในการคำนวณ ต่าง ๆ กัน โดยนำเสนอรูปความเร็วด้านข้างที่ได้ในแต่ละการจำลองเทียบกับผลเฉลยแม่นยำดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากรูป จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้เมชจำนวน 50×200 มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำมาก โดยจะสังเกตได้จากเส้นกราฟที่เกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน



รูปที่ 3.6 รูปด้านข้างความเร็วที่จำนวนเมชต่าง ๆ ($Pr = 0.711$, $X = 0.085$ m)

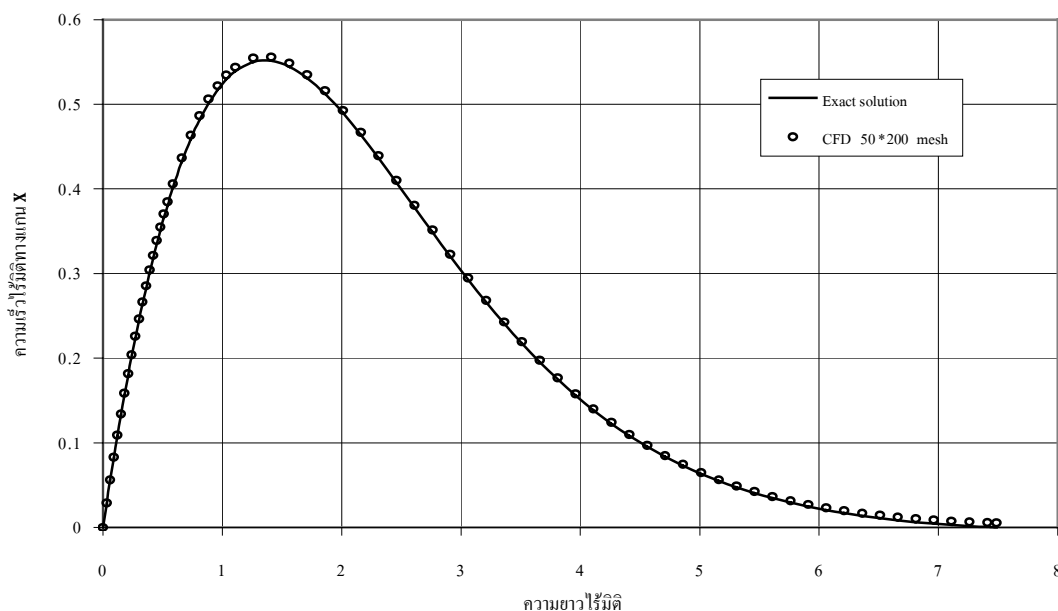
แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเพื่อทดสอบโปรแกรมในรูปแบบของกราฟข้อมูล ลักษณะต่าง ๆ ตัวแปรที่ทำการพล็อตประกอบด้วย ความเร็ว อุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 นอกจากนี้ยังทำการพล็อตค่าอุณหภูมิและความเร็วในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 – 3.9 ตัวแปรไร้มิติดังกล่าวประกอบด้วย

$$\text{อุณหภูมิไร้มิติ, } \theta(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad \text{และ}$$

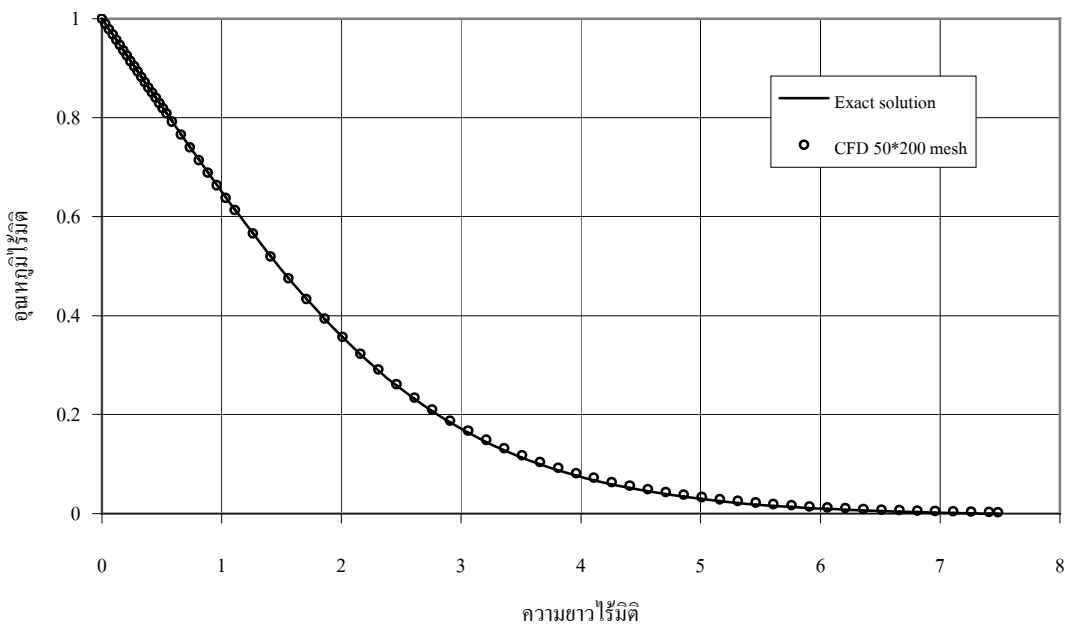
$$\text{ความเร็วไร้มิติทางแกน X } F'(\eta) = \frac{u}{\sqrt{\beta g (T_w - T_\infty) x}}$$

$$\text{เมื่อ } \eta = \frac{y}{x} Gr_x^{0.25} \text{ คือ ความยาวไร้มิติ}$$

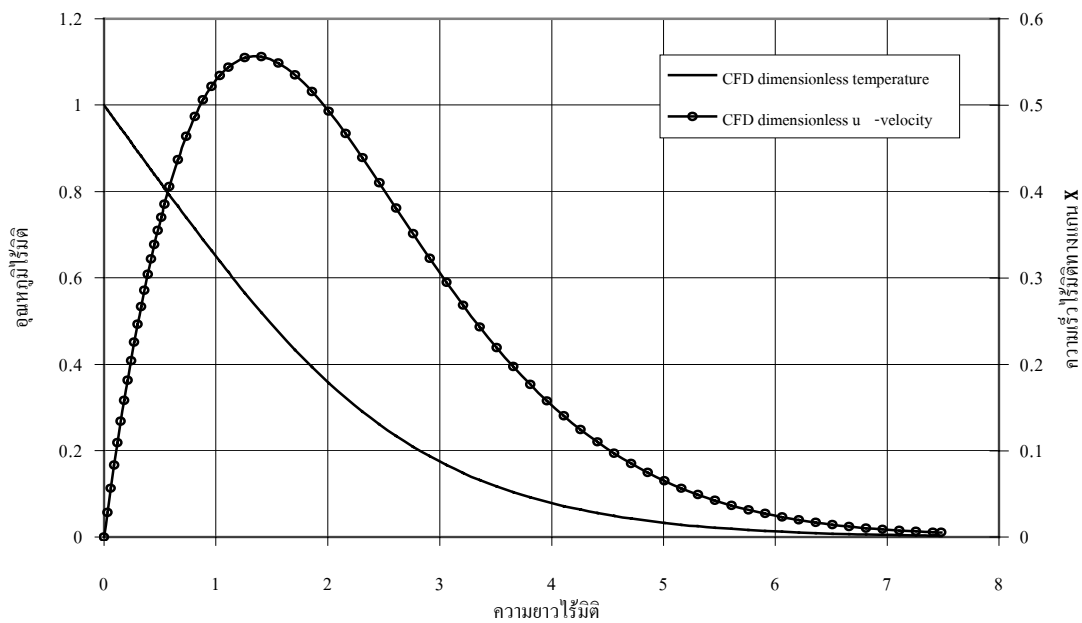
โดยรวมแล้ว พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงเป็นอย่างดี โดยเฉพาะความเร็วและอุณหภูมิ ยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่านั้น ที่พบว่าเกิดความแตกต่างของค่าผลลัพธ์อยู่บ้าง โดยจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่แยกออกจากกัน ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากค่าผิดพลาดที่บริเวณขอบ (end effect) และส่งผลต่อเนื่องมาถึงบริเวณด้านในด้วย อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของค่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันตลอด ทำให้สามารถมั่นใจต่อความสามารถในการจำลองของโปรแกรม CFX-5 นี้ เพื่อนำโปรแกรมไปจำลองปัญหาการไหลที่ต้องการต่อไป



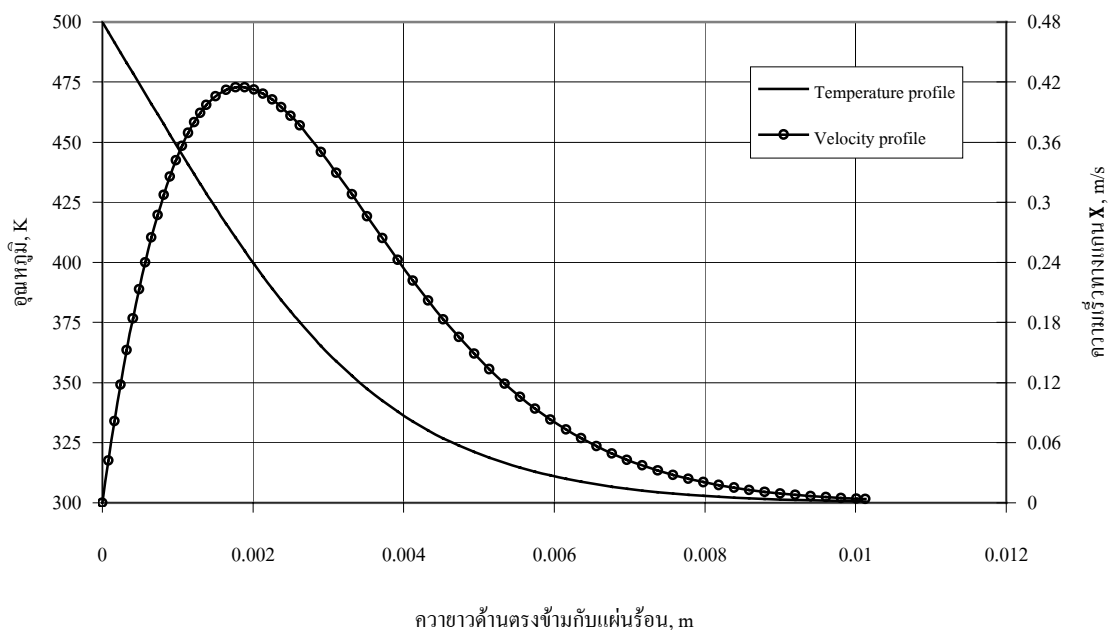
รูปที่ 3.7 รูปด้านข้างความเร็วในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, Pr = 0.711, X= 0.085 m)



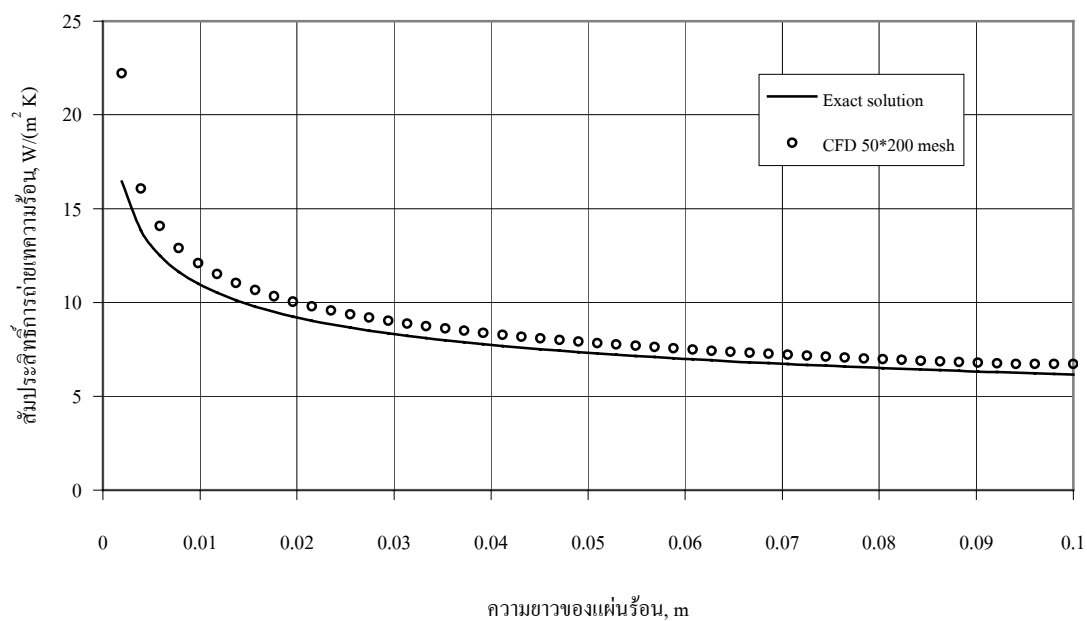
รูปที่ 3.8 รูปด้านข้างอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, Pr = 0.711, X= 0.085 m)



รูปที่ 3.9 รูปด้านข้างความเร็วและอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติ (50×200 เมช, Pr = 0.711, X= 0.085 m)



รูปที่ 3.10 รูปด้านข้างความเร็วและอุณหภูมิ (50×200 เมช, $Pr = 0.711$, $X = 0.085$ m)



รูปที่ 3.11 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($Pr = 0.711$, $X = 0.085$ m)

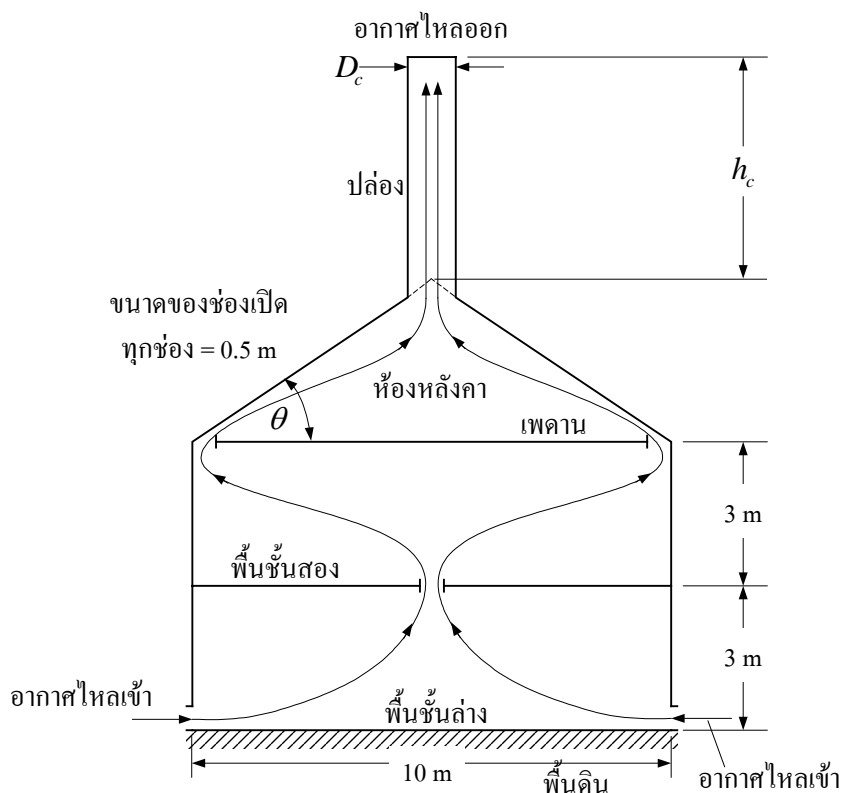
3.3 การจำลองปัญหาการไหลของอากาศผ่านอาคาร 2 ชั้น

ในการจำลองการไหลของอากาศผ่านอาคาร 2 ชั้น เพื่อศึกษาการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่เกิดจากการพาอิสระผ่านห้องหลังคารับแดดของอาคาร เริ่มจากการกำหนดรูปร่างลักษณะของอาคารพร้อมหลักการทำงาน การจำลองอาคารพร้อมทั้งกำหนดสถานะเริ่มต้นของปัญหา การสร้างเมชในการคำนวณ ตลอดจนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น ซึ่งจะแสดงเป็นลำดับดังนี้

331 ลักษณะทางกายภาพของอาคารและหลักการทำงาน

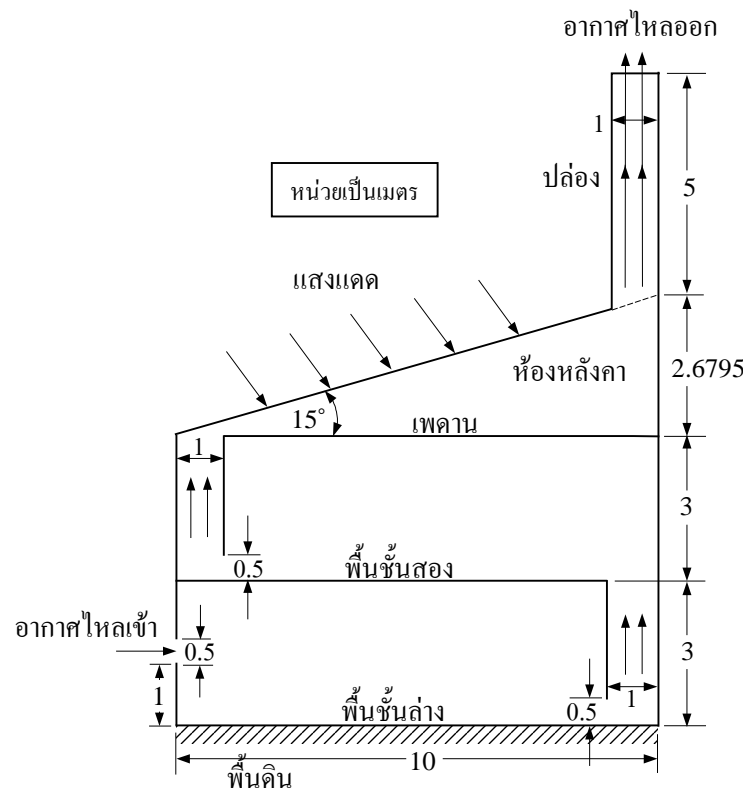
อาคารที่จะทำการศึกษาค้นคว้าถ่ายเทอากาศธรรมชาติในงานวิจัยนี้เป็นอาคาร 2 ชั้น ซึ่ง จะทำการจำลองการไหลผ่านอาคาร 2 รูปแบบ โดยในช่วงแรกของงานวิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าถ่ายเทอากาศผ่านอาคารที่มีลักษณะสมมาตร ซึ่งจะศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทอากาศ ได้แก่ ความสูง (h_c) และความกว้าง (d_c) ของปล่อง ความเอียงของหลังคา (θ) ความเข้มของแสงแดด (Q) ส่วนที่สองของงานวิจัยจะทำการศึกษาค้นคว้าถ่ายเทอากาศผ่านอาคารที่มีลักษณะไม่สมมาตร และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้รับจากการจำลองแต่ละกรณี

การกำหนดรูปร่างและขนาดของอาคารที่จะทำการศึกษา ได้พิจารณาจากลักษณะและขนาดของอาคารเพื่ออยู่อาศัยของประเทศไทย ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีหลังคาเป็นรูปหน้าจั่ว หลังคาจึงเอียงทำมุมกับแนวระนาบ รูปร่างและขนาดของอาคารแบบสมมาตรถูกกำหนดให้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยมีความสูงแต่ละชั้นเป็น 3 m ที่พื้นของชั้นสองมีช่องเปิดอยู่ตรงกลางขนาดกว้างเท่ากับ 0.5 m ความกว้างของอาคาร 10 m และมีช่องเปิดที่พื้นด้านล่างทั้งสองด้าน ซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศจากด้านนอกไหลเข้าสู่อาคาร หลังคาของอาคารทำจากกระจกใสและทำมุมเอียงกับแนวระดับเป็นมุม θ และมีปล่องติดตั้งที่ยอดของหลังคา เบื้องต้นกำหนดให้ปล่องกว้าง 1.0 m (ส่วนท้ายของการจำลองอาคารแบบสมมาตรนี้ได้ทำการจำลองกับอาคารที่มีปล่องกว้างเป็น 1.5 m และ 0.5 m เพื่อศึกษาผลกระทบจากขนาดความกว้างของปล่องต่ออัตราการถ่ายเทอากาศ) ที่เพดานของชั้นสองมีช่องเปิดสองช่องอยู่ที่ริมด้านซ้ายและขวา โดยมีความกว้างของช่องเปิดมีค่า 0.5 m เท่ากัน



รูปที่ 3.12 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบสมมาตร

ส่วนอาคารแบบไม่สมมาตรจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่า อาคารมีความกว้างและความสูงของแต่ละชั้นเท่ากัน สำหรับกรณีนี้จะจำลองที่ความกว้างของปล่องเป็น 1.0 m และปล่องสูง 5 m เท่านั้น ช่องเปิดเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่อาคารมีหนึ่งช่อง อยู่บนผนังด้านซ้ายมือสูงกว่าระดับพื้นดิน 1 m ความกว้างของช่องเปิดนี้เท่ากับ 0.5 m อากาศจะไหลเข้าสู่ชั้นที่สองของอาคารผ่านช่องที่ติดกับผนังด้านขวาซึ่งมีลักษณะและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.13 และไหลเข้าสู่ห้องหลังคาผ่านช่องเปิดที่มีลักษณะเดียวกันนี้ซึ่งอยู่ด้านซ้ายมือ มุมเอียงของหลังคากระบอกในกรณีนี้มีค่าเดียวคือ 15° ความสูงของปล่องเมื่อวัดจากมุมยอดของหลังคาเป็น 5 m ดังรูป



รูปที่ 3.13 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบไม่สมมาตร

ลักษณะการทำงานโดยรวมของการถ่ายเทอากาศในอาคาร 2 ชั้น ด้วยระบบการพาอिसระผ่านห้องหลังคาที่รับแดด คือ แสงแดดตกกระทบบนหลังคาจะจกใสทำให้อากาศในห้องได้หลังคาร้อนขึ้นตามปรากฏการณ์เรือนกระจก ความหนาแน่นของอากาศภายในห้องหลังคาจึงลดลงอากาศที่ร้อนขึ้นนี้จะลอยตัวสูงขึ้นตามหลักของการพาอिसระผ่านเข้าไปในปล่องและออกสู่บรรยากาศ อากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะไหลเข้ามาแทนที่ผ่านช่องเปิดสำหรับให้อากาศไหลเข้าที่อยู่ด้านล่าง และไหลผ่านช่องเปิดตามบริเวณต่าง ๆ ในอาคารตามที่ออกแบบดังรูปที่ 3.12 จนกระทั่งไหลออกที่ปลายปล่องในที่สุด การไหลของอากาศจะเกิดเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ระบายเท่าที่หลังคาจะจกใสยังได้รับพลังงานความร้อนจากแสงแดด อากาศจากภายนอกที่ไหลเข้ามาจะดูดซับรับเอาความร้อนจากร่างกายผู้พักอาศัย ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกเย็นสบายด้วยลมตามธรรมชาติ (โดยไม่จำเป็นต้องใช้พัดลม หรือเครื่องปรับอากาศ) นอกจากนี้ อากาศที่ไหลผ่านอาคารนี้ยังช่วยดูดซับความร้อนที่ถ่ายเทจากอุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดความร้อนต่าง ๆ ที่อยู่ภายในอาคาร ตลอดจนความร้อนจากผนังของอาคารอีกด้วย

332 การจำลองอาคารและสมมุติฐานการวิจัย

ในการจำลองอาคารที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ด้วยโปรแกรม CFX-5 ได้ใช้ข้อสมมุติฐานต่าง ๆ เพื่อช่วยให้การจำลองในเบื้องต้นนี้เป็นไปด้วยความง่าย พร้อมทั้งทำการกำหนดสภาวะของสิ่งแวดล้อม ดังนี้

- จำลองการไหลในสองมิติ (ด้วยข้อจำกัดของโปรแกรม CFX-5 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณบนโดเมน 3 มิติ เท่านั้น) ในการจำลองการไหลในสองมิติ จึงกำหนดให้ความหนาในแกนที่สามมีค่าน้อย ๆ เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ ในที่นี้กำหนดให้ความหนาทางแกน Z ของอาคารเป็น 0.25 m ซึ่งคิดเป็นประมาณหนึ่งความยาวเมฆหรือน้อยกว่า)

- สมมุติให้การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบที่สภาวะคงตัว ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 1

- เลือกจำลองด้วย Boussinesq model (ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับการทดสอบโปรแกรม)

- สมมุติให้เพดานและพื้นของอาคาร ตลอดจนแผ่นกั้นบริเวณช่องเปิดระหว่างชั้นที่หนึ่ง กับชั้นที่สอง และชั้นที่สองกับห้องหลังคาของอาคารแบบไม่สมมาตร ให้เป็นวัสดุที่ไม่มีมีความหนา (thin surface)

- สมมุติให้ผนัง พื้น และเพดาน เป็นผนังแบบฉนวนสมบูรณ์ (adiabatic wall) เนื่องจากเป็นงานวิจัยเบื้องต้นที่สนใจพฤติกรรมการไหลในภาพรวม

- ความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในห้องหลังคา อันเกิดจากแสงแดดที่ตกกระทบบนหลังคากระจกใส จำลองด้วยแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) ภายในห้องหลังคาและเนื่องจากโปรแกรม CFX-5 เป็นโปรแกรมที่คำนวณด้วยกรรมวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ซึ่งจะแบ่งพื้นที่ในโดเมนออกเป็นปริมาตรเล็ก ๆ ดังนั้น จึงกำหนดเป็นความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (heat per unit volume) เมื่อกำหนดให้พื้นที่รับแสงของหลังคาเท่ากับพื้นที่ของหลังคาที่วางตัวในแนวระดับ ($\theta = 0$) ดังเหตุผลที่อธิบายไว้ในบทที่ 1

- อากาศภายนอกอาคารเป็นอากาศที่อุณหภูมิ 35°C (ประมาณ 308 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย) ที่ความดันบรรยากาศ

- สำหรับอาคารแบบสมมาตร จะจำลองเพียงครึ่งเดียวเพื่อลดเวลาในการคำนวณ แต่ในการนำเสนอผลลัพธ์จะเสนอแบบเต็มรูป

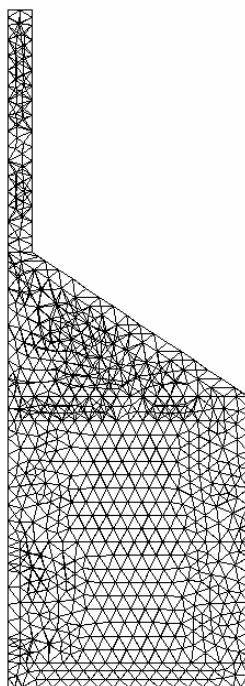
3.3.3 การสร้างเมช

เมชที่ใช้ในการจำลองนี้เป็นเมชแบบไร้โครงสร้าง (unstructured mesh) มีรูปร่างเป็นปริมาตรหรือปริซึมหรือตามแต่ผู้ใช้จะกำหนด เริ่มจากการแบ่งสองมิติที่พื้นผิวด้านหน้าของอาคารออกเป็นสามเหลี่ยมเล็ก ๆ (เป็นรูปแบบเบื้องต้นของโปรแกรม) จากนั้น โปรแกรมจะทำการแบ่งเมช

สามมิติภายในอาคารออกเป็นปริมาตรเล็ก ๆ เรียกแต่ละปริมาตรนี้ว่า “Mesh” แต่ละเมชจะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ เรียกจุดต่อนั้นว่า “Node” รูปแบบของเมชอาจจะเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ ซึ่งรูปแบบทั้งสองเป็นรูปแบบเบื้องต้นของโปรแกรม ในการคำนวณเริ่มจากการสร้างเมชแบบหยาบก่อน ขั้นตอนที่ 2 จึงจะทำการปรับขนาดเมชโดยเพิ่มความละเอียดของเมชในบริเวณที่มีพื้นที่เล็ก ๆ เช่น ช่องเปิด หรือภายในปล่อง เป็นต้น และมีการปรับขนาดเมชตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร โดยใช้ฟังก์ชัน Mesh Adaption ดังจะอธิบายเป็นขั้นตอนดังนี้

3.3.3.1 การสร้างเมชเบื้องต้น

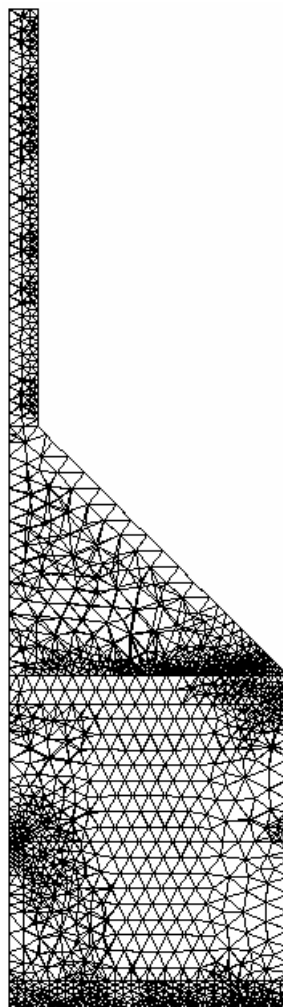
ในขั้นตอนของการสร้างเมช ต้องเริ่มจากการกำหนดความยาวที่มากที่สุดของเมช (Maximum Edge Length) สำหรับเมชแบบหยาบนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.25 m จากนั้นโปรแกรมจะทำการแบ่งเมชสามมิติภายในอาคาร เมื่อเสร็จสิ้นแล้วพบว่า จำนวนเมชมีทั้งสิ้น 7,512 เมช โดยมีจำนวนจุดต่อทั้งสิ้น 2,185 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การกำหนดเมชนี้ไม่เหมาะสม เพราะเป็นการกำหนดให้เมชมีขนาดเท่ากันทั้งอาคาร โดยมีได้คำนึงถึงบริเวณที่มีรูปร่างแคบ ๆ หรือเล็กกว่าบริเวณอื่นของตัวอาคาร เช่น บริเวณภายในปล่อง หรือบริเวณช่องเปิดต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าภายในห้องมาก ซึ่งหากกำหนดให้ Maximum Edge Length มีค่าเท่ากับ 0.25 m ดังกล่าว ก็จะพบว่าที่บริเวณช่องเปิดมีเมชจำนวน 2 เมช เท่านั้น ซึ่งถือว่าน้อยเกินไป



รูปที่ 3.14 ลักษณะเมชเบื้องต้น (7,512 เมช 2,185 จุด 3,492 หน้า)

3332 การปรับเมช

ทำการกำหนดเมชให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของอาคาร และมีการปรับเมชตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ในที่นี้กำหนดให้มีเมชขนาดเล็กในส่วน of อาคารที่มีลักษณะแคบและเล็กเมื่อเทียบกับส่วนอื่น เช่น ภายในปล่องและบริเวณช่องเปิดต่าง ๆ โดยสามารถกำหนดภายในฟังก์ชัน Mesh Control ของโปรแกรม นอกจากนี้ยังกำหนดให้โปรแกรมทำการปรับเมชให้เองอัตโนมัติโดยโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์จากผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละรอบการคำนวณและทำการปรับขนาดของเมชให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยใช้ฟังก์ชัน Mesh Adaption ในที่นี้จะต้องระบุว่าต้องการให้โปรแกรมปรับเมชตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรใดบ้าง เรียกว่า “Adaption Variables” ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกตัวแปรที่สำคัญของปัญหาการไหลลักษณะนี้ทั้งสิ้น 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความเร็ว จะเห็นว่าผู้วิจัยไม่ได้เลือกตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งตัวของปัญหาการไหลนี้คือ ความหนาแน่น เนื่องจากว่า การจำลองปัญหาในครั้งนี้ได้จำลองโดยใช้ Boussinesq model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นน้อยมากเมื่อให้อุณหภูมิและความดันเปลี่ยนไป กำหนดให้โปรแกรมทำการปรับเมช 3 ครั้ง ครั้งละ 500 รอบการคำนวณ โดยลำดับแรกโปรแกรมจะทำการคำนวณโดยใช้เมชเริ่มต้นซึ่งจะได้จากการใช้ Mesh Control เมื่อครบ 500 รอบ (เป็นค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสม) โปรแกรมจะทำการปรับเมช โดยโปรแกรมจะทำการปรับเมชทั้งสิ้นตามจำนวนครั้งที่ผู้ใช้กำหนด ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยกำหนดให้โปรแกรมทำการปรับเมชทั้งหมด 3 ครั้ง รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างเมชการคำนวณภายหลังจากทำการปรับเมชครั้งสุดท้ายเรียบร้อยแล้วของการจำลองที่ความสูงปล่อง 5 m หลังคาเอียง 45° ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะเมชที่ได้นั้นมีคุณสมบัติการไหลและเหมาะสมกับโดเมนมากขึ้น



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างเมชที่ผ่านการปรับเมชแล้วสำหรับกรณีที่ 35 (17,677 เมช 4,615 จุด 5,970 หน้า)

334 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตที่เลือกใช้ในการจำลองปัญหาการไหลผ่านอาคารมีทั้งสิ้น 4 ประเภทเช่นเดียวกับการทดสอบโปรแกรม คือ Inlet, Outlet, Wall และ Symmetry Plane โดยมีข้อกำหนดไว้ที่พื้นผิวต่าง ๆ ของอาคารดังนี้

3341 พื้นผิวของช่องเปิดที่ผนังชั้นล่าง

กำหนดให้พื้นผิวของช่องเปิดที่ผนังชั้นล่าง ซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศจากด้านนอกไหลเข้าสู่อาคารนี้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Inlet ความดันรวมที่พื้นผิวนี้นี้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับที่พื้นผิวด้านล่างของการทดสอบโปรแกรม นั่นคือ ความเร็วตรงทางเข้ามีค่าเท่ากับความเร็วของอากาศที่ระยะไกลซึ่งมีค่าน้อยมากจึงสมมุติให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และกำหนดให้มีทิศทางการไหลตั้งฉากกับพื้นผิว ความดันพลวัต ณ ตำแหน่งนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

ส่วนความดันสถิตยมีค่าเท่ากับศูนย์เพราะในการคำนวณโปรแกรมจะไม่พิจารณาความดันเนื่องจากน้ำหนัก ดังนั้น ความดันรวมซึ่งเท่ากับความดันพลวัตบวกกับความดันสถิตยจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ไปโดยปริยาย

3342 พื้นผิวหน้าตัดที่ปลายปล่อง

กำหนดให้พื้นผิวหน้าตัดที่ปลายปล่องซึ่งเป็นช่องทางให้อากาศจากภายในอาคารไหลออกสู่บรรยากาศมีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Outlet โดยมีทิศทางการไหลออกตั้งฉากกับพื้นผิว ความดันสถิตยสัมพัทธ์ที่พื้นผิวนี้นี้มีค่าเท่ากับศูนย์ คำตอบหนึ่งที่จะได้รับที่พื้นผิวนี้ คือค่าอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งในการคำนวณโปรแกรมจะใช้วิธีการประมาณการภายนอก (Extrapolation)

3343 พื้นผิวแนวตั้งที่อยู่กึ่งกลางอาคาร

กำหนดให้พื้นผิวนี้นี้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Symmetry Plane เพราะพื้นผิวนี้เป็นพื้นผิวที่แสดงความสมมาตร ทำหน้าที่เป็นเสมือนกระจกสะท้อนข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณลงได้ถึงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการคำนวณที่ใช้ขอบเขตของโดเมนทั้งอาคาร

3344 พื้นผิวด้านหน้าและด้านหลัง

กำหนดให้พื้นผิวนี้นี้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Symmetry Plane เช่นเดียวกันกับการกำหนดในการทดสอบโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมคำนวณบนสองมิติเท่านั้น

3345 พื้นผิวด้านที่เหลือ

พื้นผิวในส่วนที่ยังไม่ได้กล่าวถึงทั้งหมด โปรแกรมจะกำหนดให้มีเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Adiabatic-Wall แบบ No-Slip โดยอัตโนมัติโดยผู้ที่ไม่จำเป็นต้องระบุชนิดของเงื่อนไขขอบเขตให้กับพื้นผิวดังกล่าว

335 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

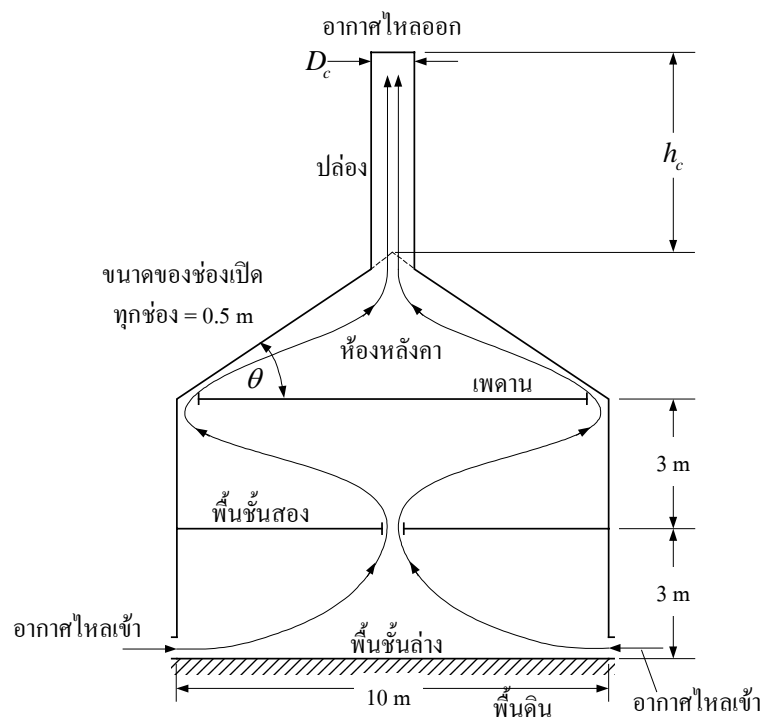
การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสามารถกำหนดเช่นเดียวกันกับการกำหนดในการทดสอบโปรแกรม นั่นคือ กำหนดค่าเริ่มต้นของความดันสัมพัทธ์เท่ากับศูนย์ อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 308 K และความเร็วทั้ง 3 แกนในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (U V และ W) มีค่าเท่ากับศูนย์

บทที่ 4

ผลลัพท์และการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

เพื่อศึกษาอัตราการถ่ายเทอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องลมแดงที่ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.1



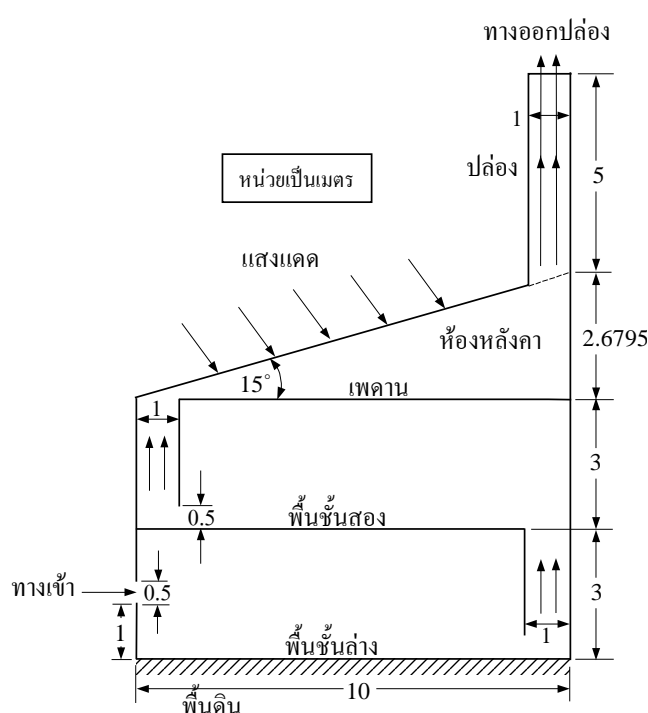
รูปที่ 4.1 อาคารแบบสมมาตร

ทำการจำลองการไหลผ่านอาคารแบบสมมาตร เมื่อกำหนดให้ความกว้างของปล่อง (D_c) เป็น 1 m และมีการเปลี่ยนค่าตัวแปร ดังนี้

- ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2 , 550 W/m^2 และ 800 W/m^2
- ค่าความสูงของปล่อง (วัดจากยอดหลังคาที่เอียง 45°) 3 m, 5 m และ 7 m
- ค่ามุมเอียงของหลังคา 15° , 30° , 45° และ 60°

รวมเป็น 36 กรณี จากนั้นทำการจำลองเพิ่มอีก 2 กรณี เพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของปล่องจาก 1 m เป็น 1.5 m และ 0.5 m ตามลำดับ โดยเลือกจำลองกับอาคารที่มีปล่องสูง 3 m มุมเอียงของหลังคา 45° เมื่อให้ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 800 W/m^2 ดังนั้น จำนวนกรณีที่ทำการจำลองสำหรับอาคารแบบสมมาตรจึงมีทั้งสิ้น 38 กรณี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1

นอกจากนี้ ในส่วนท้ายของงานวิจัย ได้ออกแบบอาคารซึ่งมีลักษณะไม่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อาคารแบบไม่สมมาตร

ทำการจำลองการไหลผ่านอาคารแบบไม่สมมาตรดังรูปที่ 4.2 การจำลองครั้งนี้ไม่สามารถใช้เมชเพียงครึ่งหนึ่งของอาคารได้ ดังนั้น การคำนวณแบบไม่สมมาตรจึงต้องใช้เมชในการคำนวณทั้งอาคาร การออกแบบอาคารในลักษณะนี้ คาดว่าจะสามารถทำให้เกิดเส้นการไหล (streamline) พัดผ่านบริเวณคนอยู่อาศัยมากขึ้น ถึงแม้ว่าพื้นที่ช่องเปิดสำหรับให้อากาศไหลเข้าอาคารกรณีนี้น้อยกว่ากรณีอาคารแบบสมมาตรถึงครึ่งหนึ่ง แต่สันนิษฐานว่าอัตราการไหลจะยังคงมีค่าประมาณเท่าเดิมหรืออาจมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารแบบสมมาตรที่เงื่อนไขเดียวกัน (กรณีที่ 29) เพราะพื้นที่ช่องเปิดทางเข้าที่น้อยลงจะส่งผลให้ความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ในการจำลองใช้ค่าความเข้ม

ของแสงแดด 800 W/m^2 และมีขนาดของอาคารดังแสดงในรูปที่ 4.2 ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากแสงแดดยังคงกำหนดด้วยค่าแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้องหลังคา ซึ่งในที่นี้ คำนวณค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรได้เท่ากับ 603.1704 W/m^3 (เมื่อกำหนดให้พื้นที่รับแสงของหลังคามีค่าเท่ากับพื้นที่ในแนวระดับ)

โดยสรุปแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการไหลผ่านอาคารทั้งสิ้น 39 กรณี โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแต่ละการจำลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของอาคารแต่ละกรณี

กรณีที่	D_c (m)	ความเข้มของแสงแดด $Q(\text{W/m}^2)$			ความสูงของปล่อง $h_c(\text{m})$			มุมเอียงของหลังคา θ (องศา)			
		300	550	800	3	5	7	15	30	45	60
1	1.0	✓			✓			✓			
2	1.0	✓			✓				✓		
3	1.0	✓			✓					✓	
4	1.0	✓			✓						✓
5	1.0	✓				✓		✓			
6	1.0	✓				✓			✓		
7	1.0	✓				✓				✓	
8	1.0	✓				✓					✓
9	1.0	✓					✓	✓			
10	1.0	✓					✓		✓		
11	1.0	✓					✓			✓	
12	1.0	✓					✓				✓
13	1.0		✓		✓			✓			
14	1.0		✓		✓				✓		
15	1.0		✓		✓					✓	
16	1.0		✓		✓						✓
17	1.0		✓			✓		✓			
18	1.0		✓			✓			✓		
19	1.0		✓			✓				✓	
20	1.0		✓			✓					✓

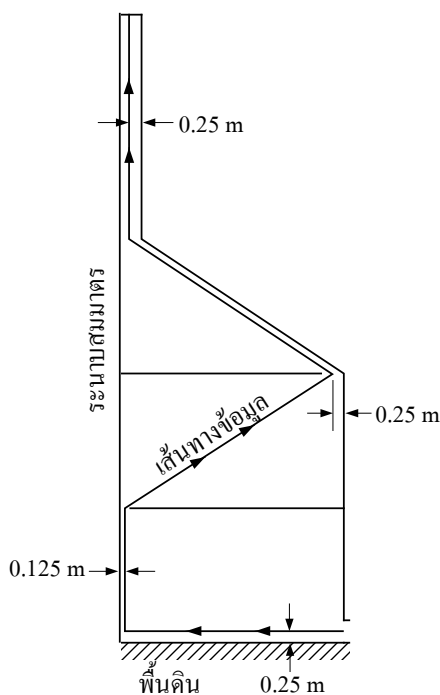
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

กรณีที่	D_c (m)	ความเข้มของแสงแดด Q (W/m ²)			ความสูงของปล่อง h (m)			มุมเอียงของหลังคา θ (องศา)			
		300	550	800	3	5	7	15	30	45	60
21	1.0		✓				✓	✓			
22	1.0		✓				✓		✓		
23	1.0		✓				✓			✓	
24	1.0		✓				✓				✓
25	1.0			✓	✓			✓			
26	1.0			✓	✓				✓		
27	1.0			✓	✓					✓	
28	1.0			✓	✓						✓
29	1.0			✓		✓		✓			
30	1.0			✓		✓			✓		
31	1.0			✓		✓				✓	
32	1.0			✓		✓					✓
33	1.0			✓			✓	✓			
34	1.0			✓			✓		✓		
35	1.0			✓			✓			✓	
36	1.0			✓			✓				✓
37	1.5			✓	✓					✓	
38	0.5			✓	✓					✓	
39	1.0			✓		✓		✓			

สำหรับบทนี้ จะนำเสนอผลการจำลองปัญหาการไหลโดยการพาอิสระผ่านห้องหลังคารับแดดด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล CFX-5 ในลักษณะของแผนภูมิ กราฟ หรือรูปภาพ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ตลอดจนเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาเพื่อขยายผลของงานวิจัยต่อไป ตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทอากาศที่เกิดขึ้นภายในอาคารในที่นี้คืออัตราการไหลโดยมวล (mass flow rate, \dot{m}) ของอากาศ หากอัตราการไหลโดยมวลของอากาศมีค่ามากหมายถึงมีการถ่ายเทอากาศเกิดขึ้นได้มาก ในทางตรงกันข้าม หากอัตราการไหลโดยมวลของอากาศมีค่าน้อยหมายถึงมีการถ่ายเทอากาศเกิดขึ้นได้

น้อย จุดมุ่งหมายโดยแท้จริงของการศึกษาในครั้งนี้ก็เพื่อหาแนวทางในการออกแบบอาคารด้วยการจัดการกับค่าปัจจัยของอาคารที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดอัตราการไหลมวลของอากาศที่มากที่สุด

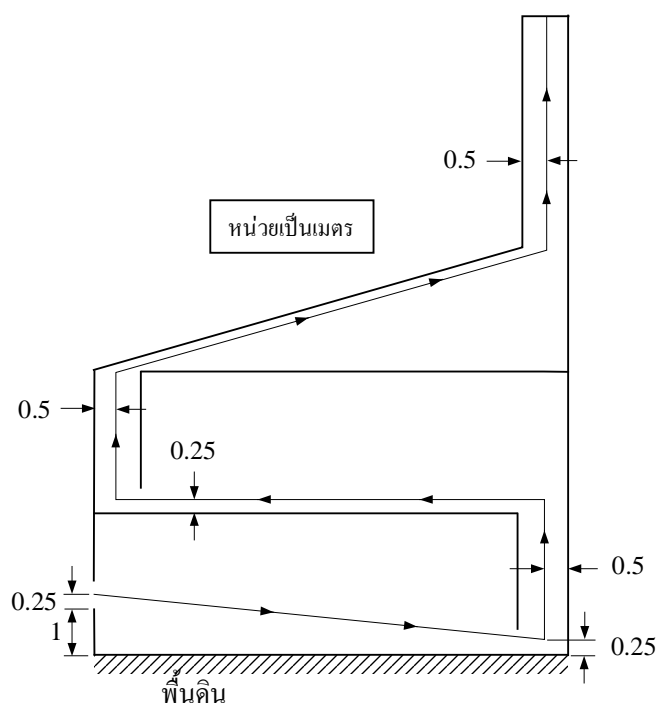
ผลลัพธ์จากการจำลองของแต่ละกรณีถูกนำมาแสดงผลด้วยรูปภาพต่าง ๆ โดยใช้ CFX-Post ซึ่งมีความสามารถในการแสดงผลในหลายลักษณะ เช่น เส้นการไหล เวกเตอร์ คอนทัวร์ (contour) เป็นต้น ค่าตัวแปรที่มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์บางอย่างสามารถคำนวณได้โดยใช้ฟังก์ชัน Calculator ที่อยู่ในเมนู Tool ของ CFX-Post งานวิจัยนี้มีตัวแปรที่จำเป็นต้องคำนวณเพื่อประกอบการพิจารณาและวิเคราะห์ผล คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในปล่อง (\bar{V}_c) ค่าอัตราการไหลโดยมวลที่เกิดขึ้นภายในอาคารที่ทางเข้าและทางออก ซึ่งนอกจากจะเป็นตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณการถ่ายเทอากาศแล้ว การคำนวณอัตราการไหลยังเป็นการตรวจสอบว่าการไหลสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวลหรือไม่ นอกจากนี้ ได้ทำการคำนวณความเร็วที่ระยะความสูง 1.0 m วัดจากพื้นดินชั้นล่าง ซึ่งเป็นความสูงในช่วงที่คนพักอาศัย เพื่อวิเคราะห์ความเร็วที่เกิดขึ้นว่าเพียงพอต่อความสบายของผู้พักอาศัยหรือไม่ ตลอดจนคำนวณค่าตัวแปรที่เป็นประโยชน์อื่น ๆ ดังจะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไป ข้อมูลบางอย่างถูกส่งไปพล็อตด้วยโปรแกรม Excel เพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์การไหลผ่านอาคารได้ง่ายยิ่งขึ้น เช่น ความดัน ความเร็ว และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยเลือกข้อมูลตามเส้นทางข้อมูล (information path) ซึ่งกำหนดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบสมมาตร (เส้นตามลูกศร)

เส้นทางข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.3 ใช้สำหรับอาคารแบบสมมาตรเท่านั้น กำหนดให้เส้นทางข้อมูลดังกล่าวอยู่บนระนาบกึ่งกลางของความหนาทางแกน Z (ที่ $Z=0.125$ m) มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่กึ่งกลางของช่องเปิดด้านล่างเหนือระดับพื้นดินชั้นล่างเท่ากับ 0.25 m ลากขนานไปกับพื้นดินชั้นล่างจนถึงระยะที่ห่างจากระนาบสมมาตร (symmetry plane) เท่ากับ 0.125 m จากนั้นลากเป็นแนวตั้งขึ้น ไปจนถึงช่องเปิดที่พื้นของชั้นสอง และลากต่อเป็นมุมเอียงไปที่กึ่งกลางของช่องเปิดที่เพดาน ลากเป็นมุมเอียงขนานกับสันเอียงของหลังคาต่อไปจนถึงฐานปล่อง และสุดท้ายลากเป็นแนวตั้งขึ้น ไปสิ้นสุดที่ปลายปล่อง

ในการจำลองทำการคำนวณเพียงครึ่งหนึ่งของอาคาร เพราะเป็นปัญหาการไหลที่มีความสมมาตร แต่ในการแสดงผลลัพธ์ได้นำมาแสดงทั้งอาคาร ดังนั้นรูปภาพที่แสดงเส้นการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และคอนทัวร์อุณหภูมิ ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป จึงปรากฏเห็นระนาบสมมาตรอยู่กึ่งกลางในแนวตั้งของอาคารด้วยเสมอ ส่วนเส้นทางข้อมูลของอาคารแบบไม่สมมาตรมีลักษณะดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบไม่สมมาตร (เส้นตามลูกศร)

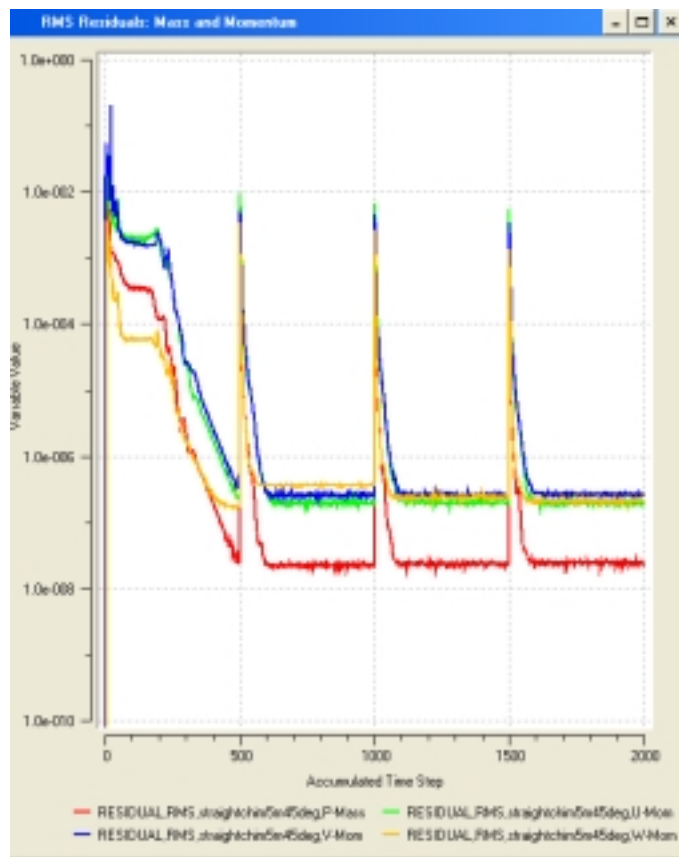
4.2 ผลการจำลอง

เพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ในแต่ละกรณีเป็นผลลัพธ์ที่ถูกต้องแล้ว ได้วิเคราะห์จาก 2 ปัจจัย คือ

1. ส่วนตกค้าง (Residual)
2. อัตราการไหลโดยมวล (Mass flow rate)

คำตอบที่ถูกต้อง ควรมีค่าส่วนตกค้างสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าที่เล็ก ๆ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และเป็นค่าที่สภาวะคงตัวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว นอกจากนี้ ต้องมั่นใจว่าการไหลสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวล นั่นคือ มวลของอากาศที่ไหลเข้าอาคารต้องเท่ากับมวลของอากาศที่ไหลออกจากอาคาร

ระหว่างการคำนวณของโปรแกรม CFX-5 โปรแกรมจะแสดงค่าส่วนตกค้าง (residual) ของคำตอบในแต่ละรอบการคำนวณบนหน้าจอแสดงผล ค่าส่วนตกค้าง หมายถึงค่าความแตกต่างของคำตอบในรอบการคำนวณรอบปัจจุบันกับรอบที่แล้ว ซึ่งควรมีค่าเล็ก ๆ (ในการคำนวณกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-10}) ดังนั้นเส้นกราฟค่าส่วนตกค้างของแต่ละตัวแปรควรมีค่าต่ำลงเรื่อย ๆ และคงที่ในที่สุด ซึ่งหมายความว่า คำตอบได้ลู่เข้า (converged) แล้ว ในการจำลองแต่ละกรณี ได้ทำการคำนวณจนกระทั่งคำตอบมีการลู่เข้า และส่วนใหญ่ค่าส่วนตกค้างอยู่ในช่วง $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-8}$ ซึ่งเป็นค่าที่เล็กพอที่จะยอมรับได้ ในที่นี้ได้นำกราฟแสดงค่าส่วนตกค้างสำหรับกรณีที่ 8 มาเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นการกระโดดของเส้นกราฟเกิดขึ้น 3 จุด คือรอบการคำนวณที่ 500 รอบ, 1,000 รอบ และ 1,500 รอบ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในขณะที่โปรแกรมทำการปรับเมช (Mesh Adaption) ตาม Adaption Variables ที่กำหนด (ในที่นี้คือ V, p และ T) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้โปรแกรมทำการปรับเมช 3 ครั้ง ทุก ๆ 500 รอบ และพบว่าเมื่อผ่านการปรับเมชครั้งแรกแล้ว ค่าส่วนตกค้างได้ลู่เข้าแล้ว แต่เพื่อให้คำตอบสำหรับทุก ๆ กรณีอยู่บนบรรทัดฐานเดียวกัน ในการจำลองจึงคำนวณ 2,000 รอบเท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 4.5 ค่าส่วนตกค้างของตัวแปรสำหรับกรณีที่ 8

จากผลการจำลองทั้ง 39 กรณี ทำการคำนวณค่าอัตราการไหลโดยมวลที่ทางเข้าและทางออกของอาคาร พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคารมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากอาคารในทุก ๆ กรณี เช่น ในกรณีที่ 1 คำนวณค่าอัตราการไหลเข้าและออกได้เท่ากับ $50.65 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ เป็นต้น

จากคำอธิบายข้างต้น จึงมั่นใจได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ จากนั้นไปเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมาแสดงผลด้วยกราฟข้อมูล หรือรูปภาพที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ดังได้กล่าวไปแล้ว โดยการแสดงผลได้แยกแสดงเป็นผลลัพธ์ที่แต่ละค่าความเข้มของแสงแดด ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2

ทำการจำลองการไหลผ่านอาคารที่ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2 ทั้งหมด 12 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ความสูงของปล่องที่ใช้ในการจำลองเป็น 3 m, 5 m และ 7 m แต่ความสูงของปล่องจะจำลองด้วยค่ามุมเอียงของหลังคา 4 ค่า คือ 15° , 30° , 45° และ 60° คำนวณค่า

ความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของหลังคาที่ได้รับจากความเข้มของแสงแดดที่ค่ามุมเอียงต่าง ๆ (กำหนดให้พื้นที่รับแสงแดดของหลังคาเท่ากับขนาดของเพดาน เสมือนว่าอาคารมีหลังคาอยู่ในแนวระนาบ) ได้ดังนี้

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 15^\circ = 452.3591 \text{ W/m}^3$$

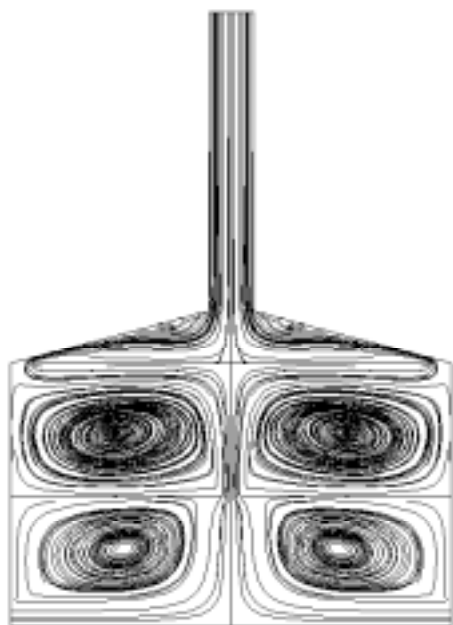
$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 30^\circ = 209.9517 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 45^\circ = 121.2121 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 60^\circ = 69.9821 \text{ W/m}^3$$

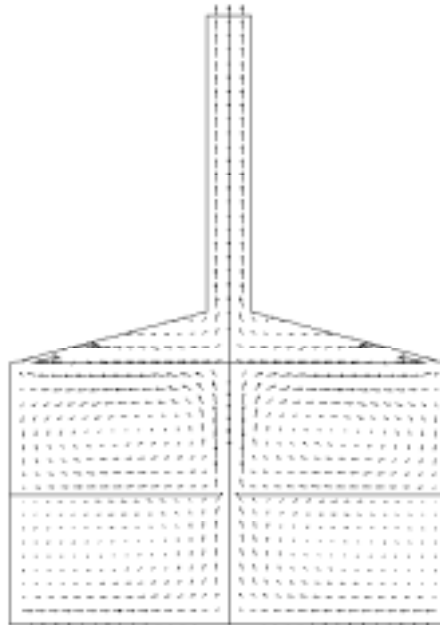
ผลลัพธ์จะถูกแสดงในรูปของเส้นการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และคอนทัวร์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอาคาร จากผลการจำลอง พบว่า ที่ความสูงของปล่องค่าหนึ่ง จะมีลักษณะเส้นการไหลของอากาศผ่านอาคาร และการกระจายของเวกเตอร์ความเร็ว ตลอดจนคอนทัวร์ของอุณหภูมิคล้ายคลึงกัน สำหรับกรณีการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2 นี้ จะแสดงตัวอย่างผลลัพธ์จากการจำลองที่ความสูงของปล่อง 3 m (ซึ่งตรงกับกรณีที่ 1 – 4 ตามตารางที่ 4.1) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.13

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



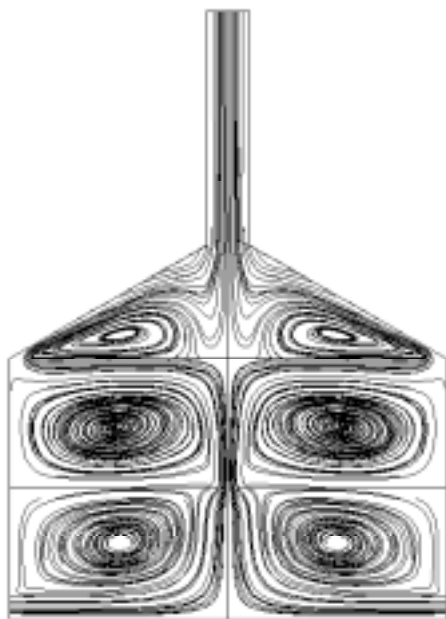
รูปที่ 4.6 เส้นการไหลกรณีที่ 1

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



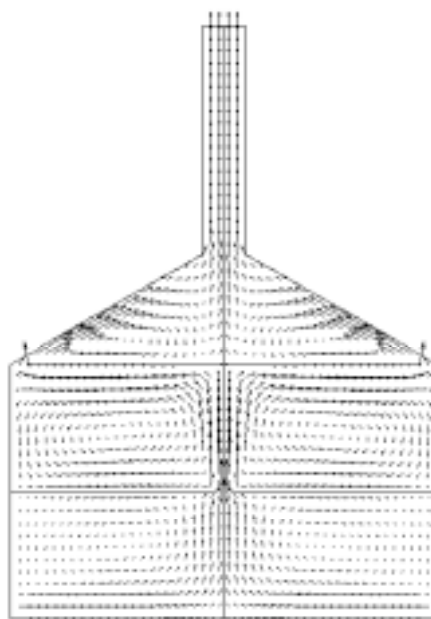
รูปที่ 4.7 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 1

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



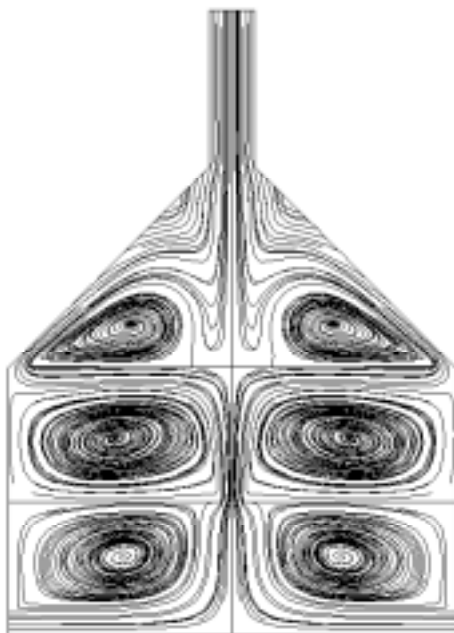
รูปที่ 4.8 เส้นการไหลกรณีที่ 2

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



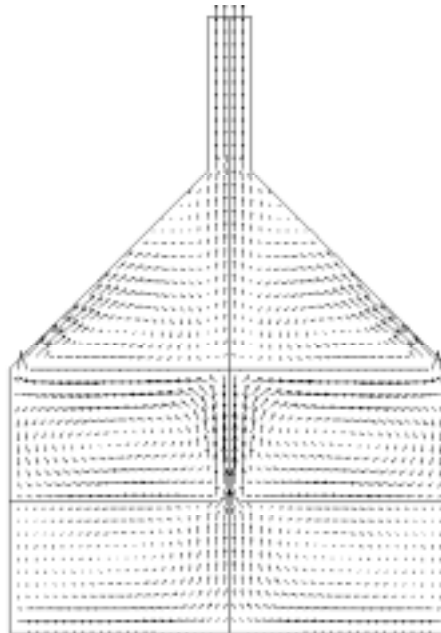
รูปที่ 4.9 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 2

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



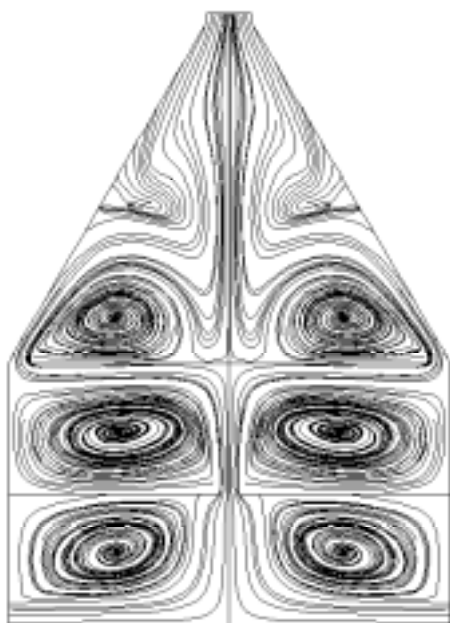
รูปที่ 4.10 เส้นการไหลกรณีที่ 3

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



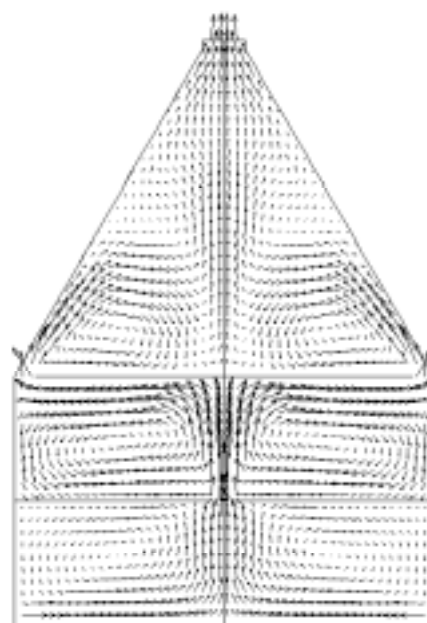
รูปที่ 4.11 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 3

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$



รูปที่ 4.12 เส้นการไหลกรณีที่ 4

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$

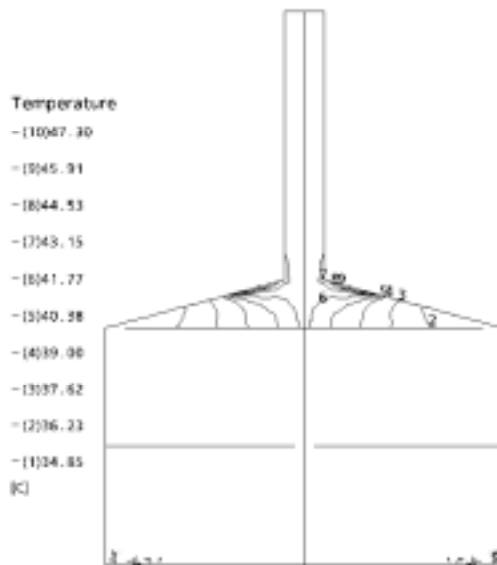


รูปที่ 4.13 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 4

เมื่ออากาศร้อนใต้หลังคาพัดลอยสูงเข้าไปในปล่อง จะก่อให้เกิดพื้นที่ว่างขึ้น ดังนั้น อากาศที่อยู่ภายในห้องพักซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเข้ามาแทนที่ และอากาศจากด้านนอกก็จะไหลเข้ามาแทนที่อากาศภายในห้องพักที่หายไปอีกต่อหนึ่ง จึงเกิดการไหลเวียนและถ่ายเท จากรูป จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสการไหลมีการหมุนวนภายในห้องพักทั้งสองชั้น พิจารณาเส้นการไหลที่ค่ามุมเอียง 30° ขึ้นไป จะเห็นได้ชัดเจนว่าเกิดการตกลงของเส้นการไหลและมีการหมุนวนของอากาศภายในห้องหลังคา เป็นเพราะเกิดการม้วนตัวของอากาศจากการบานตัวอย่างรวดเร็วของช่วงหลัง พุทธิกรรมเช่นนี้เป็นลักษณะเดียวกับการไหลอ้อมด้านหลังของลูกทรงกลม หรือการไหลผ่านช่องบานตัวอย่างจับปล้น (backward facing step)

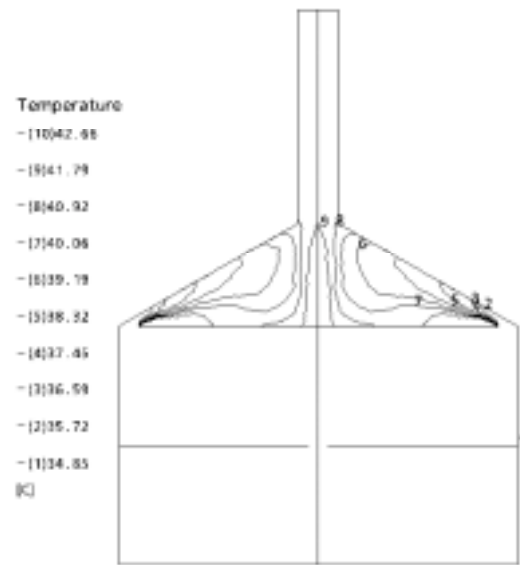
รูปที่ 4.14 – 4.17 แสดงคอนทัวร์ของอุณหภูมิสำหรับกรณี 1 – 4 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้นทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลง ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิของเส้นคอนทัวร์เส้นที่ 10 ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมเอียงของหลังคาเป็น 15° และน้อยสุดเมื่อมุมเอียงของหลังคาเป็น 60° ซึ่งอธิบายตามกฎของการอนุรักษ์พลังงานได้ว่า เนื่องจากห้องหลังคาได้รับความร้อนจากแสงแดดในปริมาณเท่ากัน ดังนั้น เมื่อปริมาตรควบคุม (ซึ่งคือห้องหลังคา) มีค่ามากขึ้น อุณหภูมิภายในห้องหลังคา รวมถึงภายในปล่องจึงมีค่าลดลง

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



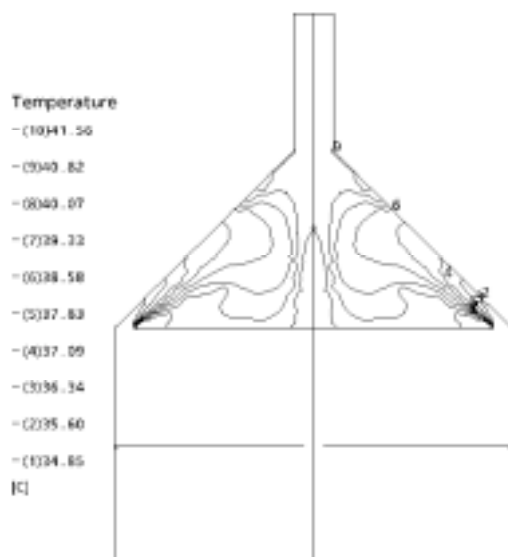
รูปที่ 4.14 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 1

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



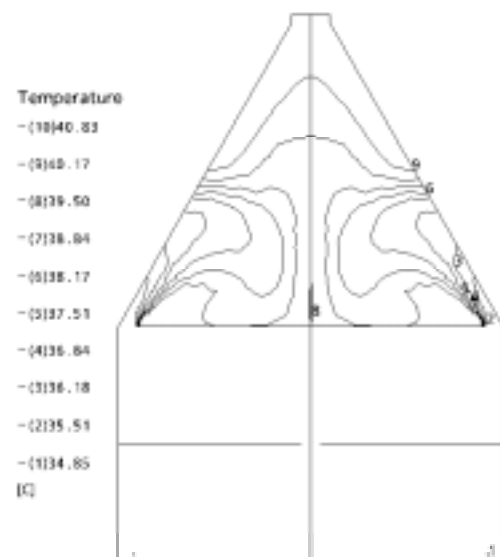
รูปที่ 4.15 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 2

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



รูปที่ 4.16 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 3

$$Q = 300 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$

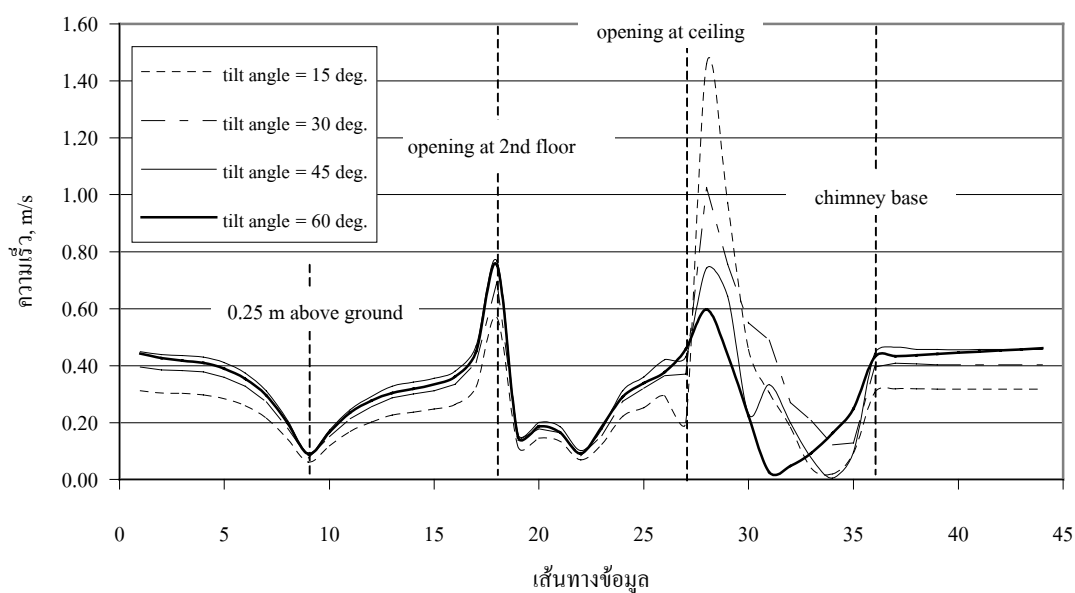


รูปที่ 4.17 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 4

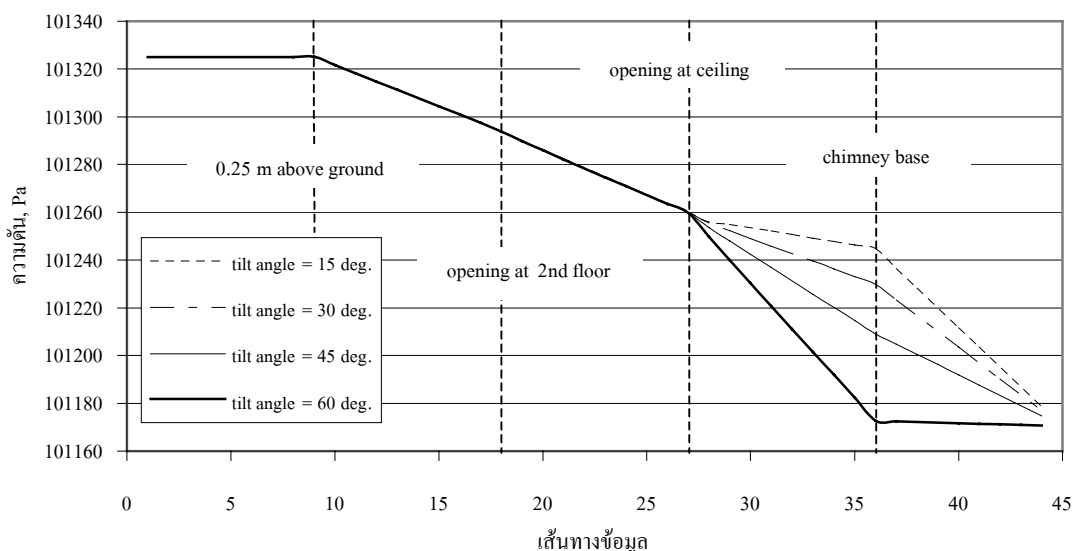
การกระจายของข้อมูลบนเส้นทางข้อมูลที่กำหนดไว้ในรูปที่ 4.3 ในกรณีปล่องสูง 3 m ถูกนำมาพล็อตเพื่อเปรียบเทียบความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น ตามค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 – 4.21 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่นำมา

พล็อตเป็นข้อมูลบนเส้นทางข้อมูลที่กำหนดขึ้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 จึงไม่อาจสรุปภาพรวมได้ดังที่มองเห็นจากเส้นกราฟ เช่น จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าความเร็วภายในปล่องที่มุมเอียง 60° มีค่าน้อยกว่าที่มุมเอียง 45° แต่หากพิจารณาจากการคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยภายในปล่อง พบว่าความเร็วเฉลี่ยภายในปล่องที่มุมเอียง 60° มีค่ามากกว่าที่มุมเอียง 45° (ซึ่งจะได้แสดงในตารางที่ 4.2) ดังนั้น รูปที่ 4.18 นี้ จึงเป็นการแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลเท่านั้น หากต้องการทราบค่าตัวแปรที่แน่นอนต้องใช้การคำนวณจะแม่นยำกว่า

จะเห็นได้จากเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลว่า ความเร็วที่ทางเข้ามีค่าสูง และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงกึ่งกลางอาคาร (ที่ 0.25 m above ground ในรูปที่ 4.18) ความเร็วในการไหลของอากาศจะมีค่ามากบริเวณที่เป็นช่องเปิด ได้แก่ ที่ทางเข้า ช่องเปิดที่พื้นชั้นสอง ช่องเปิดที่เพดาน ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ทางเข้าพื้นที่การไหลของอากาศมีน้อยทำให้ความเร็วของอากาศมากขึ้น (ในกรณีนี้ความหนาแน่นมีค่าเท่ากัน เพราะอุณหภูมิภายในห้องพักเท่ากับอุณหภูมิของอากาศภายนอก) เพื่อให้อัตราการไหลโดยมวลมีค่าเท่ากันเสมอตามกฎของการอนุรักษ์มวล ซึ่งแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลของกรณีอื่น ๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันนี้



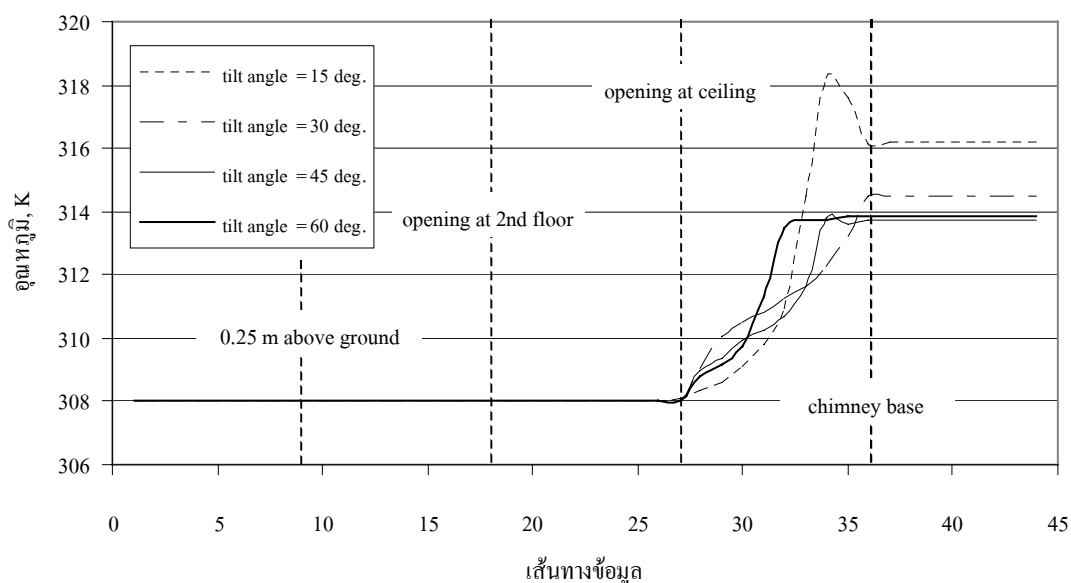
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



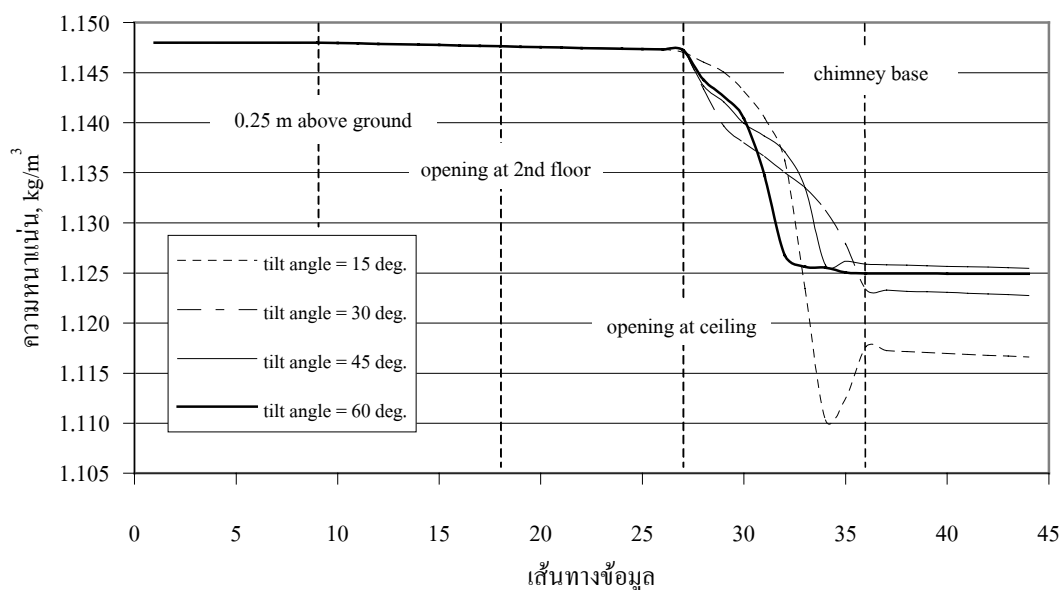
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m ที่มุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เมื่อกำหนดให้ความดันในระดับที่ติดพื้นดินด้านล่างเท่ากับความดันบรรยากาศ (101,325 Pa) พบว่า อัตราการลดลงของค่าความดันจากทางเข้าจนถึงช่องเปิดที่พื้นชั้นสองมีค่าเท่ากัน โดยตลอด และเริ่มแตกต่างกันเมื่อเข้าสู่ชั้นที่สองจนถึงช่องเปิดที่เพดาน แต่ความแตกต่างเล็กน้อยจนยากที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟที่เกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน ความแตกต่างจะชัดเจนเมื่อเข้าสู่ห้องหลังคาเป็นต้นไป โดยพบว่าการลดลงของความดัน (Δp) ในกรณีหลังคาเอียง 15° มีค่าน้อยที่สุด และมากที่สุดเมื่อมุมเอียงของหลังคาเป็น 60° ต้องพึงระลึกเสมอว่า ข้อมูลที่นำมาพล็อตเป็นข้อมูลบนเส้นทางข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.3 แกน X จึงไม่ใช่ค่าความสูงของปล่อง ดังนั้น ความสูงของอาคารเมื่อวัดจากพื้นดินถึงจุดที่เป็นฐานปล่องตามแกน X จะมีค่าไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถนำความดันที่จุดนี้มาเปรียบเทียบกันได้ เพราะเป็นค่าความดันที่ความสูงของอาคารต่าง ๆ กัน หากสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในปล่อง จะเห็นว่าในกรณีหลังคาเอียง 60° เส้นกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง ซึ่งความจริงแล้วเป็นเพราะว่าความสูงของปล่องเมื่อวัดจากฐานปล่องในกรณีหลังคาเอียง 60° นี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสามกรณีแรก ดังนั้น ความแตกต่างของค่าความดันจึงเกิดขึ้นน้อยมาก

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางกรไหลที่ค่าความสูงของปล่องเป็น 3 m ที่มุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.20 พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ห้องหลังคาไปแล้ว พิจารณาอุณหภูมิของอากาศภายในปล่องจะมีค่าค่อนข้างคงที่ และจะเห็นว่า เมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในปล่องมีค่าลดลง ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้ว



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

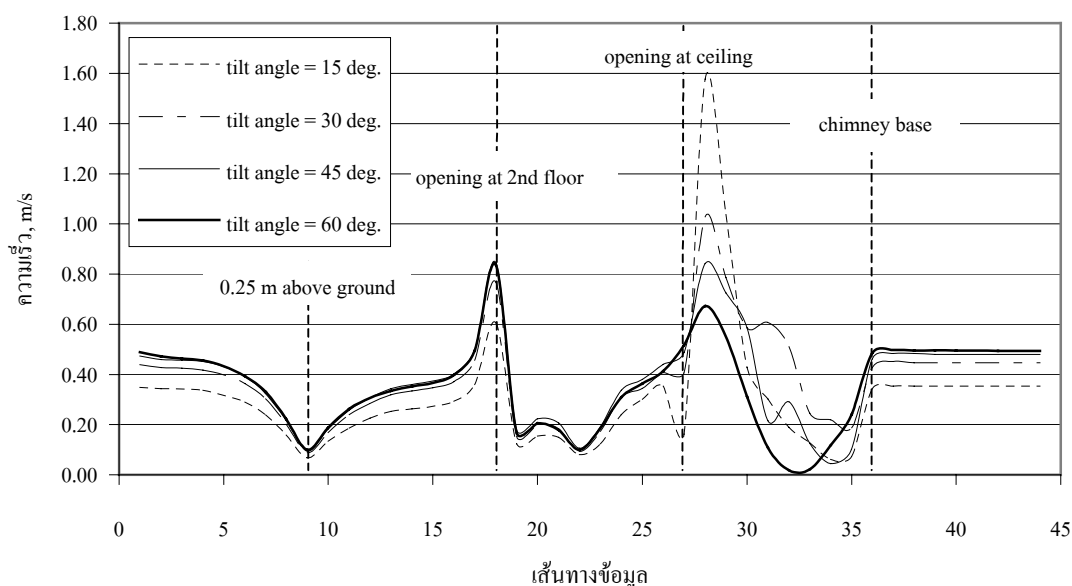


รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

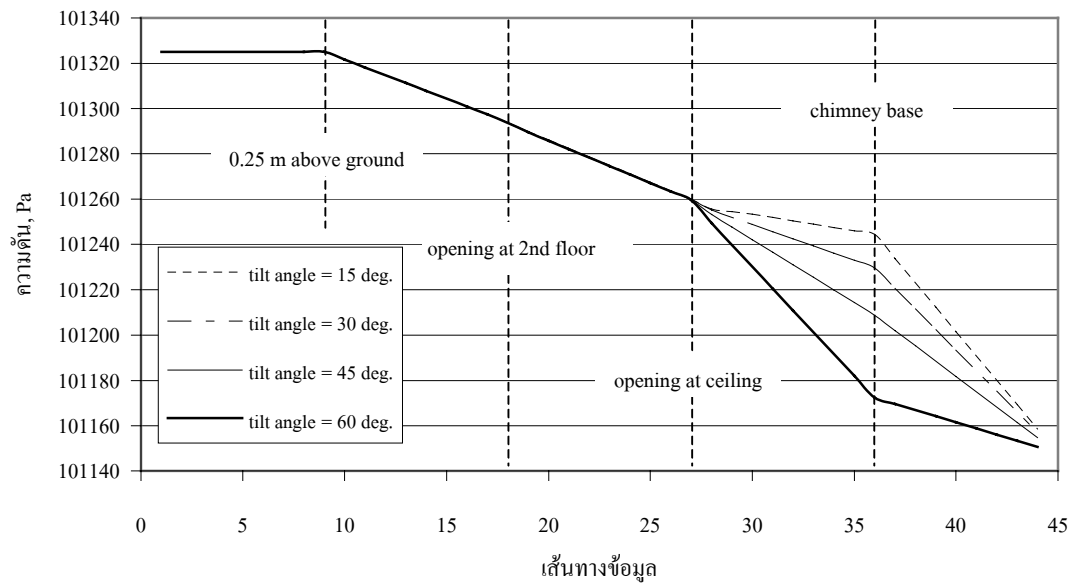
การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.21 ซึ่งมีลักษณะของเส้นกราฟเหมือนเงาสะท้อนของค่าอุณหภูมิในรูปที่ 4.20 เพราะตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เป็นส่วนกลับซึ่งกันและกัน ดังสมการ $\rho = p/RT$ จากเส้นกราฟ จะเห็นว่า ค่าความหนาแน่นของอากาศภายในอาคารมีแนวโน้มลดลงตามเส้นทางข้อมูล โดยในช่วงแรกถึงช่องเปิดที่

เพดาน ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากบริเวณนี้มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิของอากาศภายนอก ความแตกต่างของความหนาแน่นบริเวณนี้จึงเกิดจากค่าความดันที่แตกต่างกันเท่านั้น ซึ่งความดันในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากดัง ได้อธิบายไปแล้วนั้น จึงส่งผลให้ความหนาแน่นบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อย การลดลงของความหนาแน่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในห้องหลังคา และยังคงลดลงเรื่อย ๆ จนถึงปลายปล่อง ผลต่างความหนาแน่นที่เกิดขึ้นนี้เองที่เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการไหลตัวของอากาศภายในอาคาร และเรียกแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากผลต่างความหนาแน่นนี้ว่า “แรงลอยตัว” ดังได้อธิบายไว้ในบทที่ 2

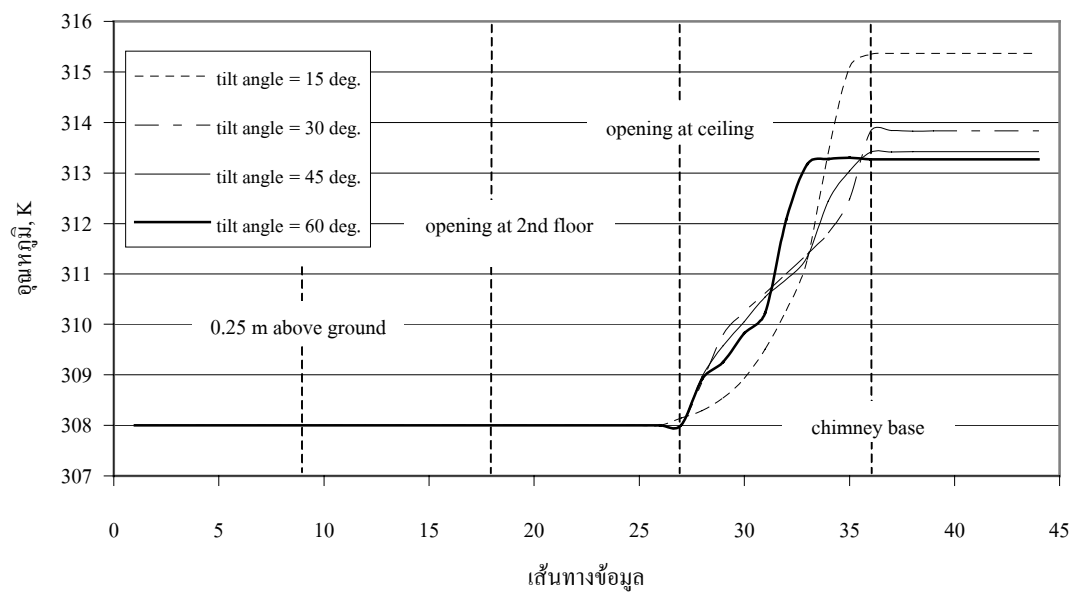
รูปที่ 4.22–4.25 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน อุณหภูมิและความหนาแน่น ตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m (กรณี 5 - 8) และรูปที่ 4.26 – 4.29 (กรณี 9 - 12) เป็นผลลัพธ์กรณีปล่องสูง 7 m ซึ่งโดยรวมแล้วมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทุกตัวไปในทางเดียวกัน พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความดันบริเวณภายในปล่องดังรูปที่ 4.23 (กรณีปล่องสูง 5 m) และ 4.27 (กรณีปล่องสูง 7 m) จะเห็นว่า ความลาดชันของเส้นกราฟบริเวณภายในปล่องมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปล่องสูง 3 m (รูปที่ 4.19) เพราะความสูงในส่วนที่เป็นปล่องมากขึ้น ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของความดันภายในปล่องได้ชัดเจนกว่า



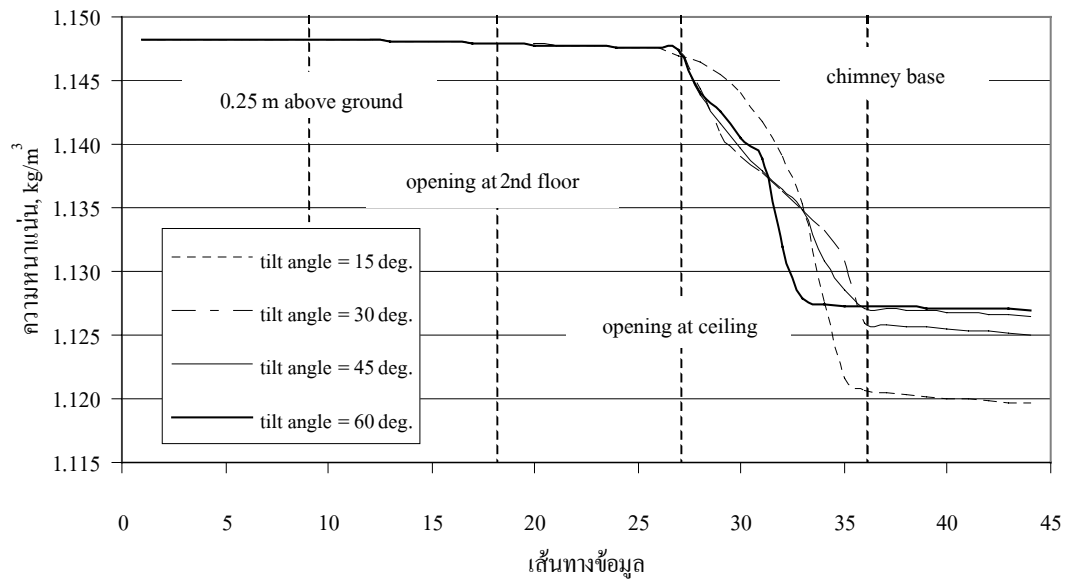
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



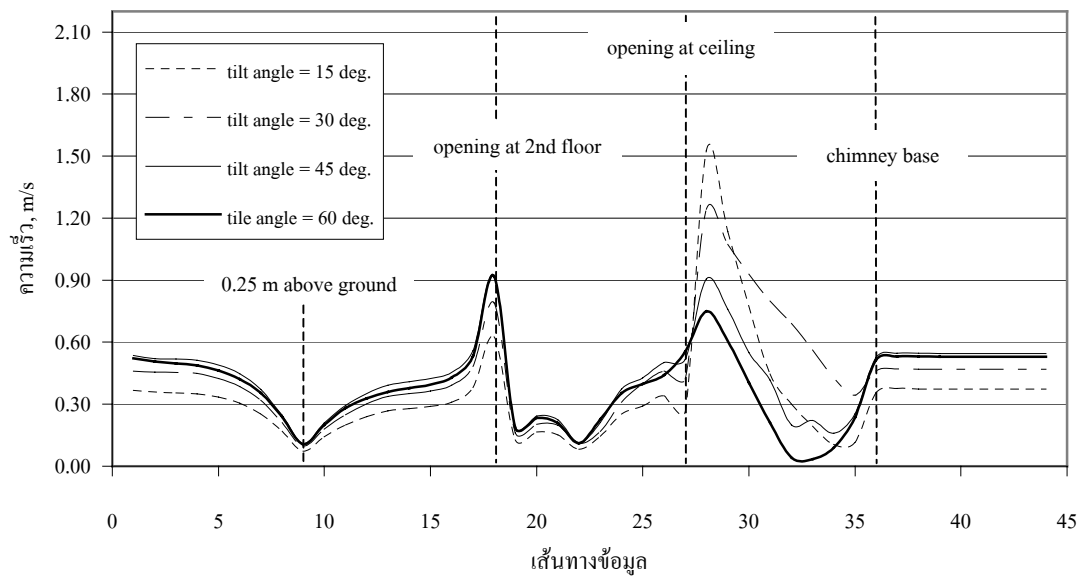
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



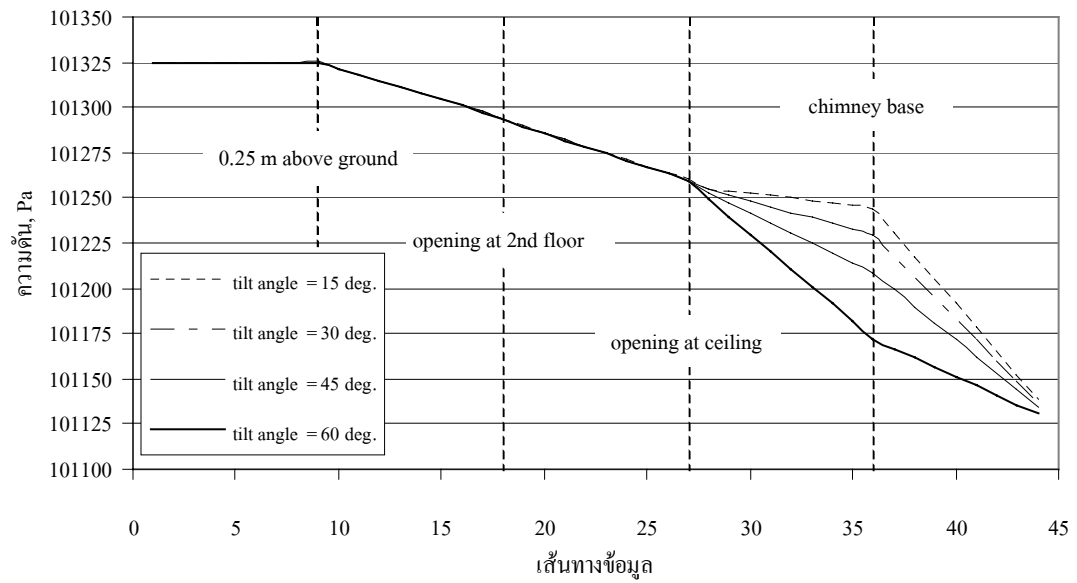
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



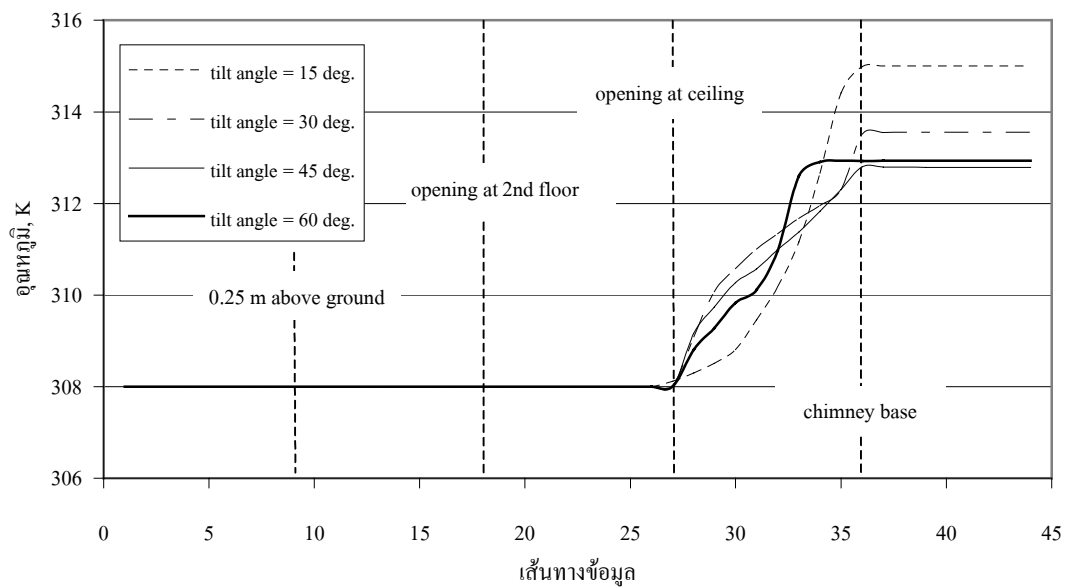
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



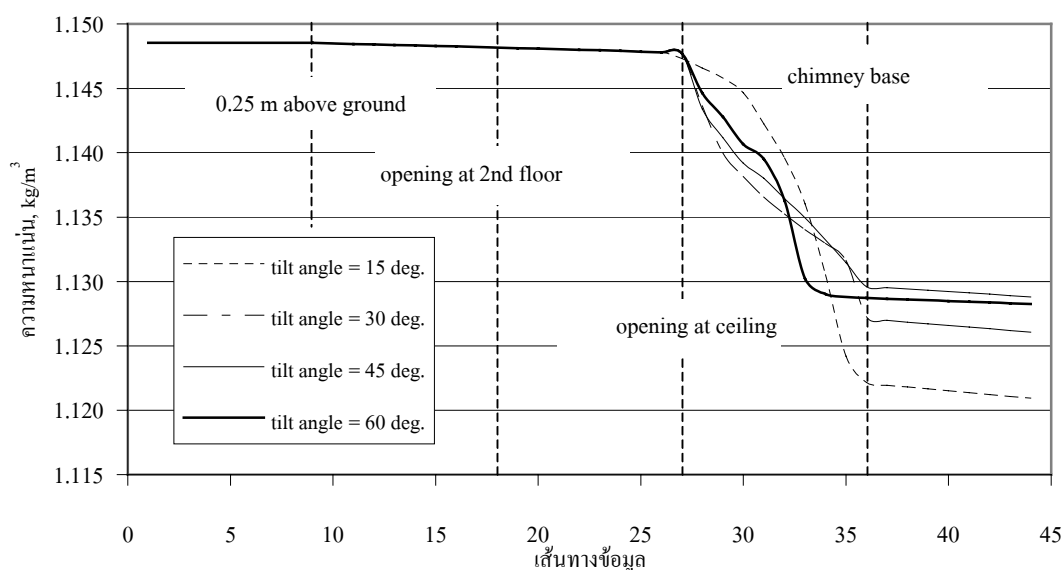
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



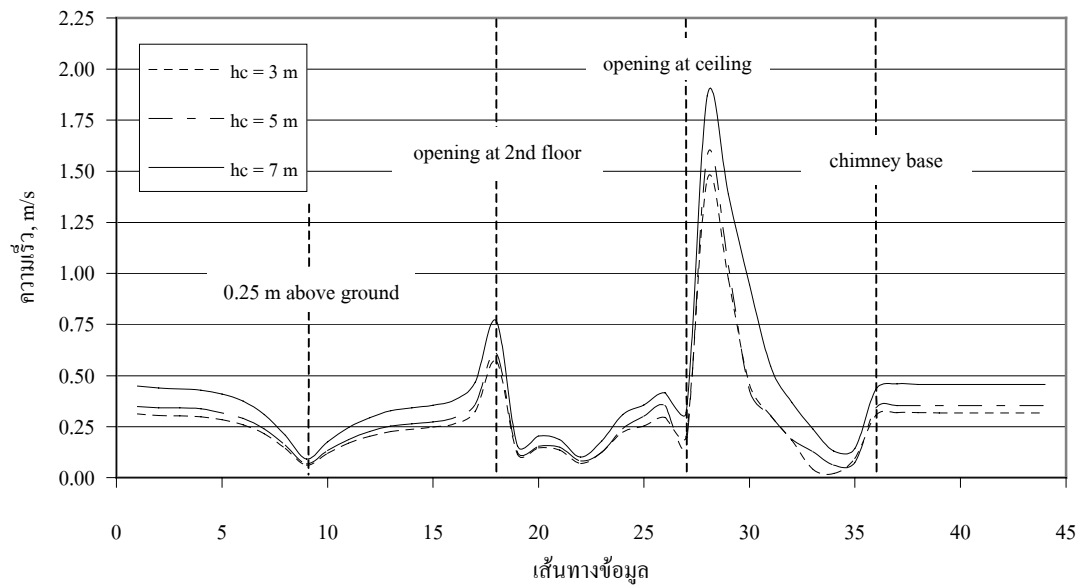
รูปที่ 4.28 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



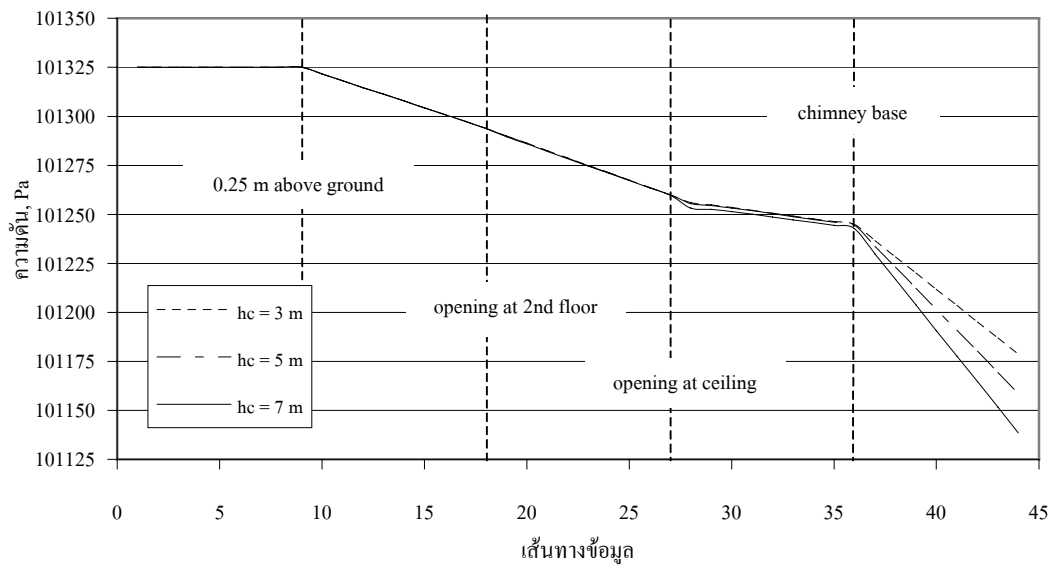
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m

กราฟที่ผ่านมาข้างต้นเป็นการแสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของหลังคาต่อค่าตัวแปรต่าง ๆ จากนั้นไปเป็นการพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อตัวแปรต่าง ๆ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของปล่อง โดยพิจารณาที่ค่ามุมเอียงของหลังคากรณีที่ค่าหนึ่ง รูปที่ 4.30–4.33 เป็นผลลัพธ์กรณีหลังคาเอียง 15° จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อให้ความสูงของปล่องเปลี่ยนแปลงไป เส้นกราฟจะแยกตัวออกจากกันชัดเจนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีให้มุมเอียงของหลังคาเปลี่ยนไป แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่าความสูงของปล่องส่งผลให้ความเร็วมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความดันมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหากพิจารณาจากทางเข้าจนถึงช่องเปิดที่เพดาน การเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นอย่างชัดเจนบริเวณภายในปล่อง โดยที่ค่าความสูงของปล่องมากจะเกิดการลดลงของความดันที่มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.31

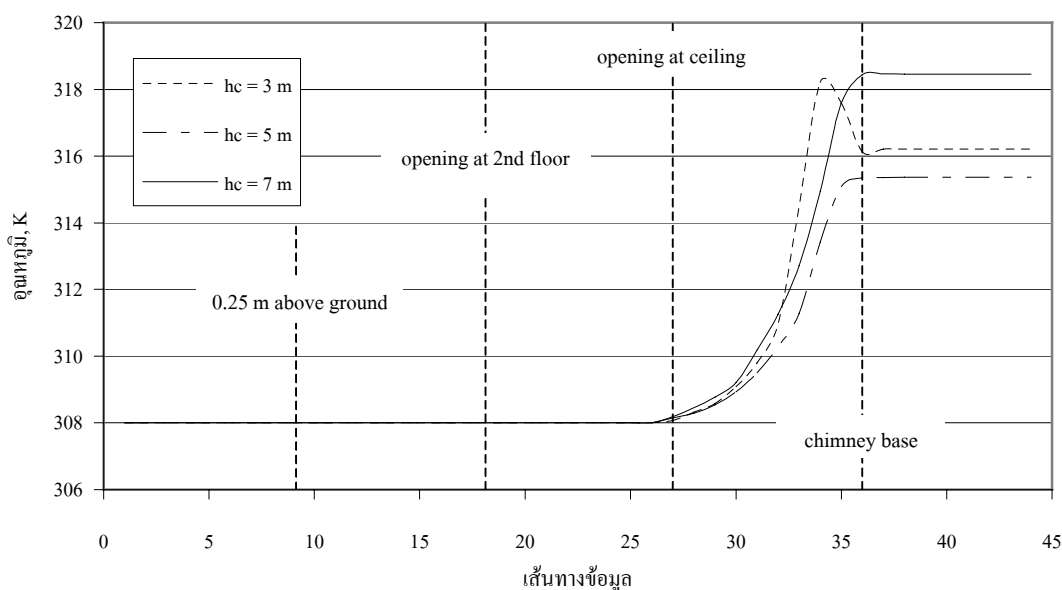
หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลเมื่อให้ความสูงของปล่องเป็นตัวแปรคง ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มแตกต่างกันเมื่อเข้าสู่ห้องหลังคาเป็นต้นไป และจากรูปพบว่า อุณหภูมิภายในปล่องมีค่าค่อนข้างคงที่ หากดูจากรูปจะพบว่า อุณหภูมิภายในปล่องที่สูง 5 m มีค่าต่ำกว่าที่ปล่องสูง 3 m แต่ที่ปล่องสูง 7 m อุณหภูมิจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิจেলাที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ในส่วนท้ายของผลลัพธ์ในส่วนนี้



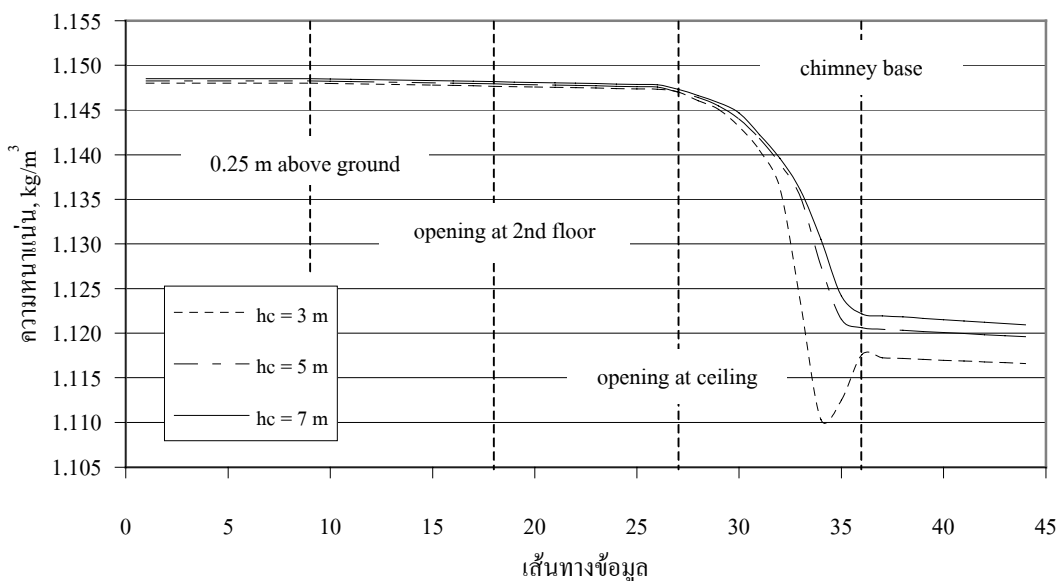
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



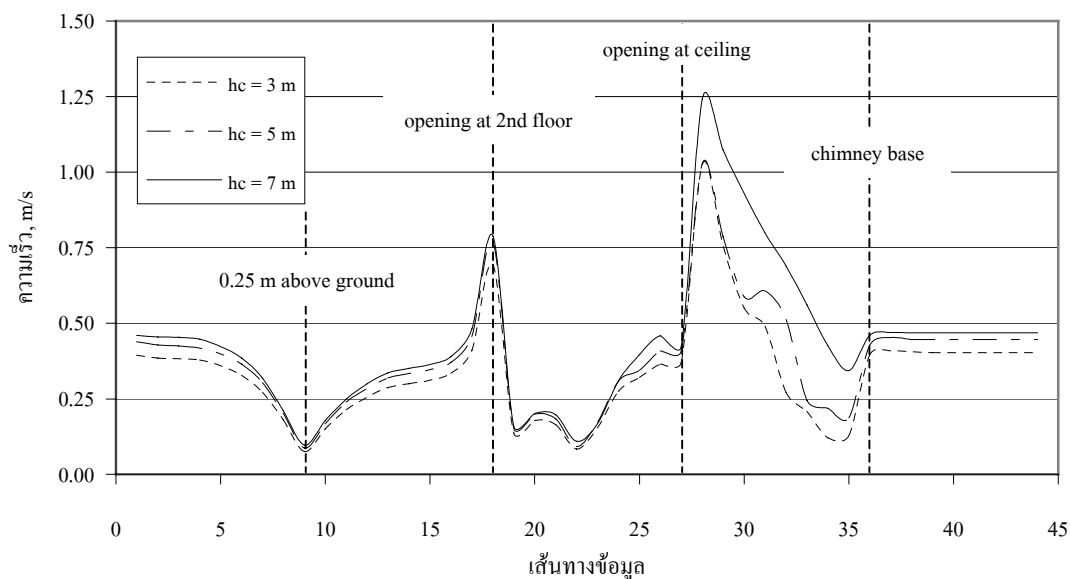
รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



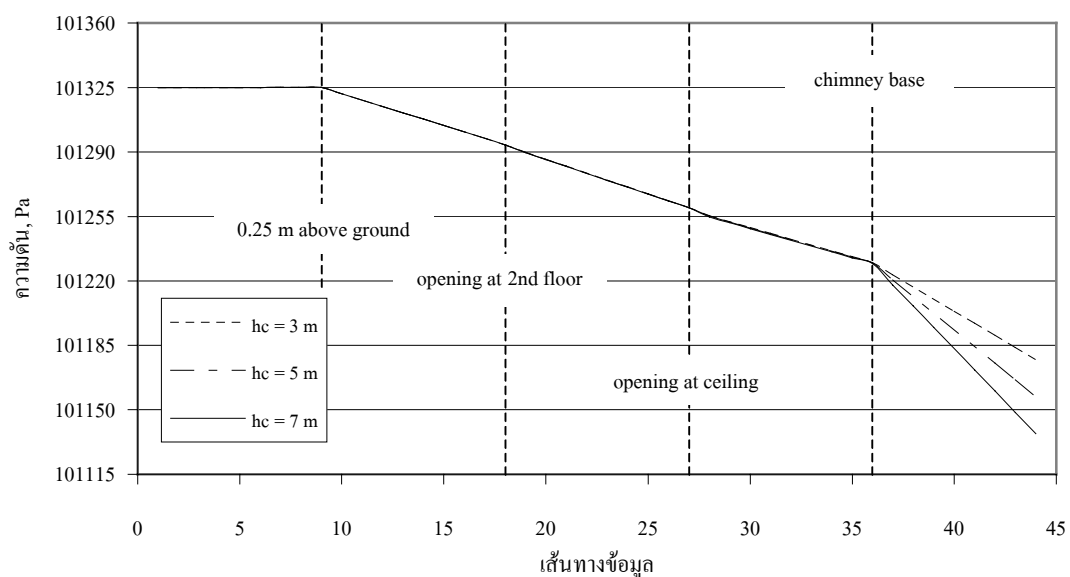
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°

พิจารณารูปที่ 4.34 เมื่อให้มุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้นจาก 15° เป็น 30° พบว่าความเร็วที่ทางเข้าของอาคารมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15° และจากรูปจะเห็นว่าหากความสูงของปล่องมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วของการไหลมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

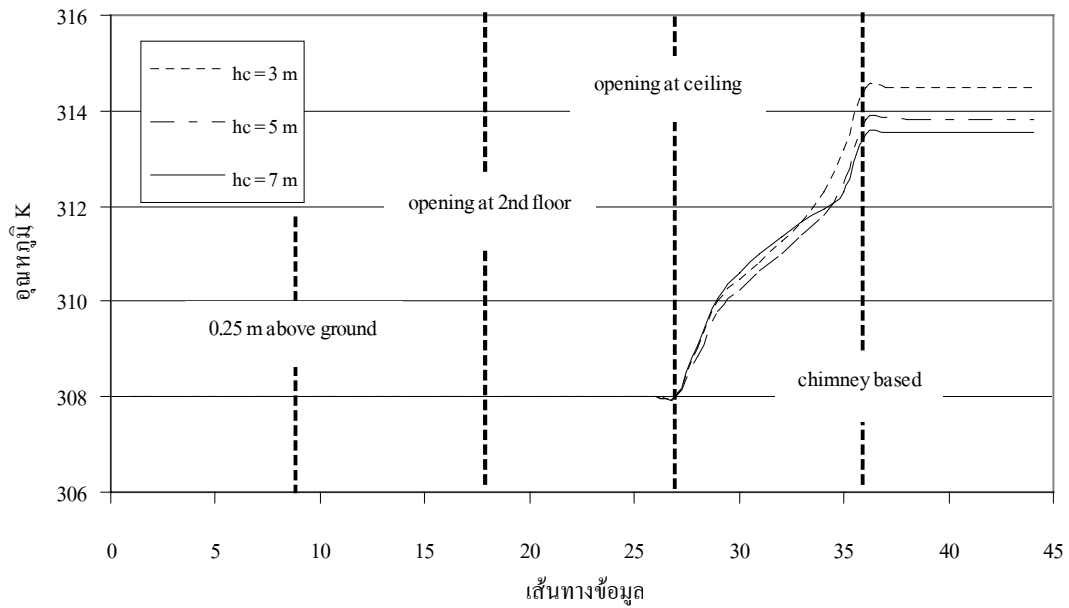
การเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในอาคารกรณีหลังคาเอียง 30° ดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับกรณีหลังคาเอียง 15° ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเส้นทางการไหลที่แสดงในรูปที่ 4.36 จะเห็นว่า เมื่อความสูงของปล่องมากขึ้น อุณหภูมิที่ได้มีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2



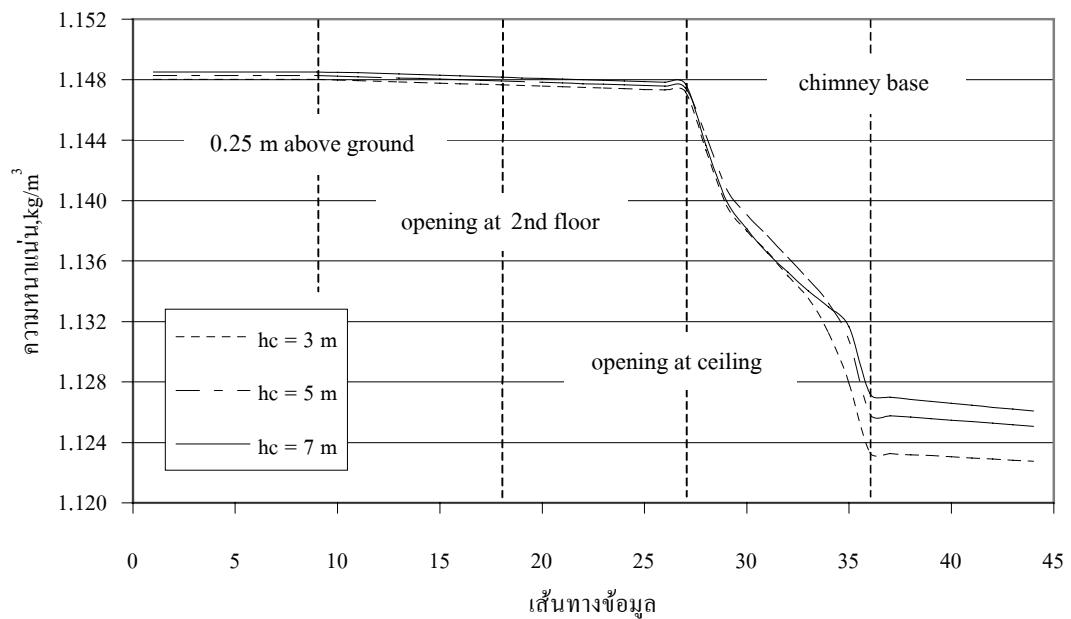
รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



รูปที่ 4.36 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°

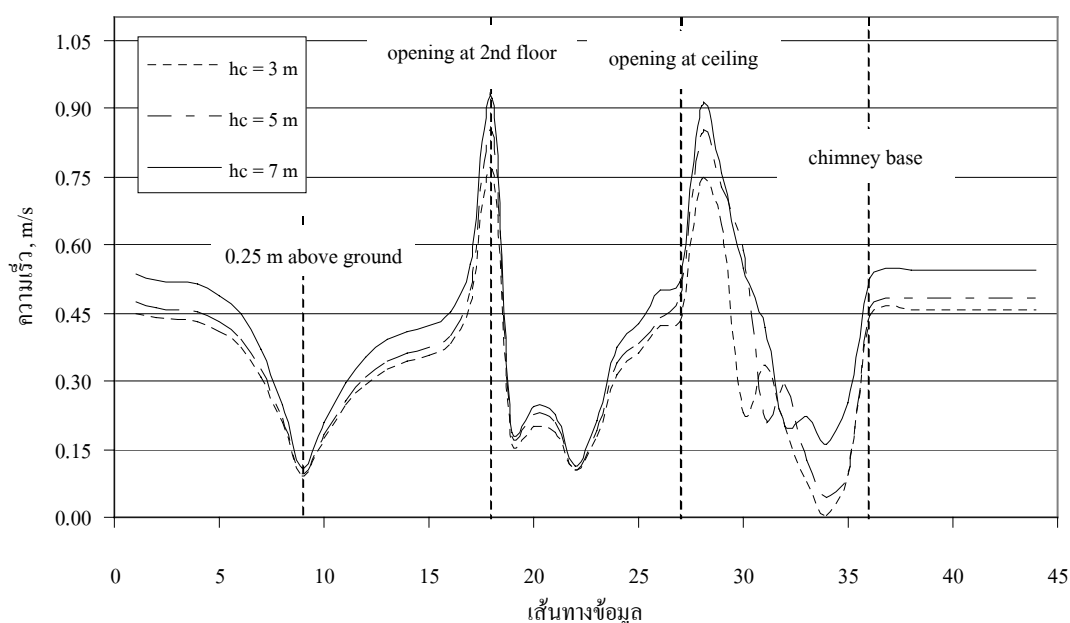


รูปที่ 4.37 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°

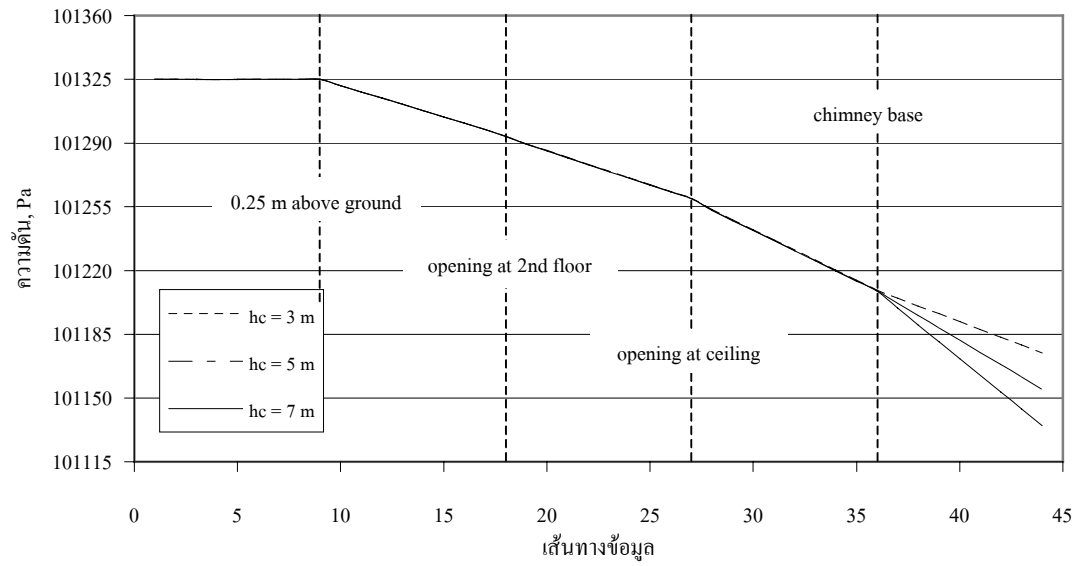
รูปที่ 4.38 – 4.41 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น ตามเส้นทางข้อมูลเมื่อเพิ่มขนาดมุมเอียงของหลังคาเป็น 45° ซึ่งจากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่า เมื่อมุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วที่ทางเข้าของอาคารมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีการ

ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งตรงกลางอาคาร (ตำแหน่ง 0.25 m above ground ในรูป) พิจารณาความดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเส้นทางข้อมูลสำหรับที่ค่ามุมเอียงเป็น 45° ดังแสดงในรูปที่ 4.39 จะเห็นว่า ความดันที่ตำแหน่งฐานปล่องมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ค่ามุมเอียงเป็น 30° (ซึ่งมีค่าประมาณ 101,225 Pa) เพราะเมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้น ตำแหน่งของฐานปล่องจะสูงขึ้น ทำให้ความดันที่ฐานปล่องน้อยกว่า ส่วนรูปที่ 4.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูล แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปแล้วเหมือนกับผลลัพธ์จากการจำลองที่ค่ามุมเอียงเป็น 30° โดยจะเห็นว่า อุณหภูมิภายในปล่องมีค่าลดลงเมื่อความสูงของปล่องมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความสูงของปล่องทำให้ความเร็วของอากาศภายในปล่องสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อให้สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อความร้อนที่ได้รับจากแสงแดดมีค่าเท่ากัน ดังนั้น อุณหภูมิเฉลี่ยภายในปล่องจึงมีค่าลดลง

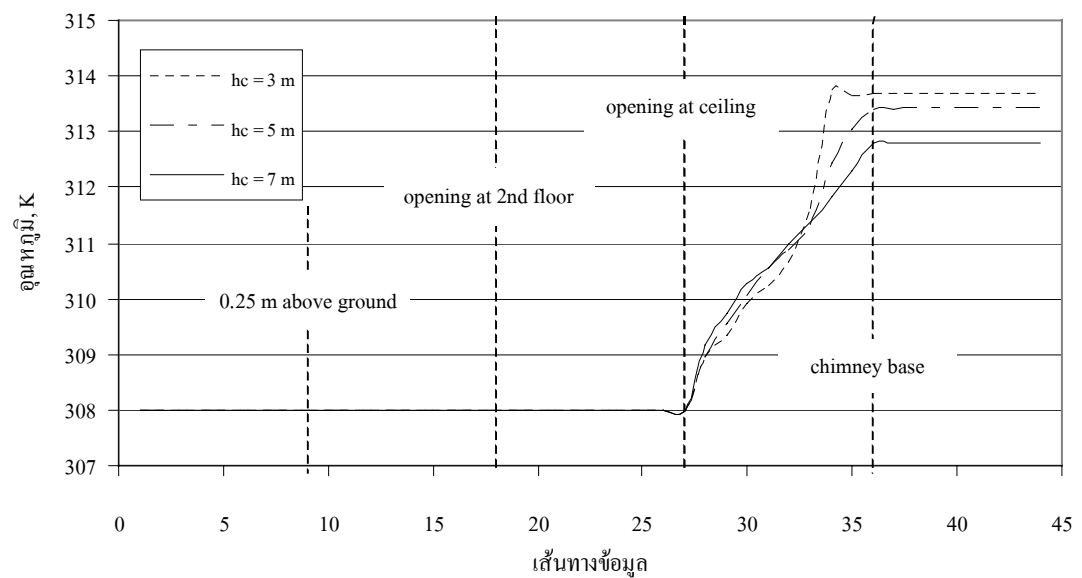
ผลลัพธ์จากการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของปล่องกรณีมุมเอียงของหลังคาเป็น 60° แสดงในรูปที่ 4.42 – 4.45 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยรวมแล้วเหมือนกับกรณีที่ผ่านมา



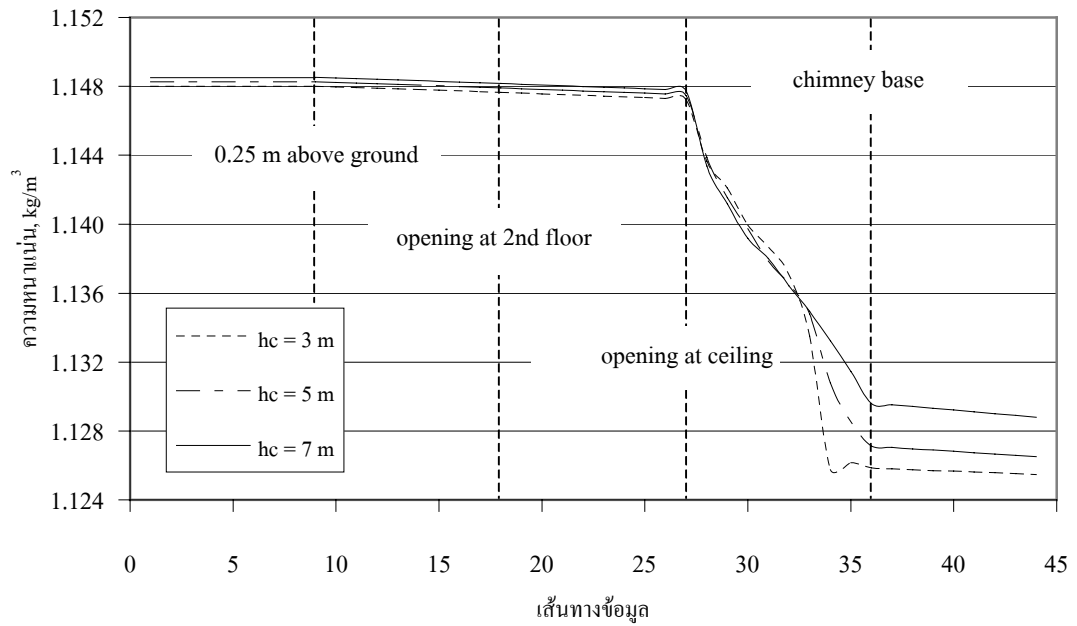
รูปที่ 4.38 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



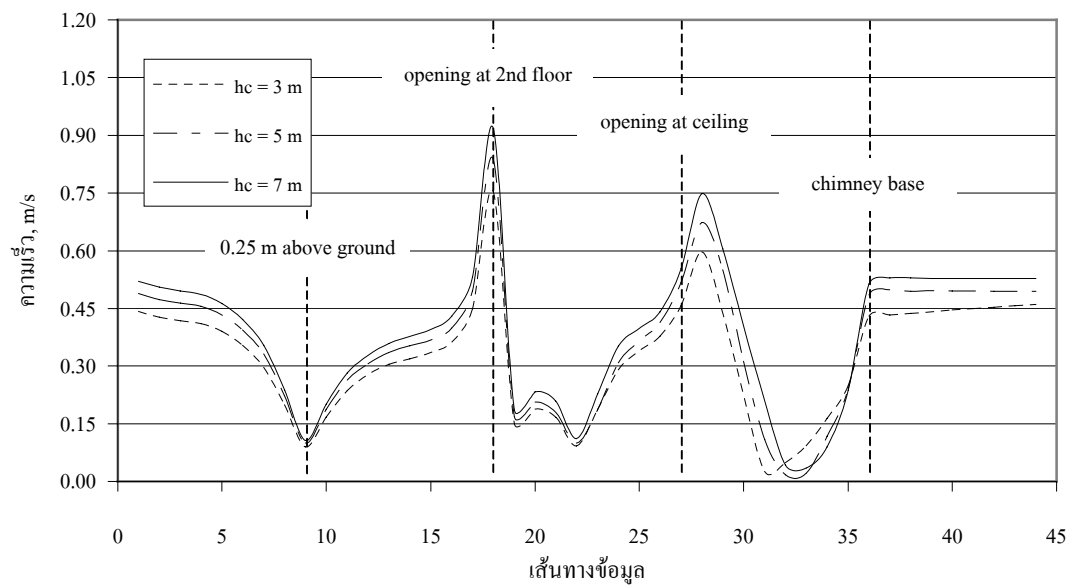
รูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



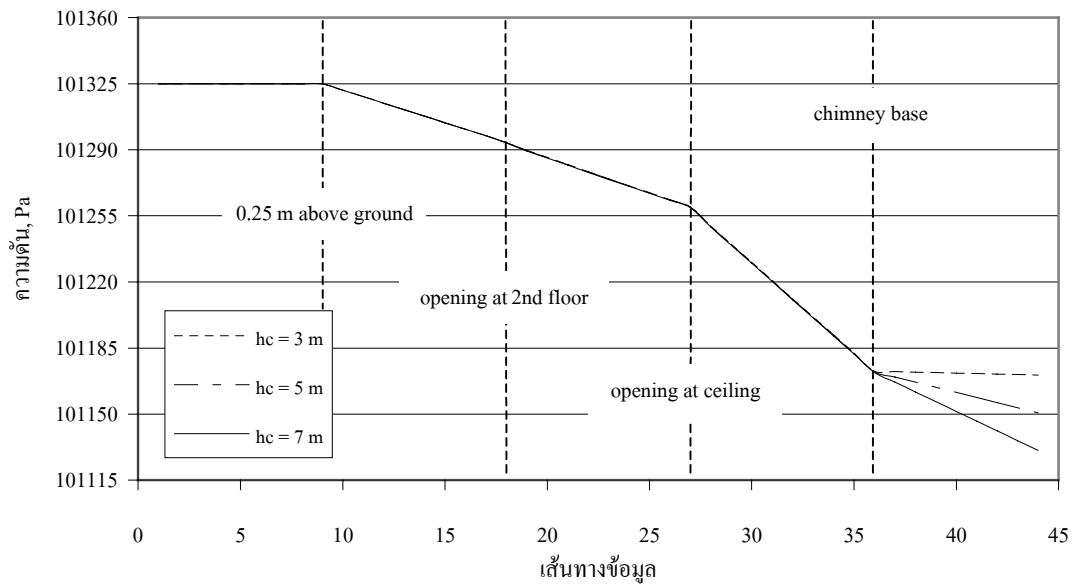
รูปที่ 4.40 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



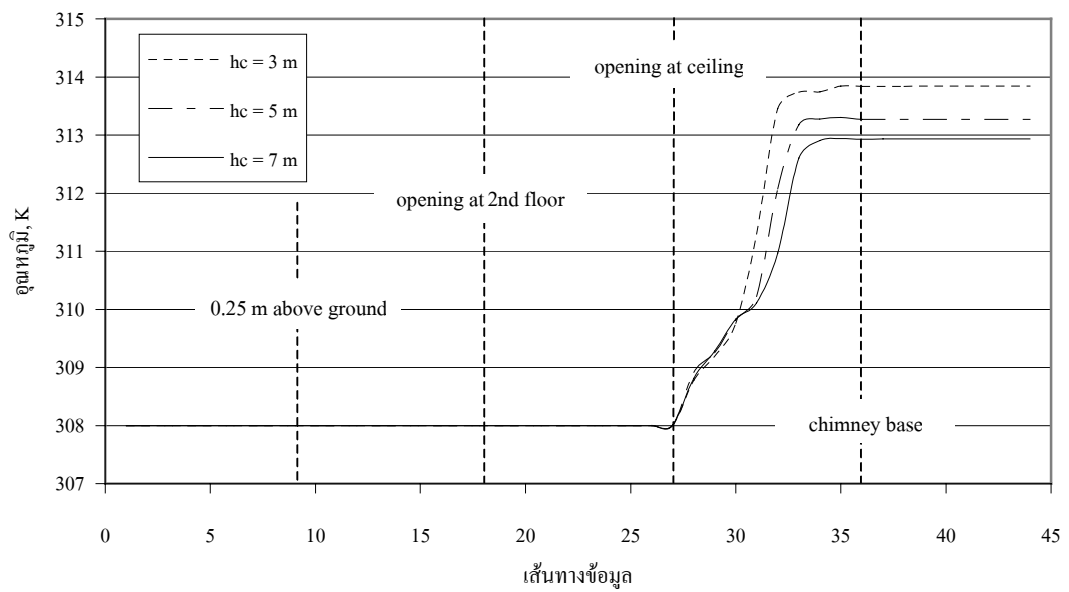
รูปที่ 4.41 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



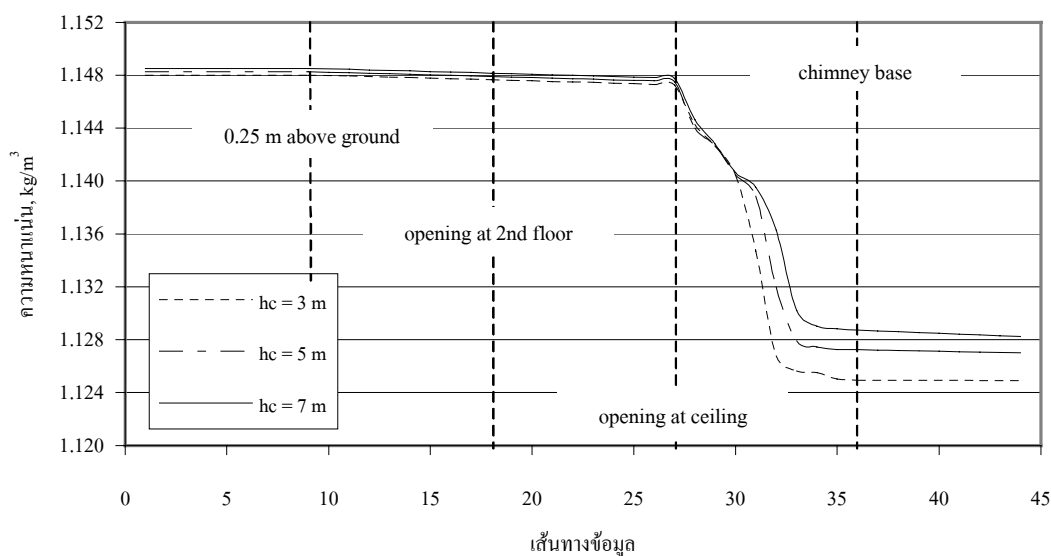
รูปที่ 4.42 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°

ที่ผ่านมาเป็นการแสดงผลพีธด้วยการพล็อตค่าตัวแปรตามเส้นทางข้อมูล เพื่อให้เห็นภาพรวมของการไหล แต่อาจไม่ใช่ค่าเฉลี่ยของตัวแปร ณ หน้าตัดนั้น ๆ จึงนำค่าเฉลี่ยของตัวแปรในการไหลมาแสดงในคูเป็นตัวเลข เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ ค่าเฉลี่ยของความเร็วและอุณหภูมิภายในปล่องของแต่ละกรณี ได้รวบรวมมาแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 1 – 12

กรณีที่	h_c (m)	θ ($^\circ$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
1	3	15	45.4526	0.3172	316.3
2	3	30	57.6745	0.4029	314.5
3	3	45	62.7826	0.4384	313.9
4	3	60	63.8513	0.4444	313.8
5	5	15	50.6483	0.3526	315.4
6	5	30	63.9844	0.4468	313.8
7	5	45	68.8457	0.4806	313.4
8	5	60	70.8038	0.4945	313.3

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

กรณีที่	h_c (m)	θ (°)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
9	7	15	65.3783	0.4564	318.5
10	7	30	67.1153	0.4688	313.6
11	7	45	74.8328	0.5224	313.0
12	7	60	75.6611	0.5282	312.9

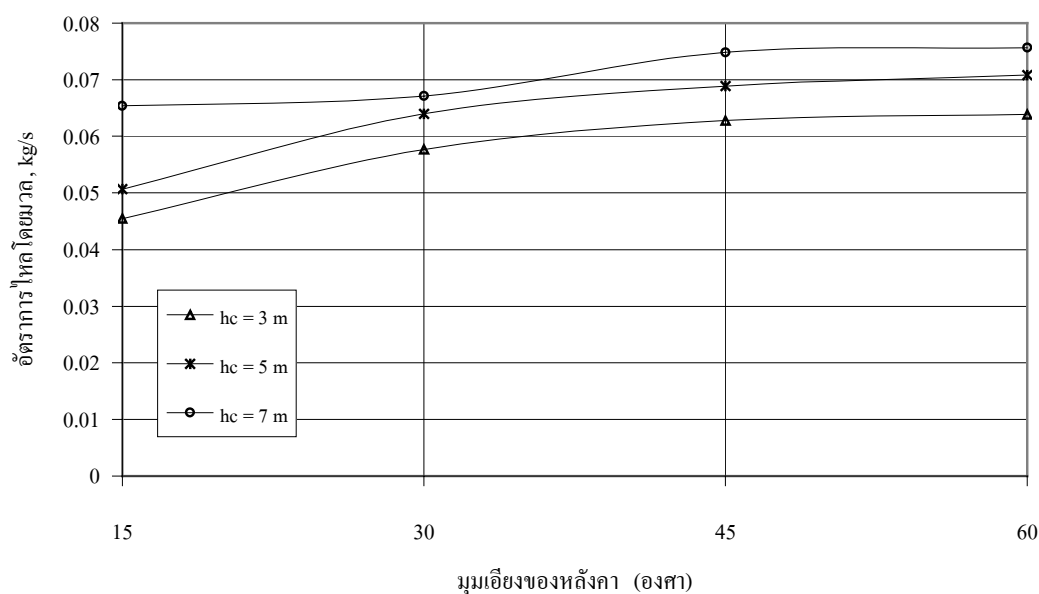
จากตารางสรุปข้อมูลที่ได้จากการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ทั้งการเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคา และการเพิ่มความสูงของปล่อง ต่างส่งผลให้ได้อัตราการไหลโดยมวลที่ไหลผ่านอาคารมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความเร็วภายในปล่อง (\bar{V}_c) ก็ จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน นั่นคือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในปล่องมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคา และ/หรือ ความสูงของปล่อง หากพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในปล่อง พบว่า เมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าลดลงเสมอ ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานดังได้อธิบายไปแล้ว

หากลองคำนวณร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับค่าอัตราการไหลโดยมวลกรณีหลังคาเอียง 15° แล้ว พบว่า การเพิ่มความมุมเอียงของหลังคาด้วยสัดส่วนมากกว่า 2 เท่า ของมุม 15° แล้ว ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นกว่า 25% และหากคำนวณเปรียบเทียบกับกรณีปล่องสูง 3 m เพื่อดูว่าการเพิ่มความสูงของปล่องสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งพบว่า การเพิ่มความสูงของปล่องไปประมาณ 1.7 เท่าของความสูง 3 m ทำให้อัตราการไหลโดยมวลเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ดังรายละเอียดต่อไปนี้

พิจารณาที่ค่าความสูงของปล่อง 3 m เมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่าของกรณีแรก (เท่ากับ 30°) พบว่าสามารถทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิม 26.9% หากเพิ่มมุมเอียงของหลังคาเป็น 3 เท่า (เท่ากับ 45°) และ 4 เท่า (เท่ากับ 60°) แล้วจะได้ว่า สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 38.1% และ 40.5% ตามลำดับ ซึ่งหากพิจารณาที่ค่าความสูงของปล่องเป็น 5 m ก็พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาก่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ เพิ่มขึ้นเป็น 26.3%, 35.9% และ 39.8% เมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่า, 3 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความสูงปล่องเป็น 7 m โดยหากเพิ่มมุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่าของมุม 15° (คิดเป็นมุม 30°) พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้น 25.9% เมื่อเทียบกับอัตราการไหลเดิมที่ได้จากที่ค่ามุม 15° และเมื่อเพิ่มให้มุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และ 3 เท่า ของมุม 15° พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 40.3% และ 41.9% ตามลำดับ

หากพิจารณาที่มุมเอียงของหลังคาคงที่ค่าหนึ่ง แล้วให้ความสูงของปล่องเพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มความสูงของปล่องสามารถทำให้อัตราการไหลที่ได้รับมีค่ามากขึ้น เช่น เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 5 m (เพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่า) ที่ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 15° พบว่าอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น 11.4% และเมื่อพิจารณาที่ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 30° , 45° และ 60° เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 5 m พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 10.9%, 9.7% และ 10.9% ตามลำดับ หากเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 7 m (เพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 เท่า) พบว่าสามารถเพิ่มค่าอัตราการไหลได้เป็น 17.3%, 16.4%, 19.2% และ 18.5% เมื่อพิจารณาที่ค่ามุมเอียงของหลังคา 15° , 30° , 45° และ 60° ตามลำดับ

รูปที่ 4.46 เป็นการแสดงค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศของทั้ง 12 กรณี ที่ค่าความเข้มของแสงแดดเท่ากับ 300 W/m^2 โดยกำหนดให้ความสูงของปล่องเป็นตัวแปรรองเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องที่มีต่อค่าอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.46 อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่มุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องต่าง ๆ

4.2.2 ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 550 W/m^2

ทำการเพิ่มค่าความเข้มของแสงแดดจาก 300 W/m^2 เป็น 550 W/m^2 จากนั้นจำลองการไหลของอากาศผ่านอาคารอีก 12 กรณี (ซึ่งตรงกับกรณีที่ 13 – 24 ในตารางที่ 4.1) โดยใช้ค่า

ปัจจัยของอาคารเท่ากับกรณีการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2 ที่ค่าความเข้มของแสงแดด 550 W/m^2 นี้ ค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของหลังคาที่แต่ละมุมเอียงของหลังคา คือ

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 15^\circ = 829.3249 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 30^\circ = 384.9115 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 45^\circ = 222.2222 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 60^\circ = 128.3005 \text{ W/m}^3$$

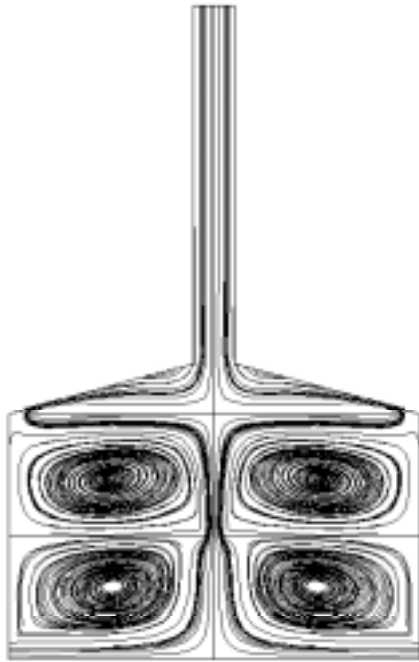
โดยยังคงกำหนดให้พื้นที่รับแสงแดดของหลังคาเท่ากับพื้นที่ของเพดาน ซึ่งเสมือนว่าหลังคาวางตัวในแนวระนาบเช่นเดิม

การจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 550 W/m^2 นี้ ได้นำผลลัพธ์กรณีปล่องสูง 5 m มาแสดงเป็นตัวอย่าง (กรณีที่ 17 – 20 ในตารางที่ 4.1) โดยแสดงผลในรูปของเส้นการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และคอนทัวร์ของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.47 – 4.58

รูปที่ 4.47–4.54 แสดงเส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วของผลการจำลองที่ค่ามุมเอียงของหลังคา $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ตามลำดับจากรูปจะเห็นว่า ลักษณะของเส้นการไหลและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วคล้ายคลึงกับผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2 (รูปที่ 4.6 – 4.13) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าเกิดการหมุนของอากาศที่ห้องพักทั้งสองชั้นไม่ว่ามุมเอียงของหลังคาจะเป็นค่าเท่าใดก็ตาม นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ค่ามุมเอียงของหลังคา 30° เป็นต้นไป พบว่าเกิดการหมุนวนของอากาศขึ้นภายในห้องหลังคา และเกิดการตกลงของเส้นการไหลภายในห้องหลังคา ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกันกับผลลัพธ์ในกรณีค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2 ซึ่งข้อสันนิษฐานของสาเหตุที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1

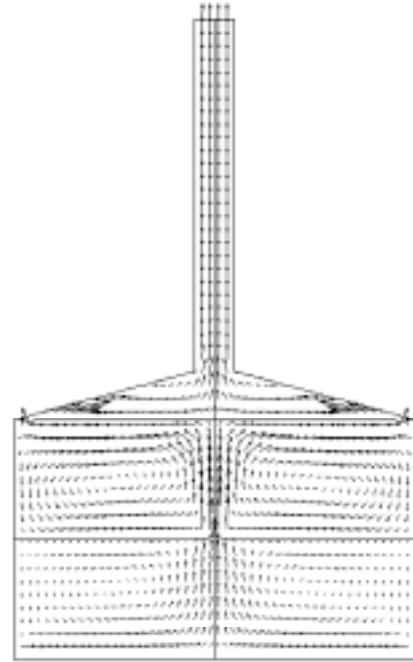
รูปที่ 4.45 – 4.58 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในอาคารด้วยคอนทัวร์ของอุณหภูมิที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิกคล้ายกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดดที่ 300 W/m^2 โดยอุณหภูมิภายในห้องพักมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ด้านนอกของอาคาร นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อให้ค่าความเข้มของแสงแดดมากขึ้น อุณหภูมิที่ได้รับจากการจำลองก็มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นจากค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งอยู่ส่วนท้ายของการแสดงผลในส่วนนี้

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



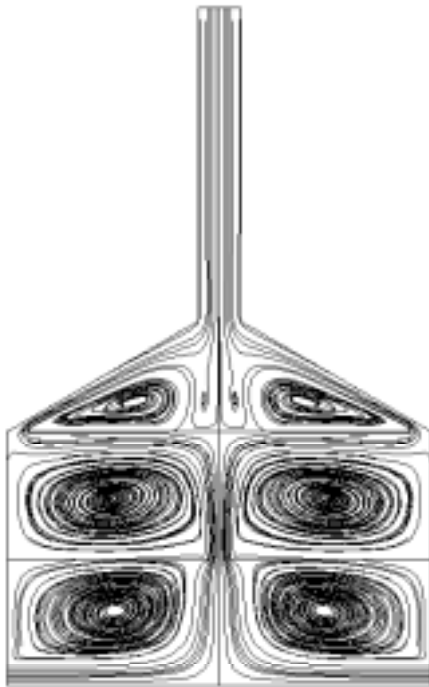
รูปที่ 4.47 เส้นการไหลกรณีที่ 17

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



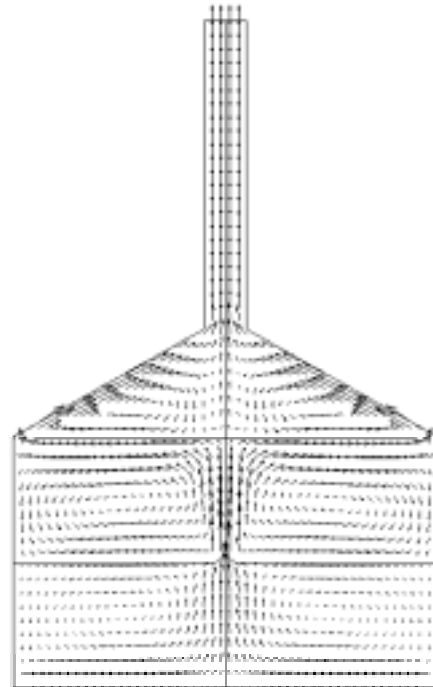
รูปที่ 4.48 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 17

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



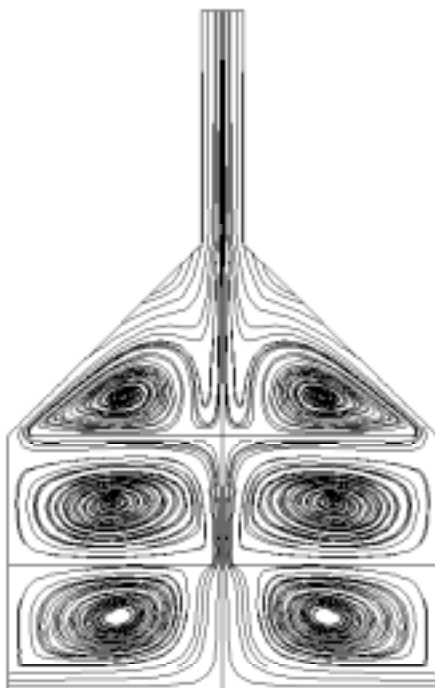
รูปที่ 4.49 เส้นการไหลกรณีที่ 18

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



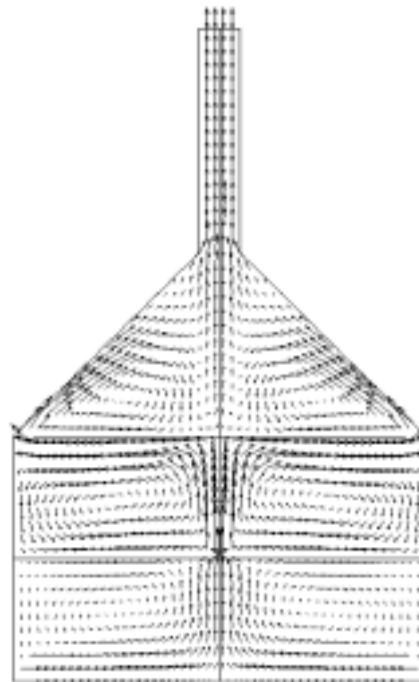
รูปที่ 4.50 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 18

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



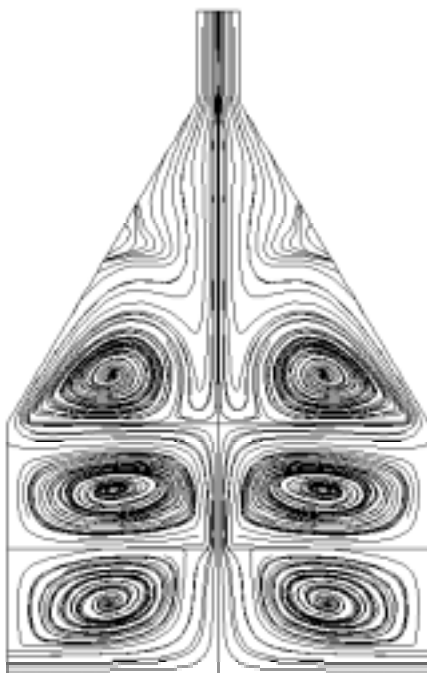
รูปที่ 4.51 เส้นการไหลกรณีที่ 19

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



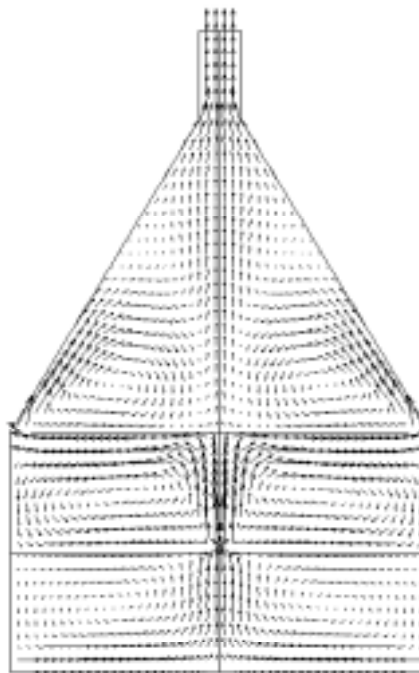
รูปที่ 4.52 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 19

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$



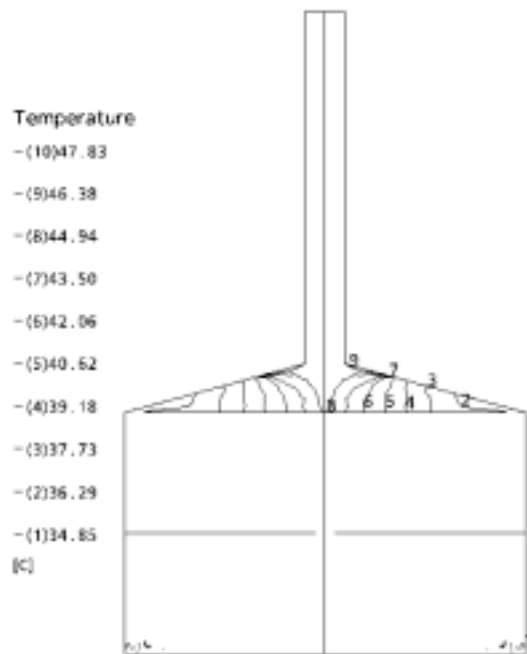
รูปที่ 4.53 เส้นการไหลกรณีที่ 20

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$



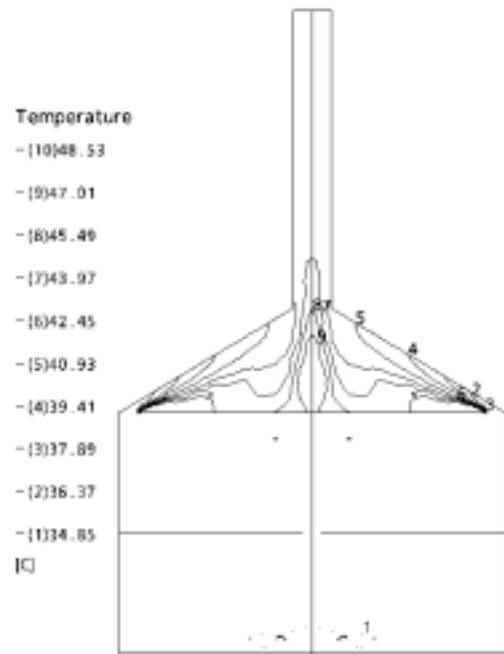
รูปที่ 4.54 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 20

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_t = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



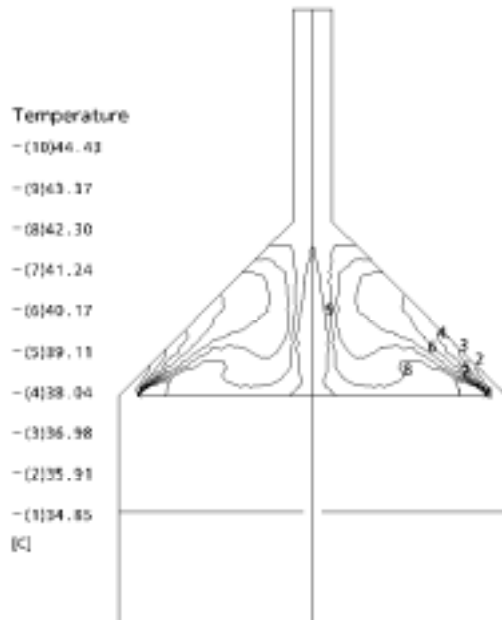
รูปที่ 4.55 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 17

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_t = 5 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



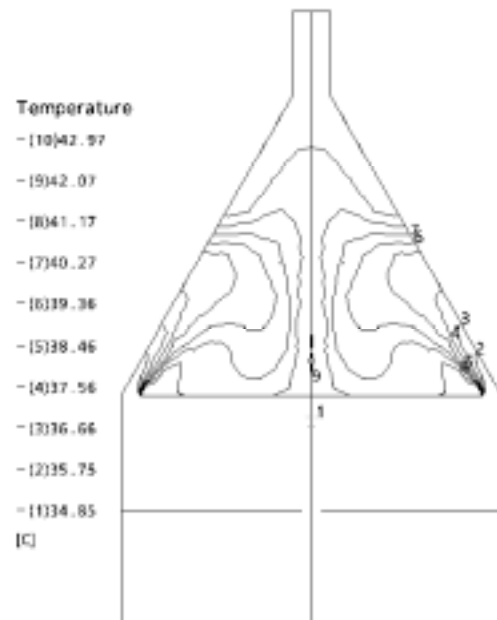
รูปที่ 4.56 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 18

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_t = 5 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



รูปที่ 4.57 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 19

$$Q = 550 \text{ W/m}^2, h_t = 5 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$

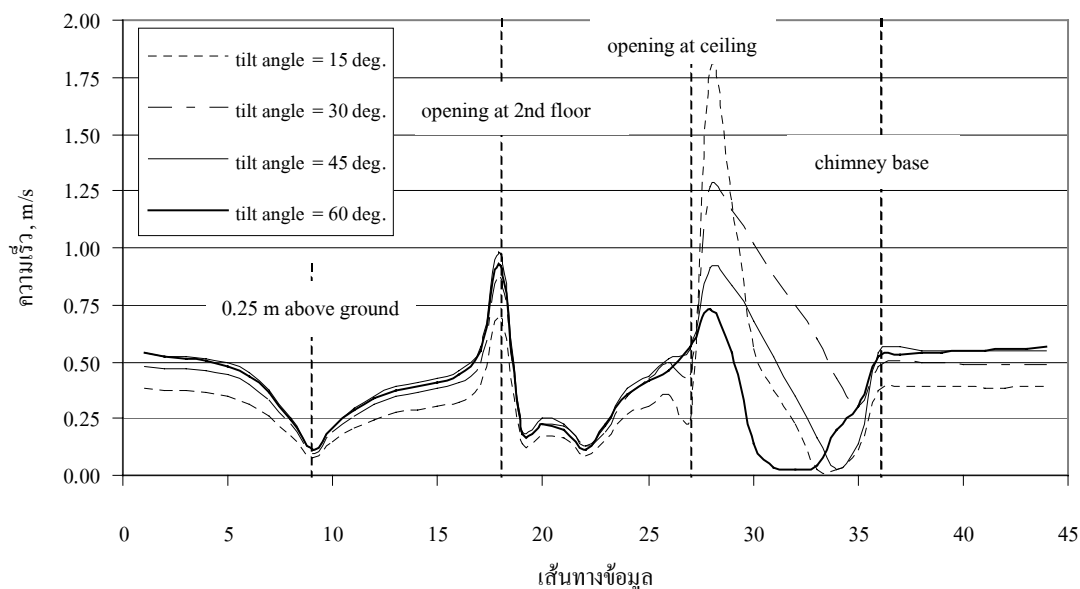


รูปที่ 4.58 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 20

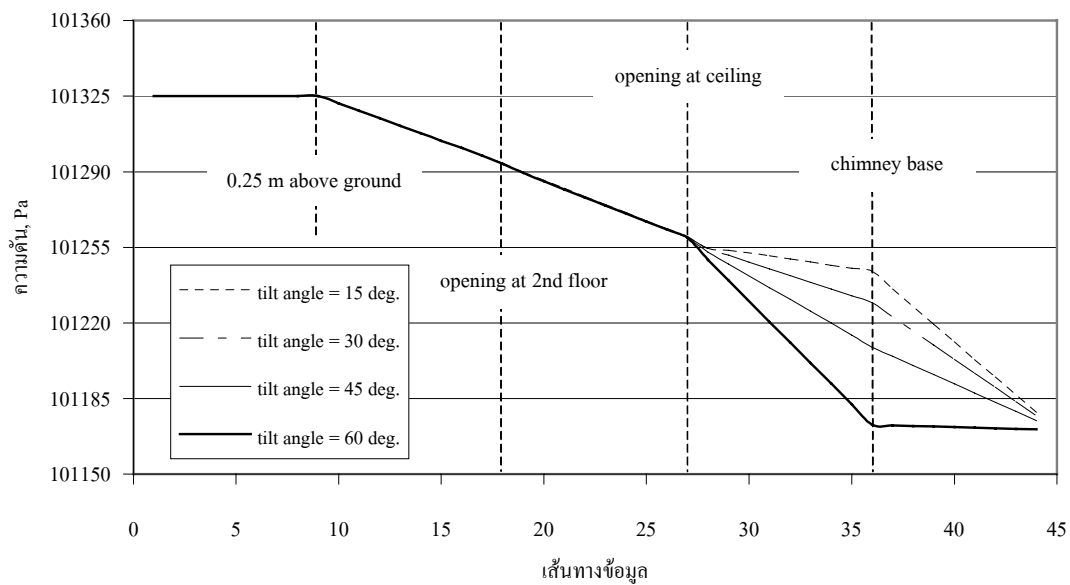
ทำการพล็อตค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น เพื่อดูภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าวตามเส้นทางข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงโดยรวมแล้วมีลักษณะเช่นเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2 นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มค่าความเข้มของแสงแดดส่งผลให้ความเร็วที่ทางเข้าของอาคารมากขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.59

จากรูปที่ 4.60 จะเห็นว่า แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความดันเหมือนกับกรณีความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2 โดย เมื่อให้มุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้น ค่าความดันตั้งแต่ทางเข้าจนถึงช่องเปิดที่เพดานมีความแตกต่างกันน้อยมาก เห็นได้จากเส้นกราฟที่เกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน และแตกต่างกันอย่างชัดเจนบริเวณห้องหลังคาและภายในปล่อง ส่วนรูปที่ 4.61 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางการไหล ซึ่งจะเห็นว่า กรณีความเข้มของแสงแดดเท่ากับ 550 W/m^2 นี้ ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศภายในปล่องมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ค่าความสูงของปล่องหรือมุมเอียงของหลังคาเท่ากัน ดังจะเห็นได้ชัดเจนจากค่าเฉลี่ยเป็นตัวเลขที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

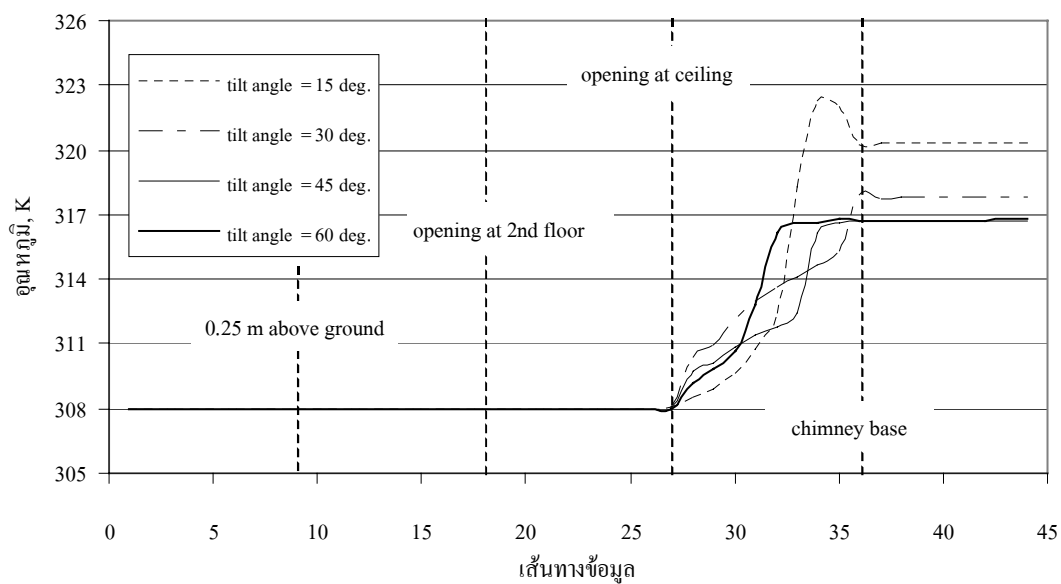
รูปที่ 4.61 และ 4.62 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความหนาแน่นตามเส้นทางการไหลภายในอาคาร ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟเป็นเสมือนกระจกเงาสะท้อนซึ่งกันและกัน



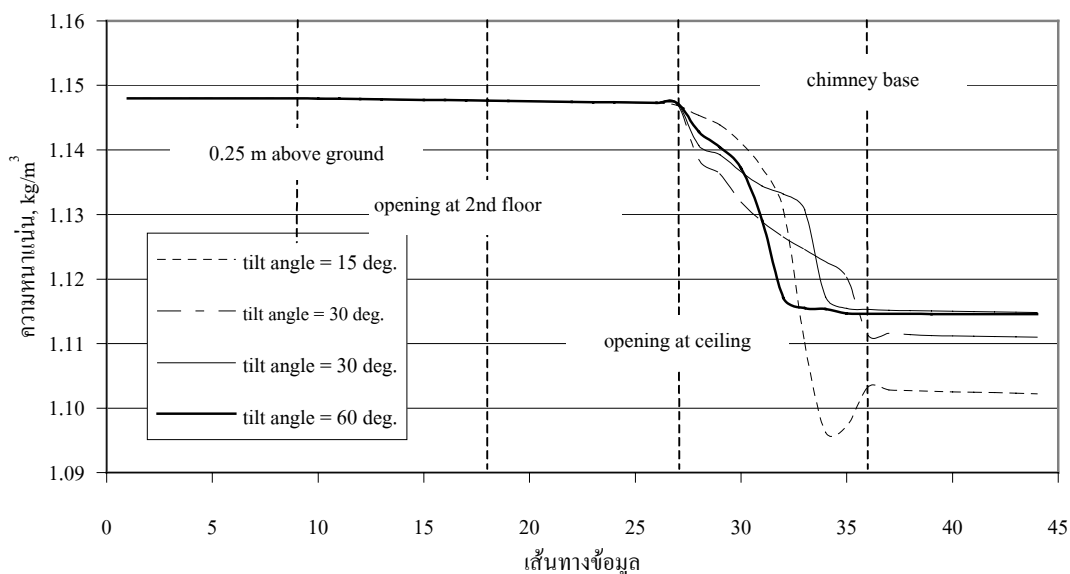
รูปที่ 4.59 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



รูปที่ 4.60 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

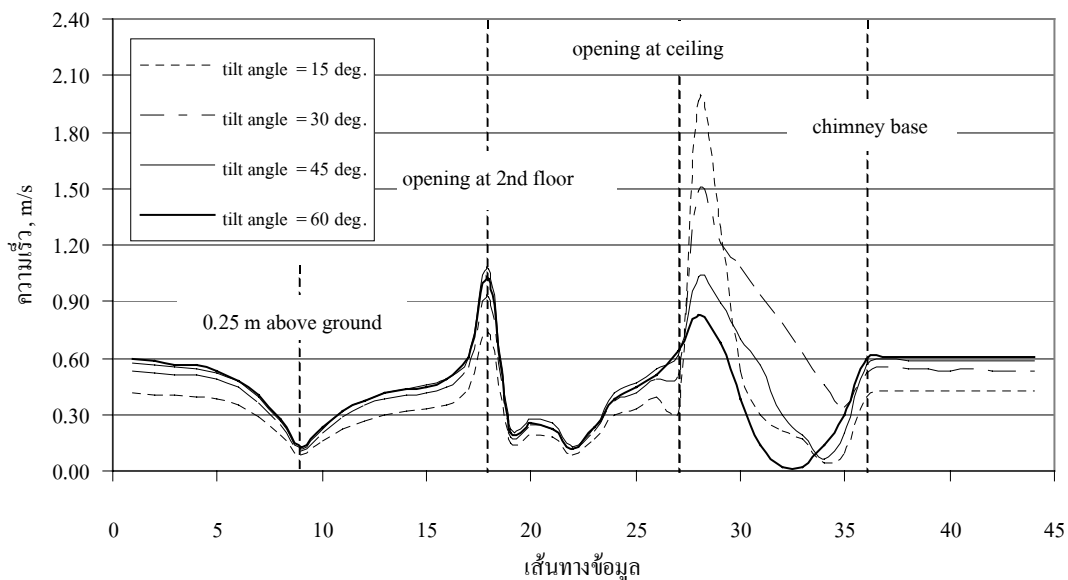


รูปที่ 4.61 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

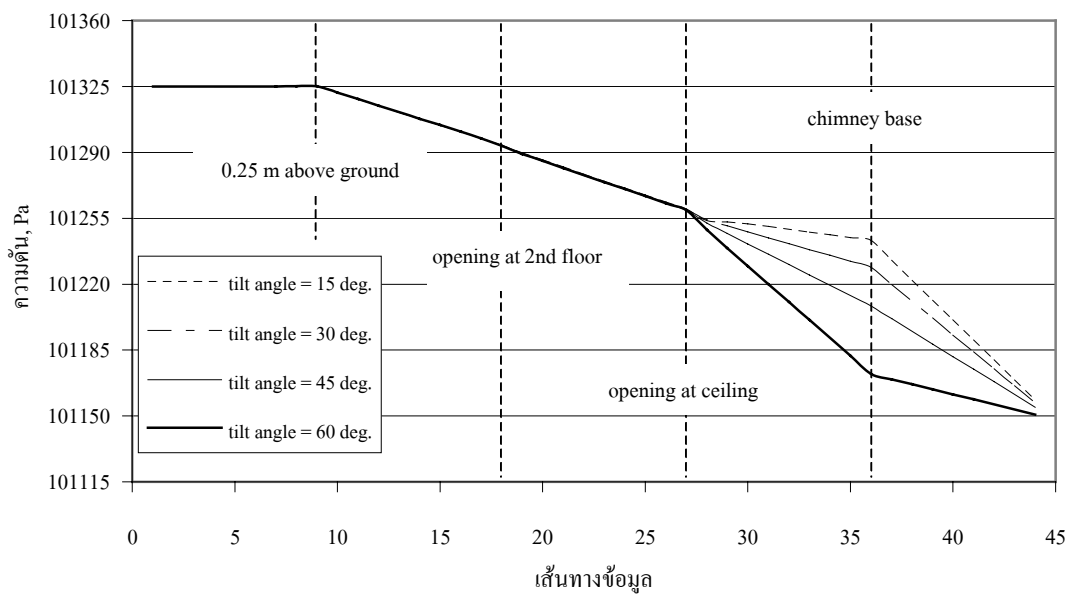


รูปที่ 4.62 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m

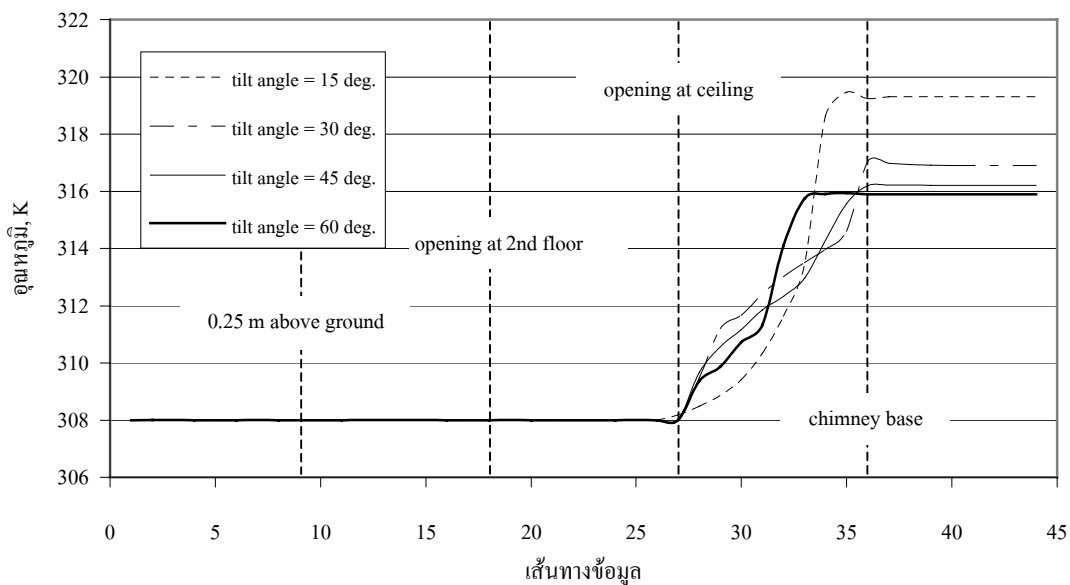
เมื่อพิจารณาที่ค่าความสูง 5 m และ 7 m ก็พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะและแนวโน้มของข้อมูลคล้ายคลึงกัน ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าที่ระดับความสูงปล่องและมุมของหลังคาครั้งที่ การเพิ่มค่าความเข้มของแสงแดด ส่งผลให้ความเร็วของการไหลและอุณหภูมิของอากาศภายในปล่องมากขึ้น ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศด้านนอกกับอากาศร้อนที่อยู่ภายในห้องหลังคาหรือปล่องจึงสูงขึ้น ทำให้ขนาดความแตกต่างของความหนาแน่นมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลต่างของความหนาแน่นนี้เองที่เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการไหลของอากาศภายในอาคาร ดังนั้น หากผลต่างความหนาแน่นสูงขึ้นย่อมหมายถึงแรงขับเคลื่อนในการไหลสูงขึ้น จึงทำให้ความเร็วของการไหลมากขึ้น เป็นเหตุผลที่ทำให้อัตราการไหลโดยมวลของอากาศเพิ่มขึ้นดังกล่าว



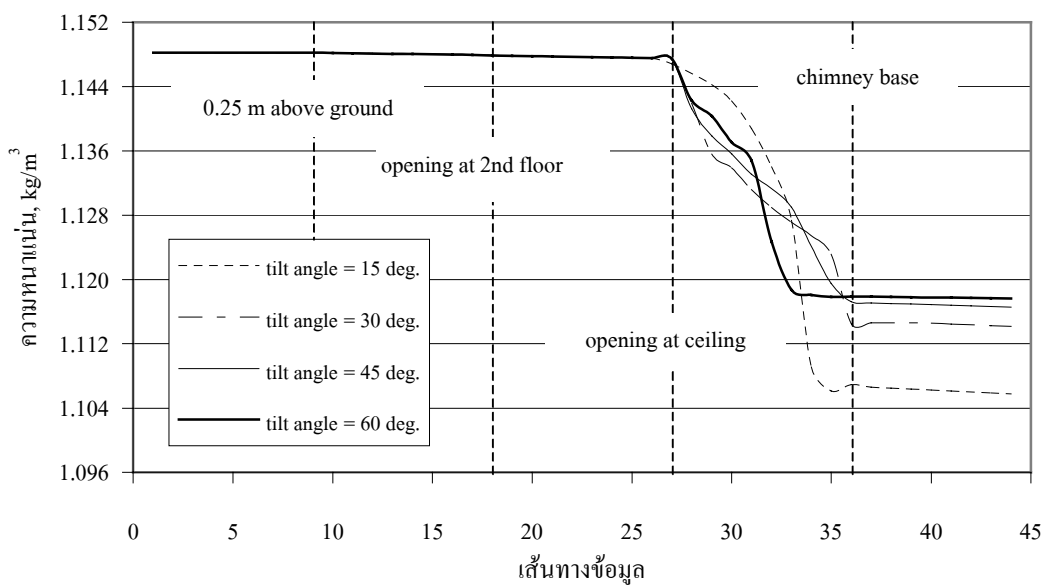
รูปที่ 4.63 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



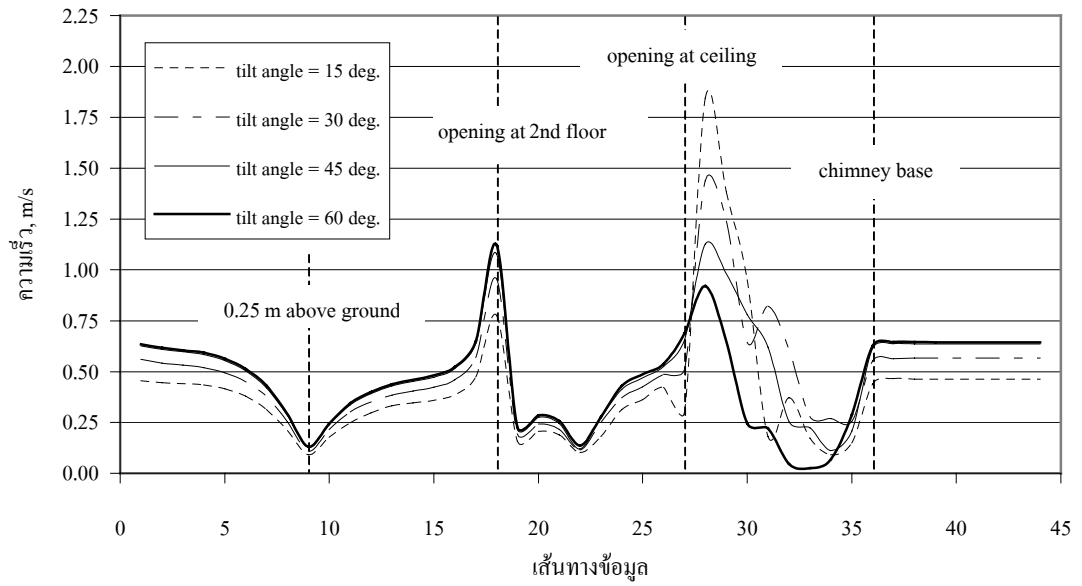
รูปที่ 4.64 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



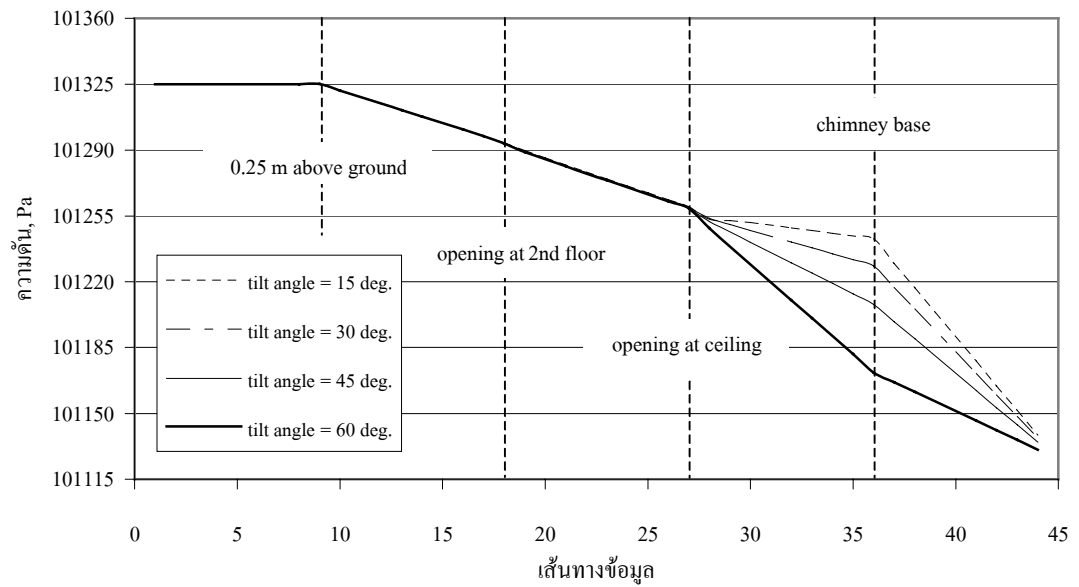
รูปที่ 4.65 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



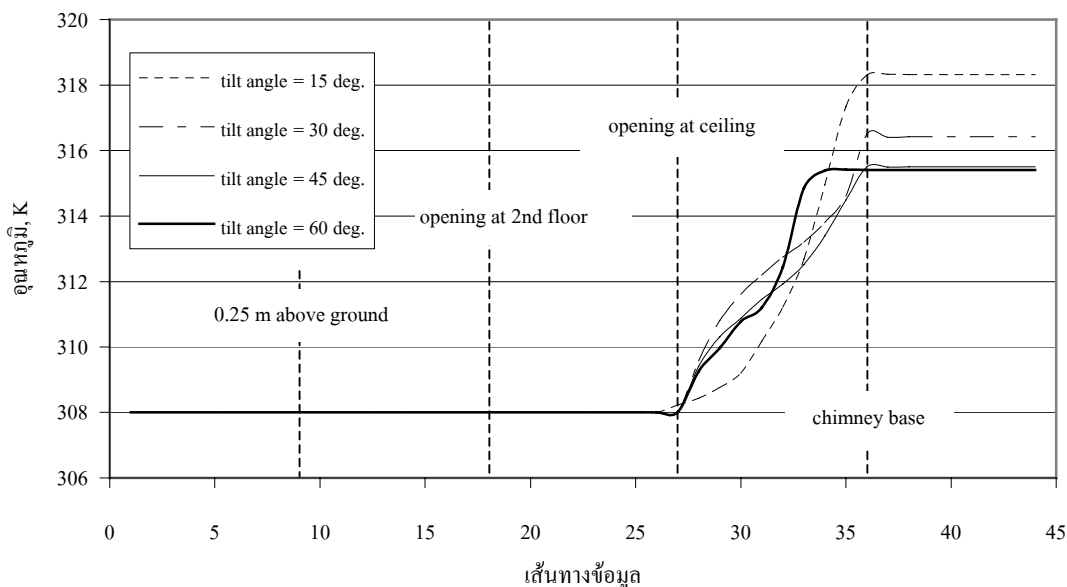
รูปที่ 4.66 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



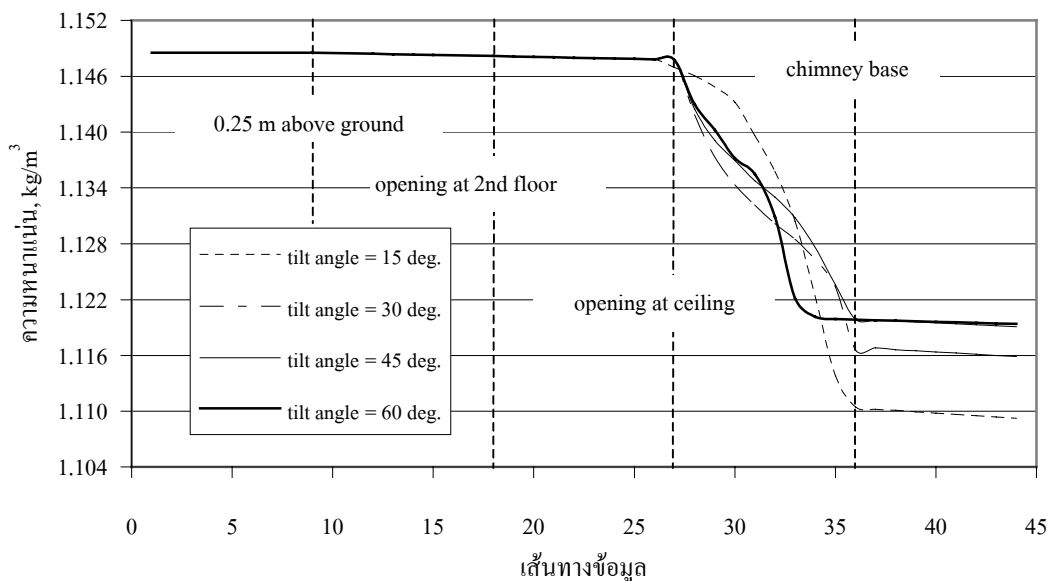
รูปที่ 4.67 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



รูปที่ 4.68 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่ความสูงของปล่อง 7 m



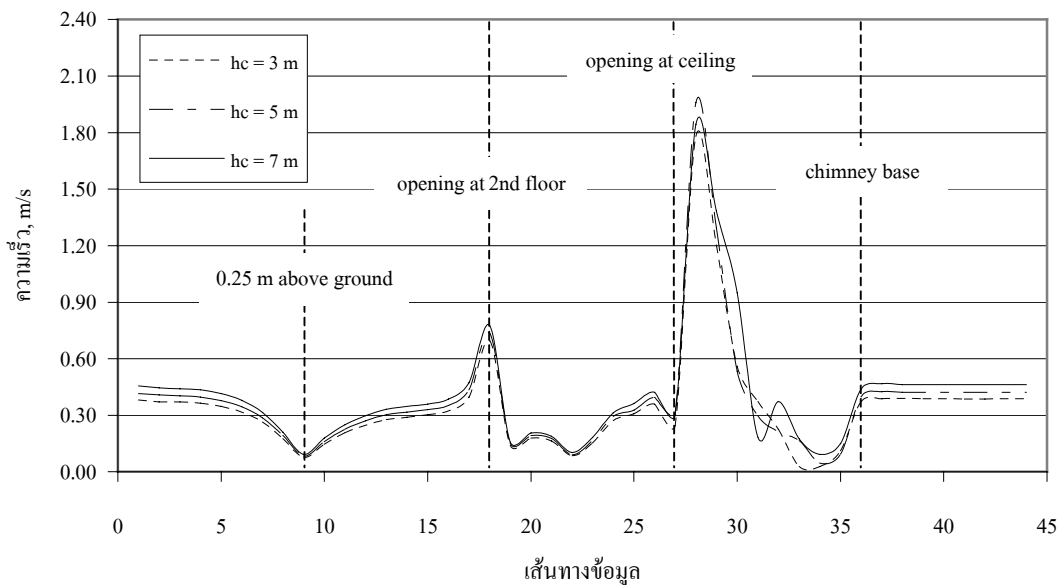
รูปที่ 4.69 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่สูงของปล่อง 7 m



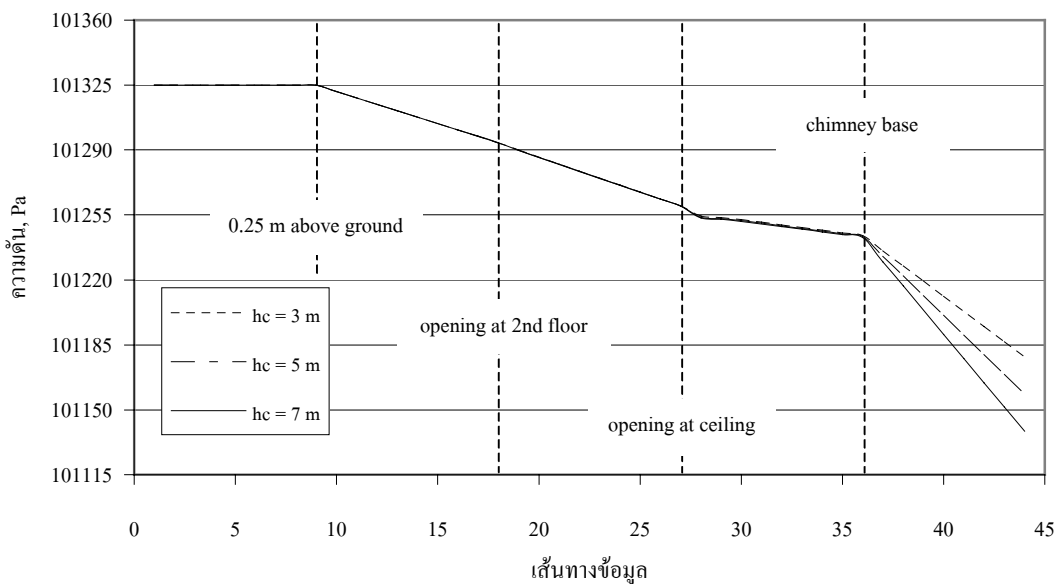
รูปที่ 4.70 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีสองปล่องสูง 7 m

การเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นตามเส้นทางกรไฮลกรณีสองปล่องสูงของแสงแดดเป็น 550 W/m^2 เมื่อให้มุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 15° และให้ความสูงของหลังคาเปลี่ยนไป ถูกแสดงไว้ใน รูปที่ 4.71 – 4.74 ส่วนรูปที่ 4.75 – 4.86 เป็นผลลัพธ์ที่

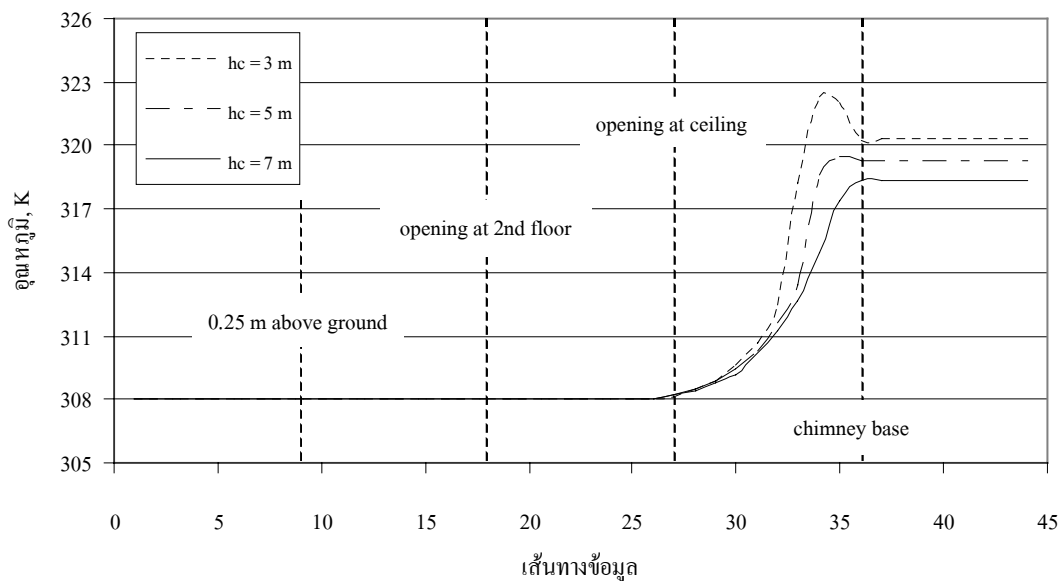
ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 30° , 45° และ 60° โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเมื่อให้หลังคามีมุมเอียงเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีที่ความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2



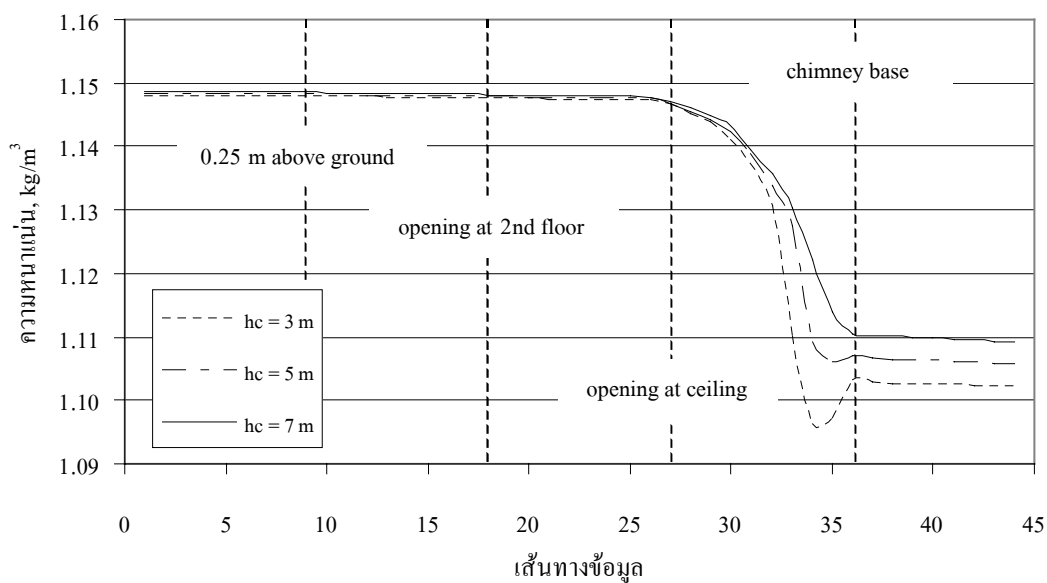
รูปที่ 4.71 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15°



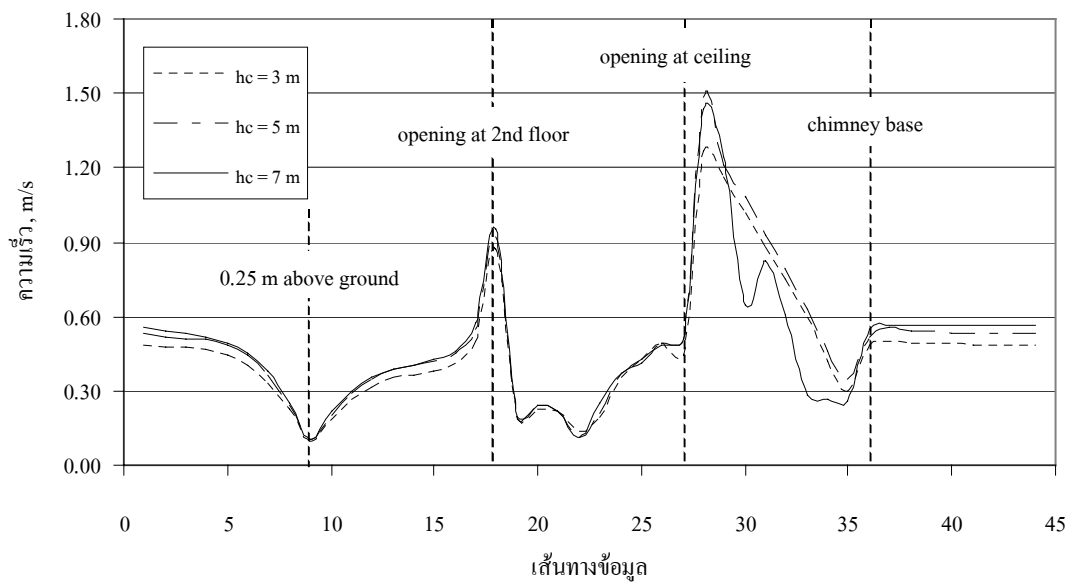
รูปที่ 4.72 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15°



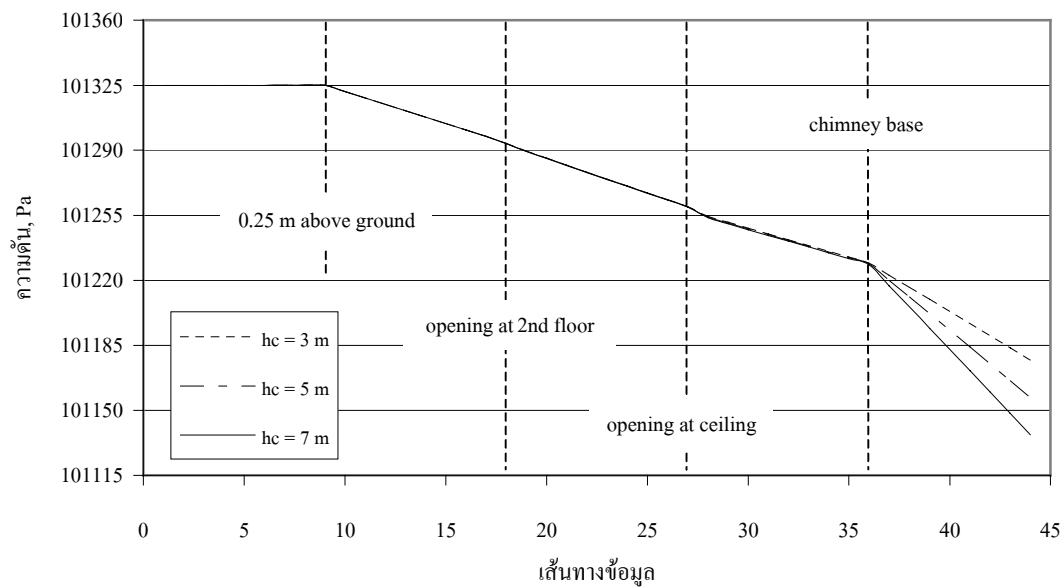
รูปที่ 4.73 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15°



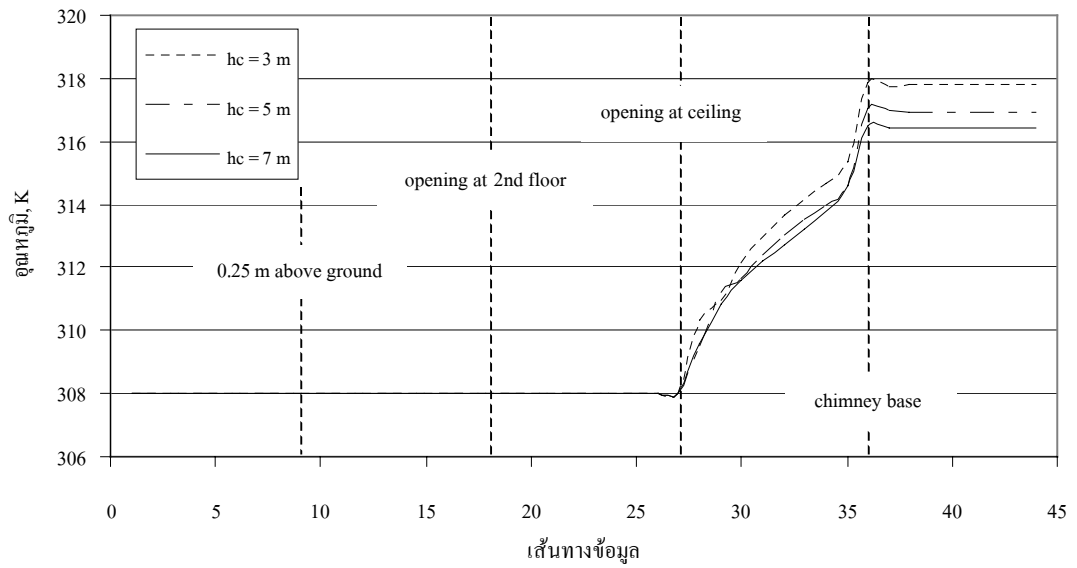
รูปที่ 4.74 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 15°



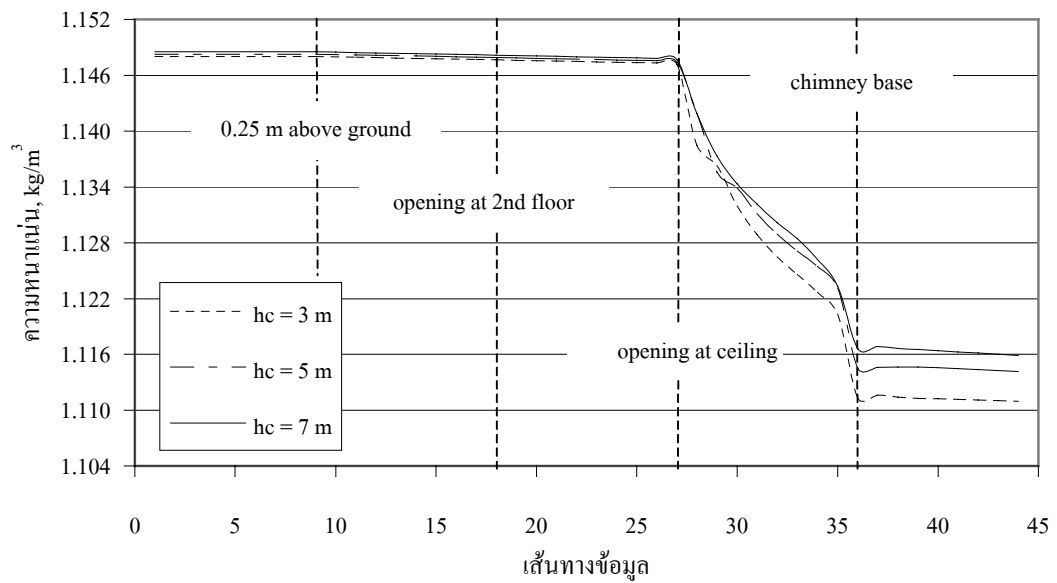
รูปที่ 4.75 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°



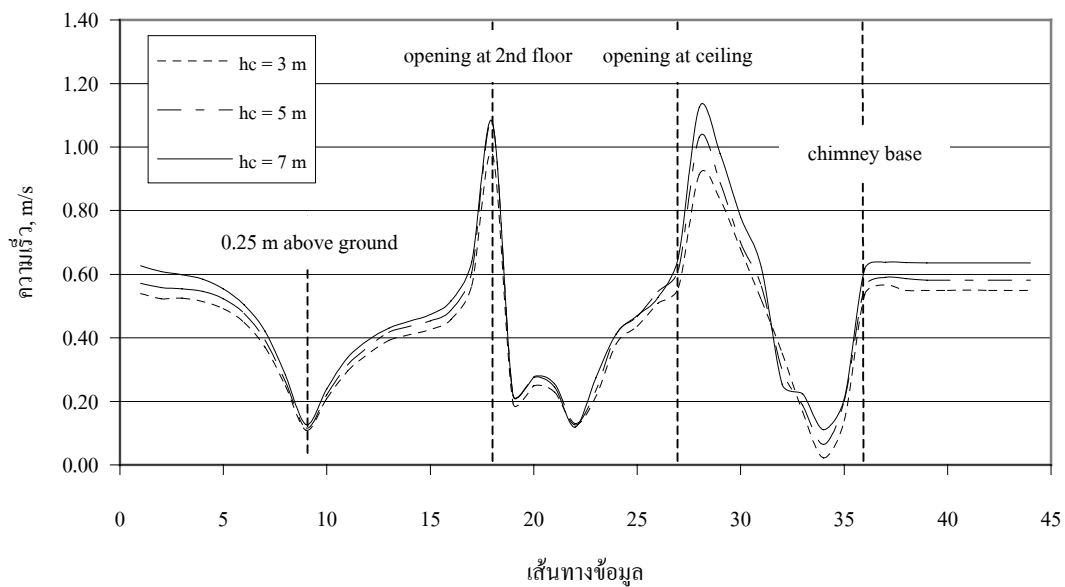
รูปที่ 4.76 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°



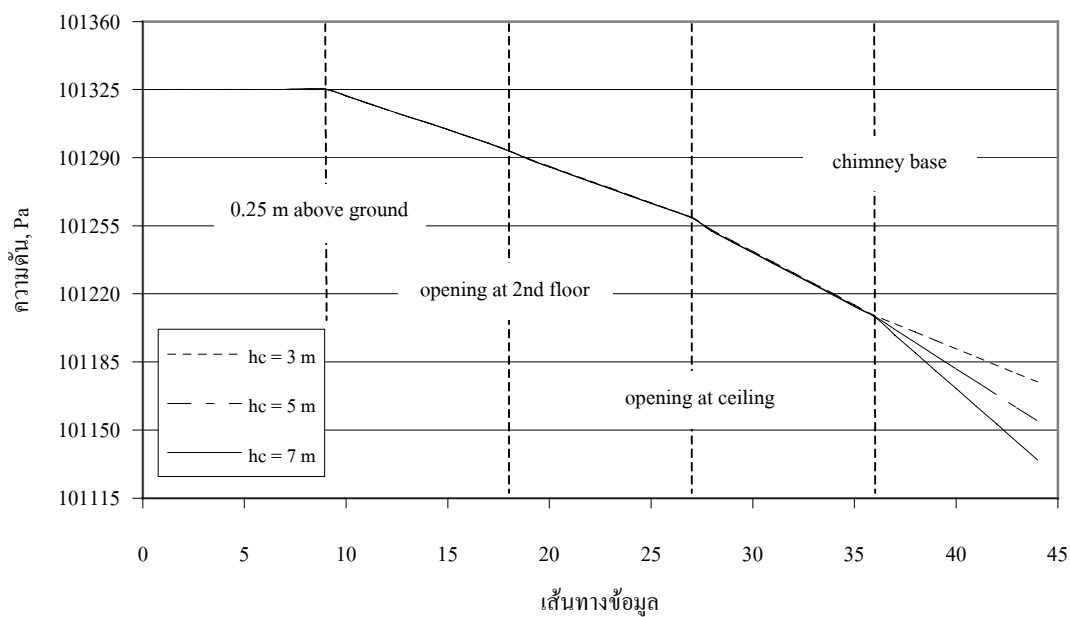
รูปที่ 4.77 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°



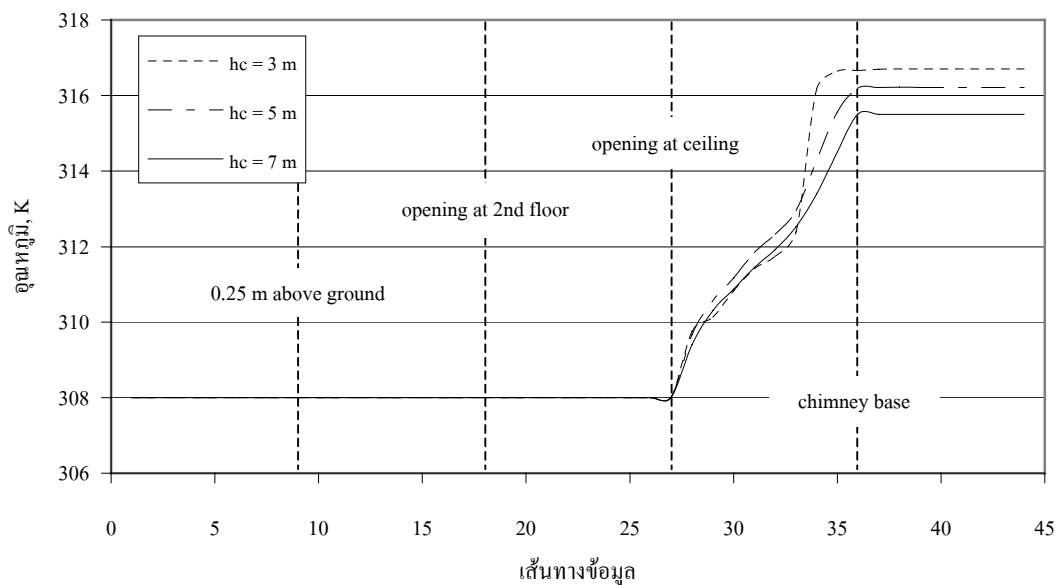
รูปที่ 4.78 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 30°



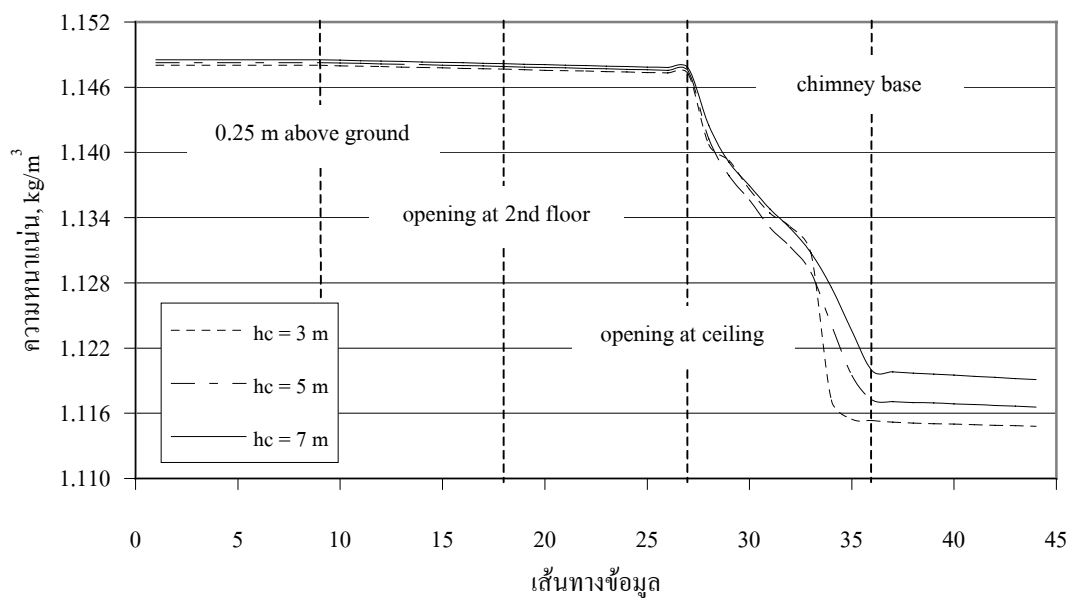
รูปที่ 4.79 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°



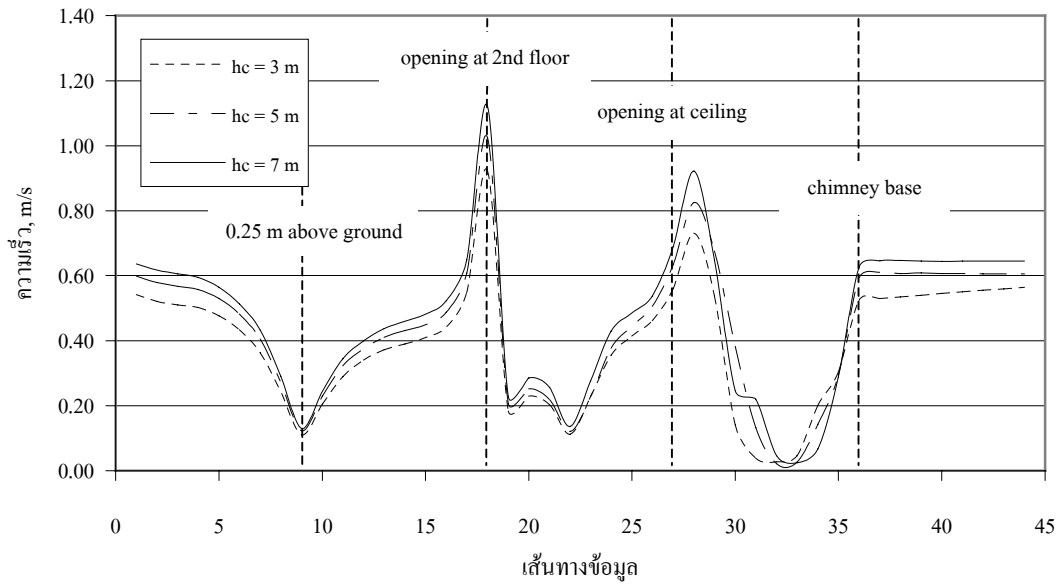
รูปที่ 4.80 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°



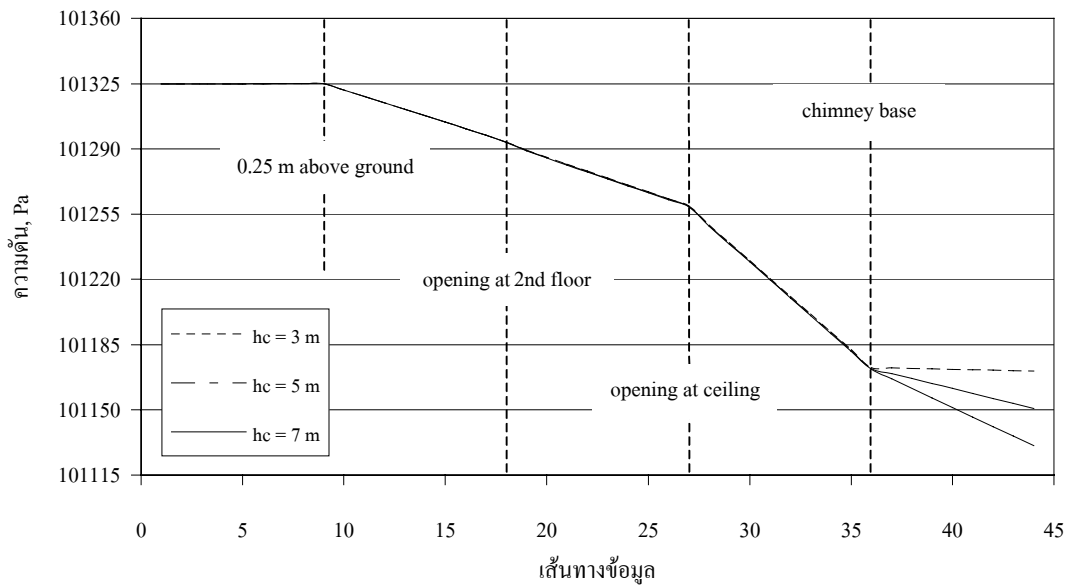
รูปที่ 4.81 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°



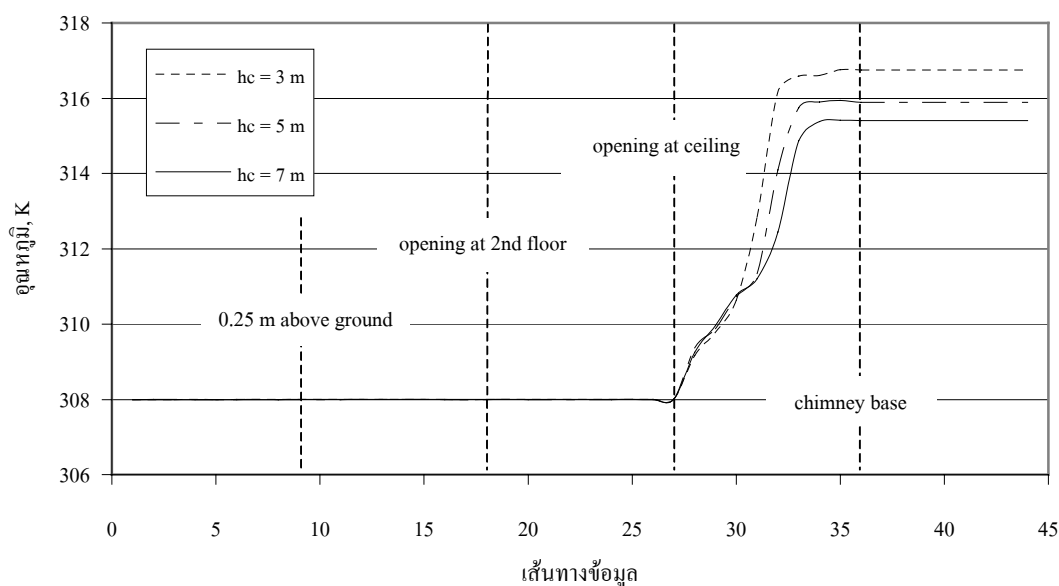
รูปที่ 4.82 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 45°



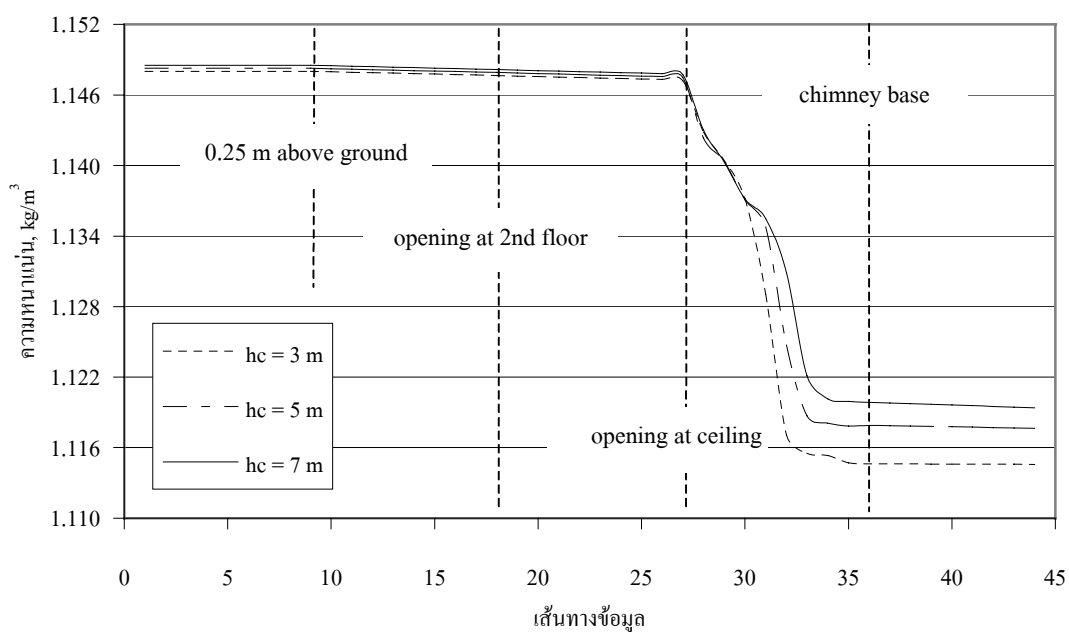
รูปที่ 4.83 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°



รูปที่ 4.84 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°



รูปที่ 4.85 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°



รูปที่ 4.86 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 60°

ทำการคำนวณค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ และค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็ว และอุณหภูมิภายในปล่องของทั้ง 12 กรณี ที่ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 550 W/m^2 และแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 13 – 24

กรณีที่	h_c (m)	θ ($^{\circ}$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
13	3	15	55.4401	0.3870	320.3
14	3	30	69.7435	0.4871	317.8
15	3	45	77.0676	0.5381	316.9
16	3	60	78.1547	0.5536	316.6
17	5	15	60.5052	0.4224	319.3
18	5	30	76.8081	0.5365	316.9
19	5	45	83.3200	0.5817	316.2
20	5	60	86.6588	0.6052	315.9
21	7	15	66.2720	0.4627	318.3
22	7	30	81.2173	0.5672	316.4
23	7	45	91.1680	0.6365	315.5
24	7	60	92.3268	0.6445	315.4

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า ทั้งการเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาและการเพิ่มความสูงของปล่องต่างส่งผลให้ได้อัตราการไหลโดยมวลที่ไหลผ่านอาคารมากขึ้นเช่นเดียวกัน และยังพบว่า ผลลัพธ์ที่ค่าความเข้มข้นของแสงแดดสูงกว่าส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยภายในปล่อง ตลอดจนอุณหภูมิเฉลี่ยภายในปล่องและอัตราการไหลมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีค่าความเข้มข้นของแสงแดดต่ำกว่า (300 W/m^2) พิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในปล่อง พบว่า เมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าลดลงเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับผลลัพธ์ที่ค่าความเข้มข้นของแสงแดด 300 W/m^2

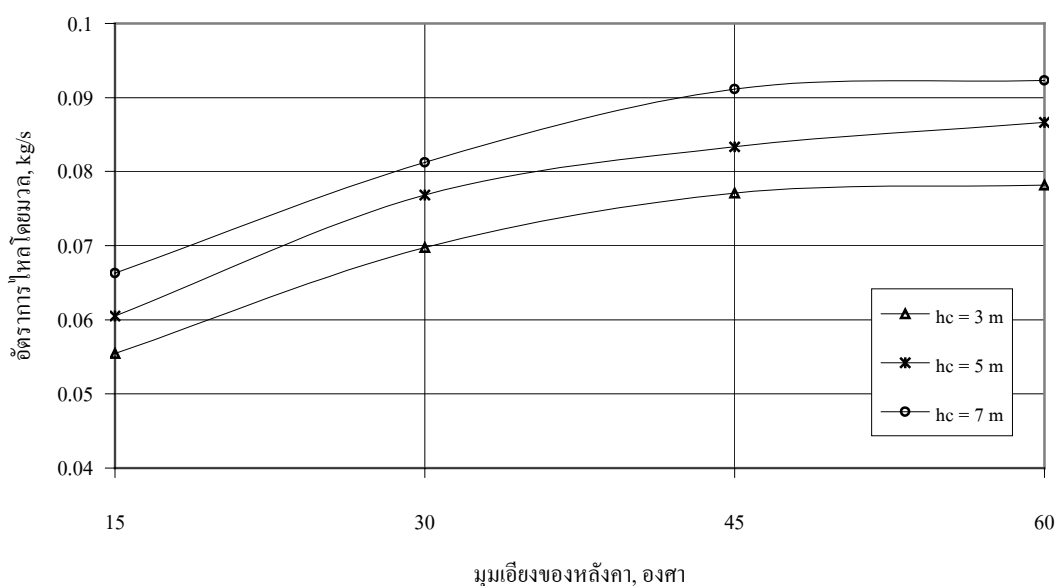
สำหรับที่ค่าความเข้มข้นของแสงแดดเป็น 550 W/m^2 นี้ เมื่อพิจารณาที่ค่าความสูงของปล่อง 3 m โดยเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่า (เท่ากับ 30°) พบว่าสามารถทำให้ได้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิม 25.8% หากเพิ่มมุมเอียงของหลังคาเป็น 3 เท่า (เท่ากับ 45°) และ 4 เท่า (เท่ากับ 60°) แล้วจะได้ว่า สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 39.0% และ 41.0% ตามลำดับ จะเห็นว่า อัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาที่ค่าความเข้มข้นของแสงแดดมากกว่านี้ มีค่าใกล้เคียงกับที่ค่าความเข้มข้นของแสงแดดต่ำกว่า (ซึ่งเท่ากับ 26.9%, 38.1% และ 40.5% ตามลำดับ)

ซึ่งหากพิจารณาที่ค่าความสูงของปล่องเป็น 5 m ก็พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ เพิ่มขึ้น 26.9%, 37.7% และ 43.2% เมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่า, 3 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความสูงปล่องเป็น 7 m พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 22.6%, 37.6% และ 39.3% ตามลำดับ

หากพิจารณาที่มุมเอียงของหลังคาตามที่กำหนดหนึ่ง เพิ่มความสูงของปล่องจาก 3m เป็น 5m (เพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่า) ที่ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 15° พบว่า อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น 9.1% และเมื่อพิจารณาที่ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 30° , 45° และ 60° เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 5 m พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 10.1%, 8.1% และ 10.9% ตามลำดับ

หากเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 7 m (เพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 เท่า) พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 19.5%, 16.5%, 18.3% และ 18.1% เมื่อพิจารณาที่มุมเอียงของหลังคา 15° , 30° , 45° , 60° ตามลำดับ

อัตราการไหลโดยมวลของอากาศสำหรับ 12กรณี ที่ค่าความเข้มของแสงแดด 550 W/m^2 แสดงดังรูปที่ 4.87 โดยกำหนดให้ความสูงของปล่องเป็นตัวแปรรองเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องที่มีต่อค่าอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.87 อัตราการไหลโดยมวลของอากาศกรณี 13 – 14

4.2.3 ผลการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดด 800 W/m²

การจำลองชุดสุดท้ายทำการเพิ่มค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 800 W/m² จากนั้นทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านอาคาร (ซึ่งตรงกับกรณีที่ 25 – 36 ในตารางที่ 4.1) เมื่อพื้นที่รับแสงแดดของหลังคาเท่าเดิม ค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของหลังคาที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ คือ

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 15^\circ = 1206.2908 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 30^\circ = 559.8712 \text{ W/m}^3$$

$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 45^\circ = 323.2323 \text{ W/m}^3$$

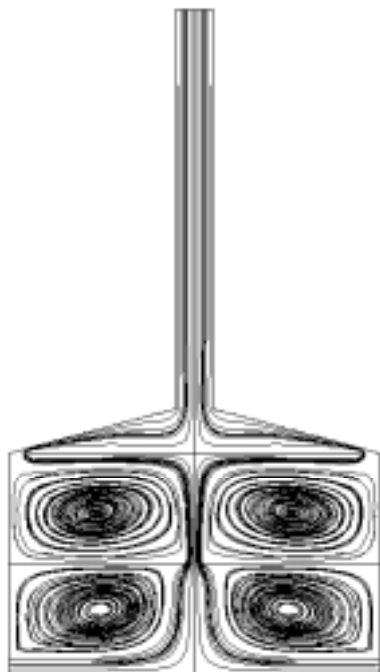
$$\text{ที่มุมเอียงของหลังคา } 60^\circ = 186.619 \text{ W/m}^3$$

เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะโดยรวมของการไหล จึงนำผลการจำลองการไหลผ่านอาคารที่มีความสูงของปล่องเท่ากับ 7 m (กรณีที่ 32 – 36 ในตารางที่ 4.1) มาแสดงผลด้วยรูปของเส้นการไหล และเวกเตอร์ความเร็ว ตลอดจนคอนทัวร์ของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.88 – 4.99

รูปที่ 4.88 – 4.95 แสดงเส้นการไหลและเวกเตอร์ความเร็วของผลการจำลองที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ จากรูป จะเห็นว่า ลักษณะของเส้นการไหลและการกระจายของเวกเตอร์ความเร็วคล้ายคลึงกับผลการจำลองในกรณีความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m² และ 550 W/m² ที่ผ่านมานั้นคือเกิดการหมุนของอากาศที่ห้องพักทั้งสองชั้น ไม่ว่าจะมุมเอียงของหลังคาจะเป็นค่าเท่าใดก็ตาม และที่ค่ามุมเอียงของหลังคา 30° เป็นต้นไป พบการเกิดการหมุนวนของอากาศขึ้นภายในห้องหลังคา และการตกลงของเส้นการไหลภายในห้องหลังคา ซึ่งได้สันนิษฐานสาเหตุที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1

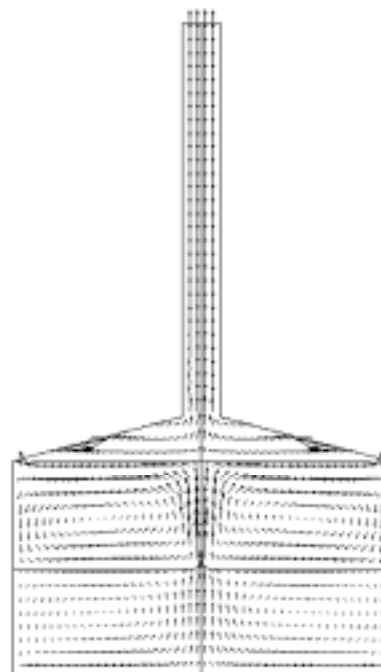
รูปที่ 4.96 – 4.99 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในอาคารด้วยคอนทัวร์ของอุณหภูมิที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ (เมื่อพิจารณาที่ค่าความสูงของปล่อง 7 m) ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิลำดับกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองที่ค่าความเข้มของแสงแดดที่ 300 W/m² และ 550 W/m² ที่ผ่านมา โดยอุณหภูมิภายในห้องพักมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ด้านนอกของอาคาร นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อให้ค่าความเข้มของแสงแดดมากขึ้น อุณหภูมิของของไหลก็มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.4

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



รูปที่ 4.88 เส้นการไหลกรณีที่ 33

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



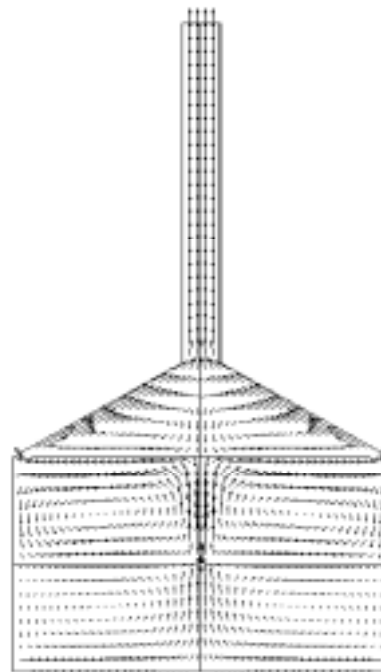
รูปที่ 4.89 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 33

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



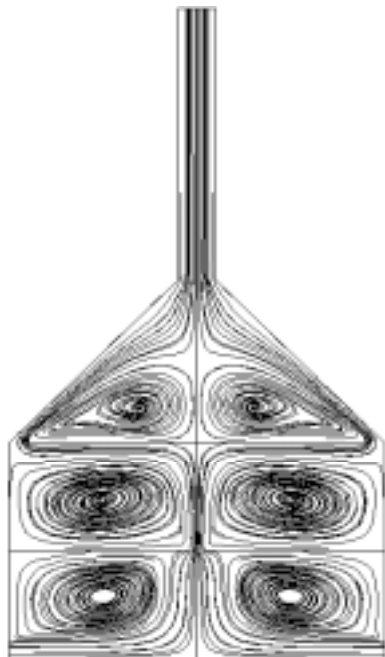
รูปที่ 4.90 เส้นการไหลกรณีที่ 34

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 30^\circ$$



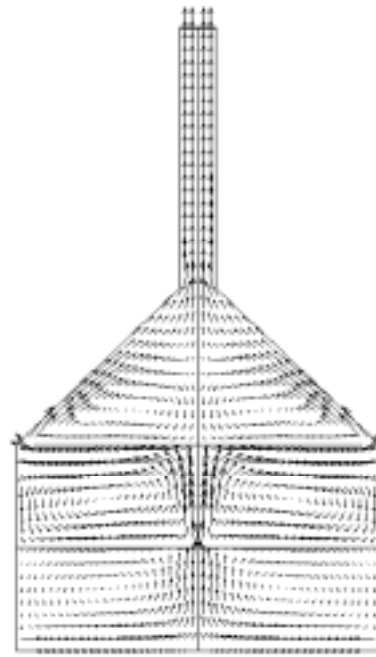
รูปที่ 4.91 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 34

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



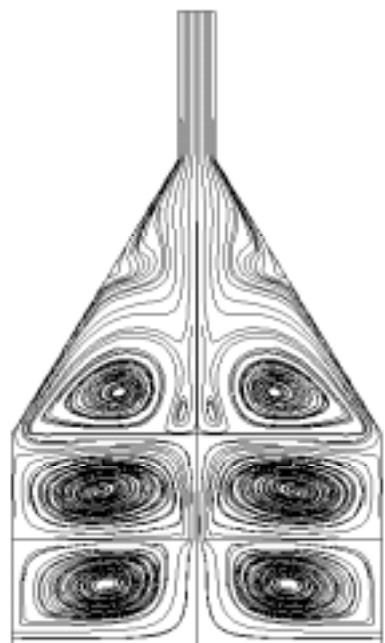
รูปที่ 4.92 เส้นการไหลกรณีที่ 35

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 45^\circ$$



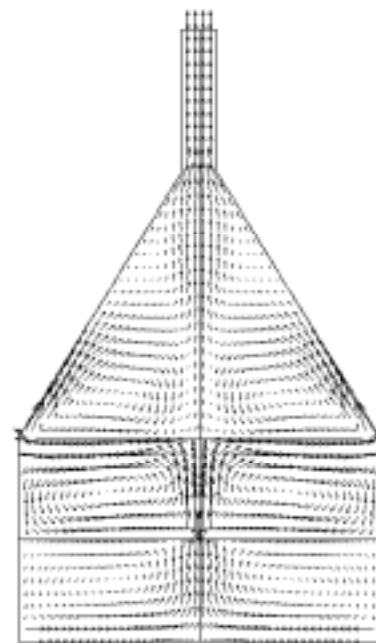
รูปที่ 4.93 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 35

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$



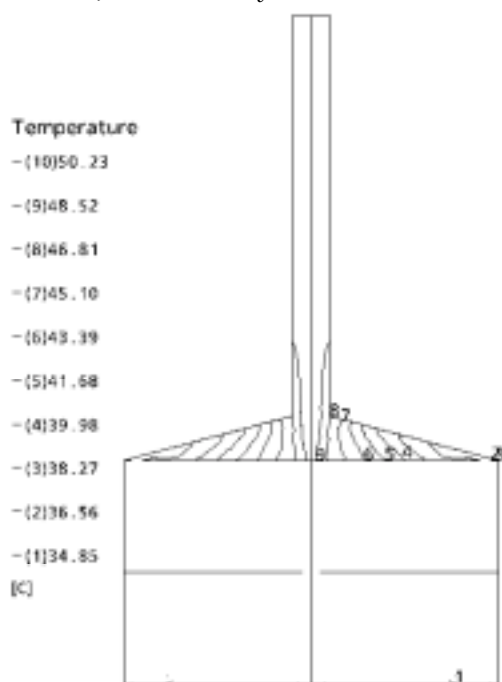
รูปที่ 4.94 เส้นการไหลกรณีที่ 36

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 60^\circ$$



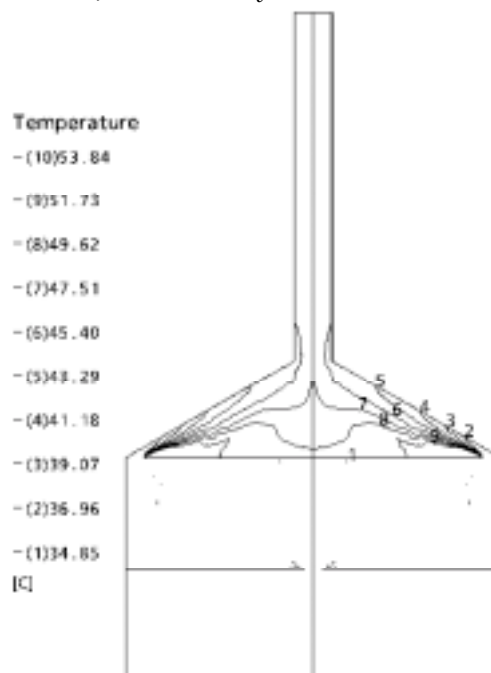
รูปที่ 4.95 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 36

$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 15^\circ$



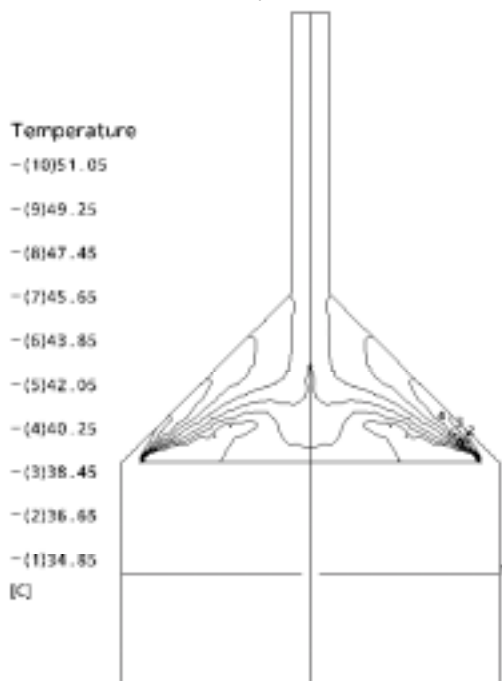
รูปที่ 4.96 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 33

$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 30^\circ$



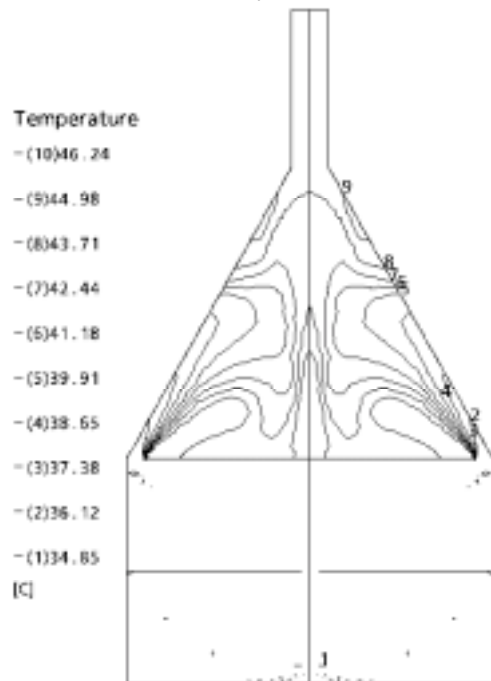
รูปที่ 4.97 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 34

$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 45^\circ$



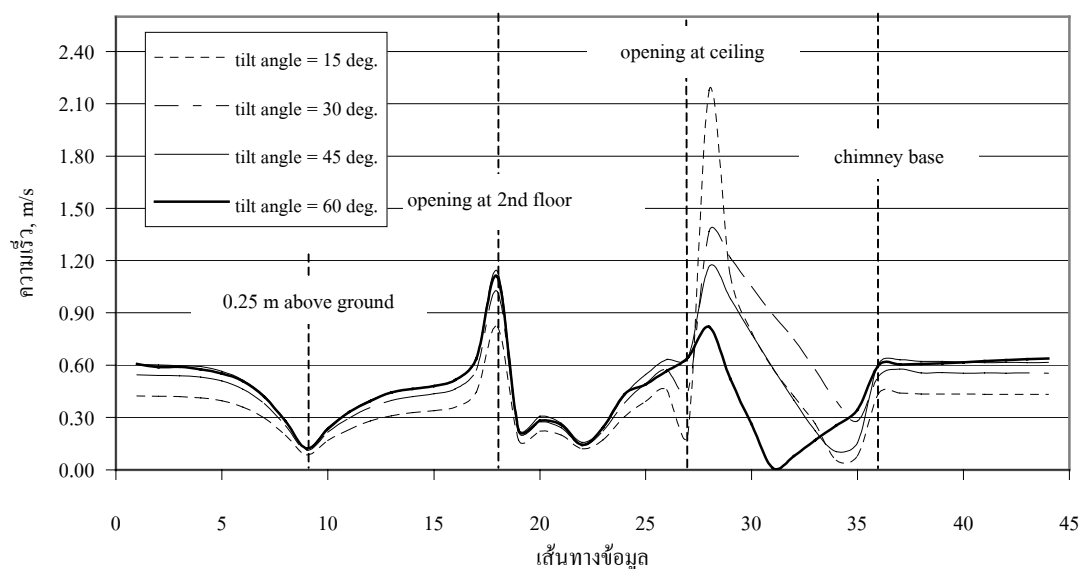
รูปที่ 4.98 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 35

$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 7 \text{ m}, \theta = 60^\circ$

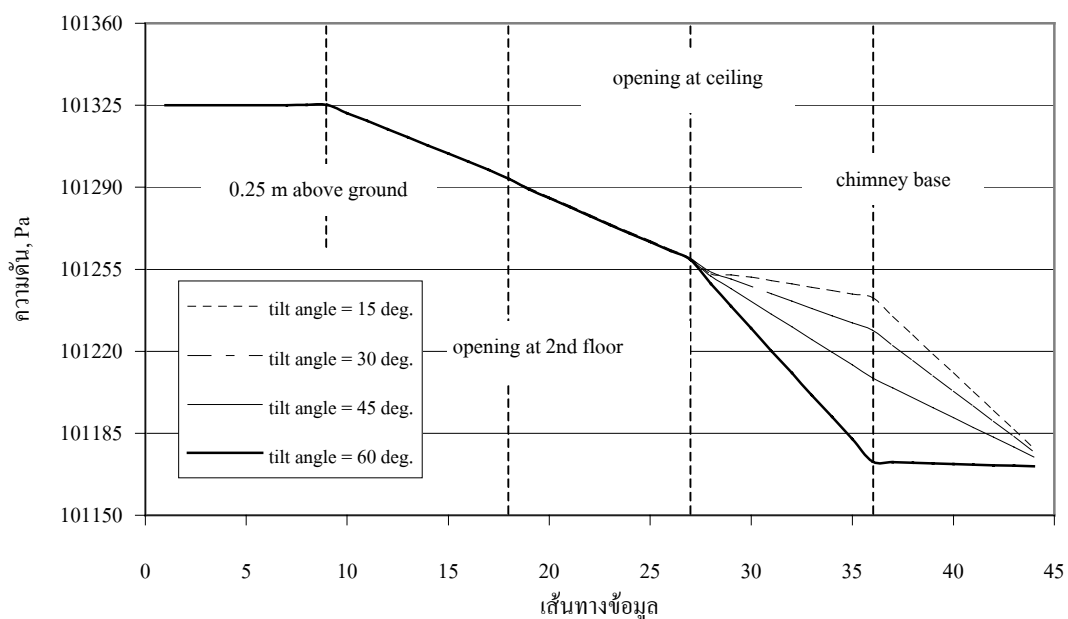


รูปที่ 4.99 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 36

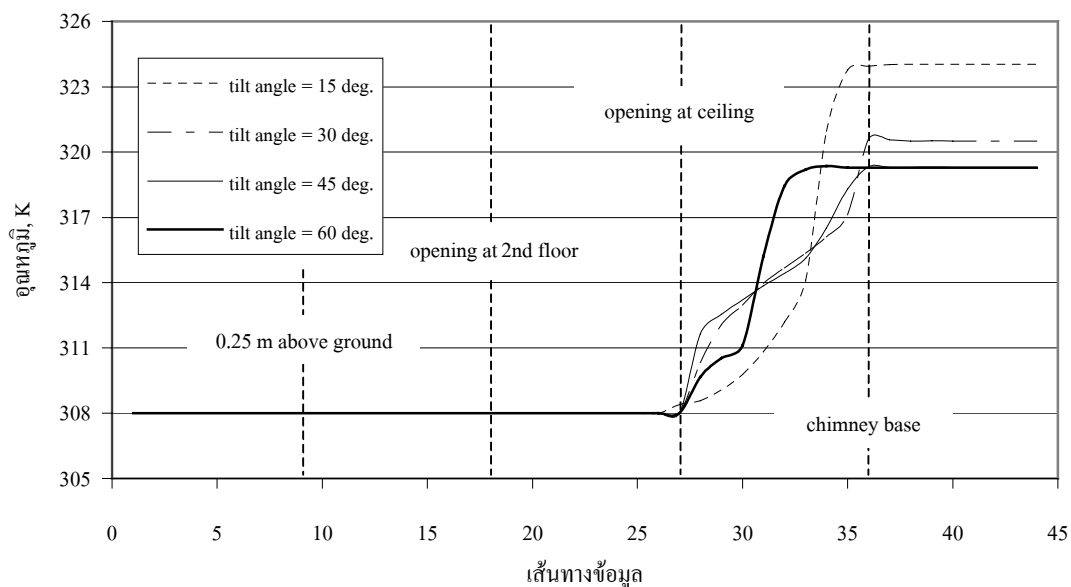
รูปที่ 4.100 – 4.111 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่มีความสูงของปล่องคงที่ค่าหนึ่ง และให้มุมเอียงของหลังคาเป็นตัวแปรรอง เพื่อศึกษาผลกระทบอันเกิดจากการเพิ่มมุมเอียงของหลัง ส่วนรูปที่ 4.112 – 4.128 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลการไหลเช่นเดียวกัน แต่พิจารณาที่มุมเอียงของหลังคาค่าหนึ่ง และให้ความสูงของปล่องเป็นตัวแปรรอง เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มความสูงของปล่อง จากข้อมูลในรูปดังกล่าว เห็นได้ว่า ที่ค่าความเข้มของแสงแดด 800 W/m^2 นี้ ยังยืนยันได้ว่า การเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคา และ/หรือ ความสูงของปล่องสามารถเพิ่มอัตราการไหลโดยมวลของอากาศได้ ผลกระทบจากการเพิ่มความเข้มของแสงแดดที่สามารถสังเกตได้ในที่นี้คือ ทำให้ความเร็วของการไหล และอุณหภูมิของอากาศภายในปล่องสูงขึ้น



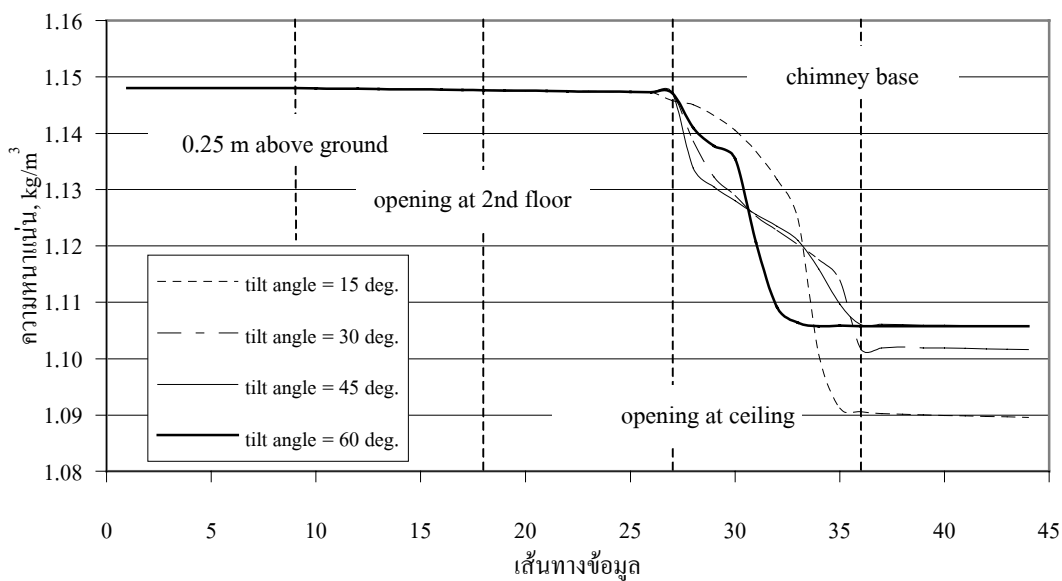
รูปที่ 4.100 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



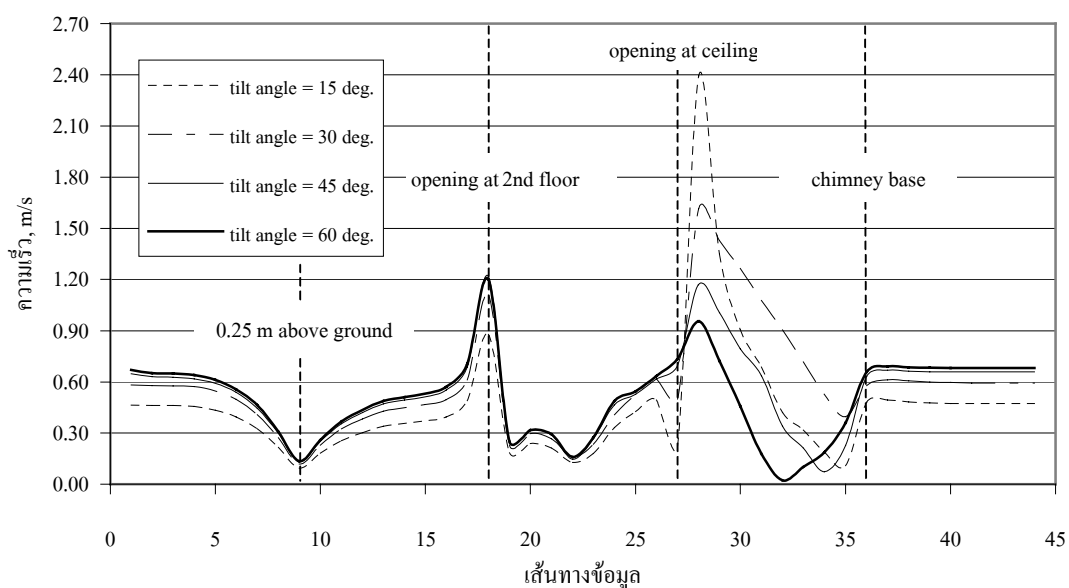
รูปที่ 4.101 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



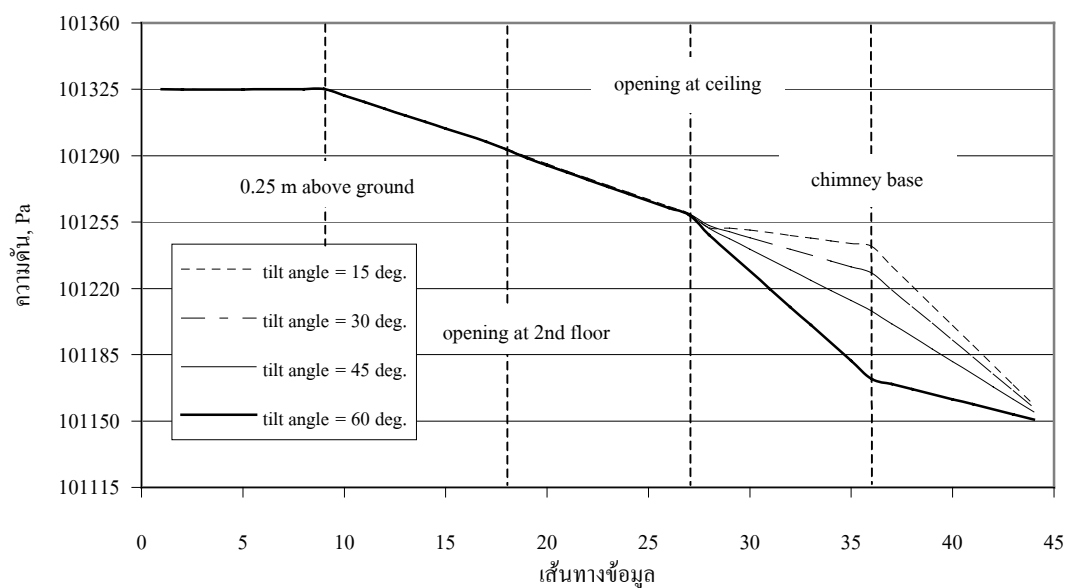
รูปที่ 4.102 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



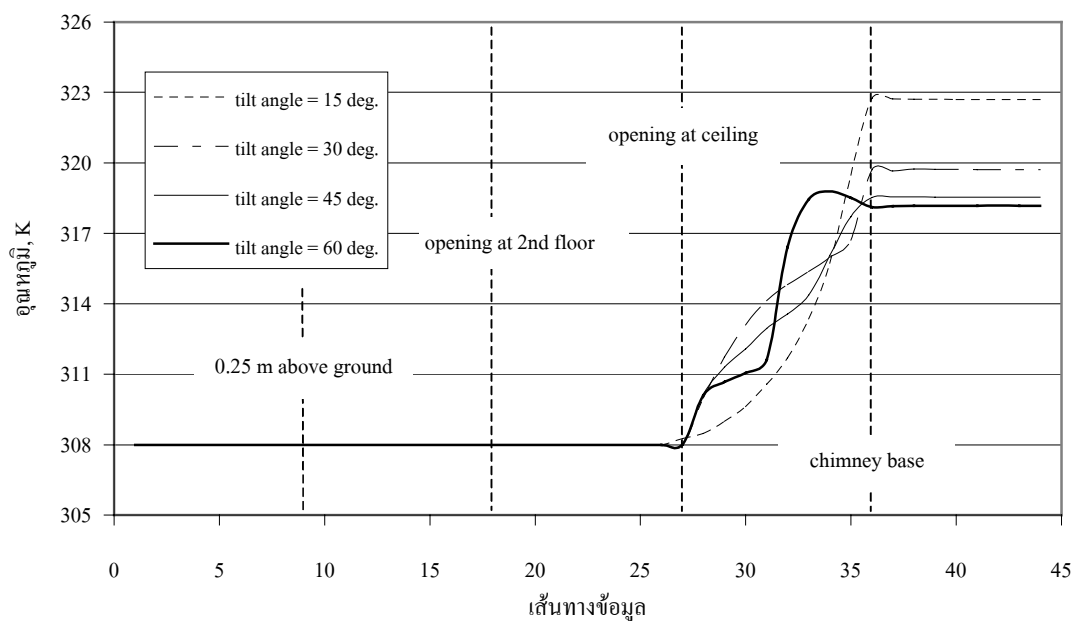
รูปที่ 4.103 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 3 m



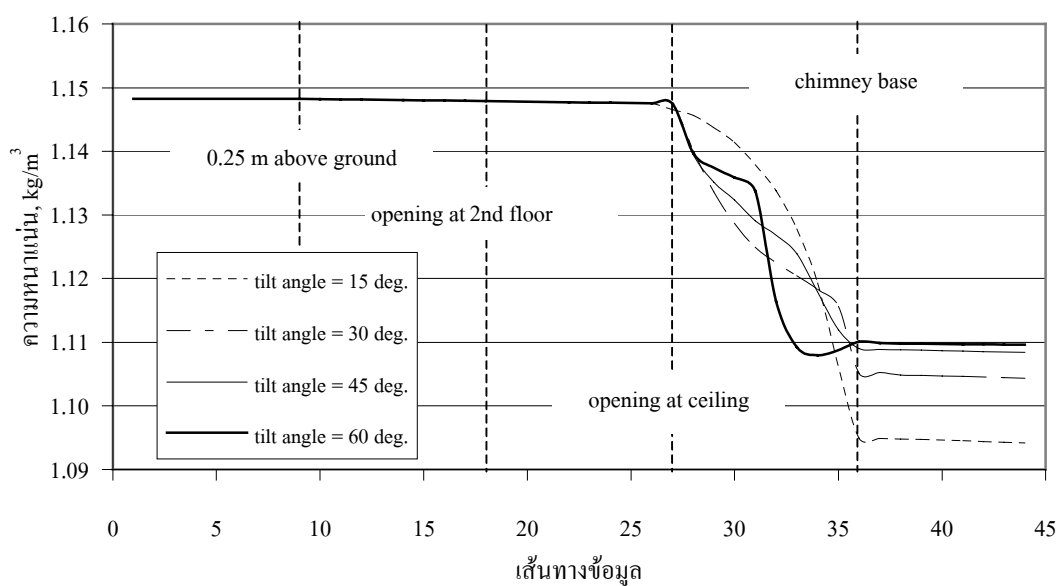
รูปที่ 4.104 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



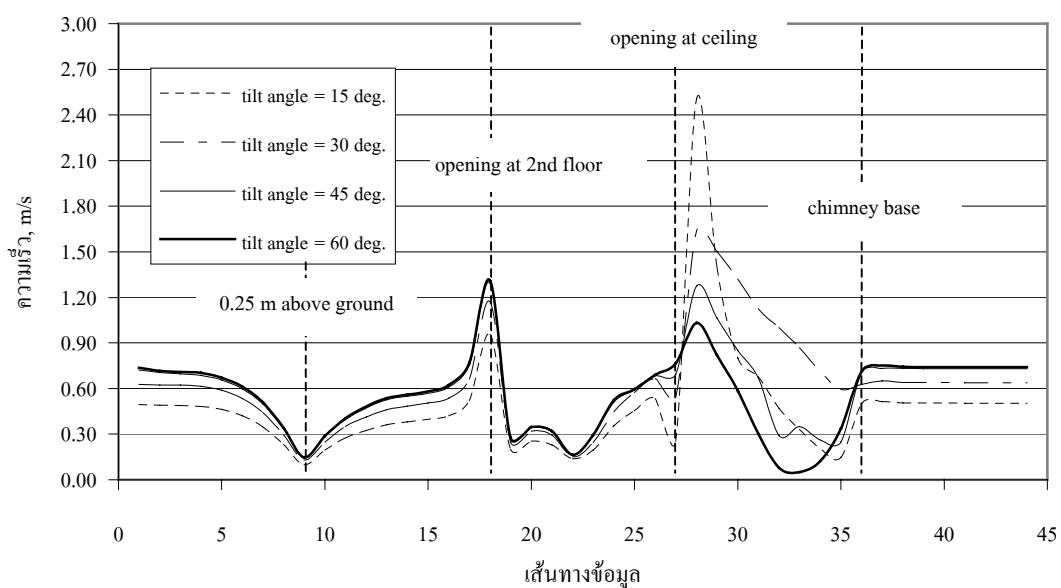
รูปที่ 4.105 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



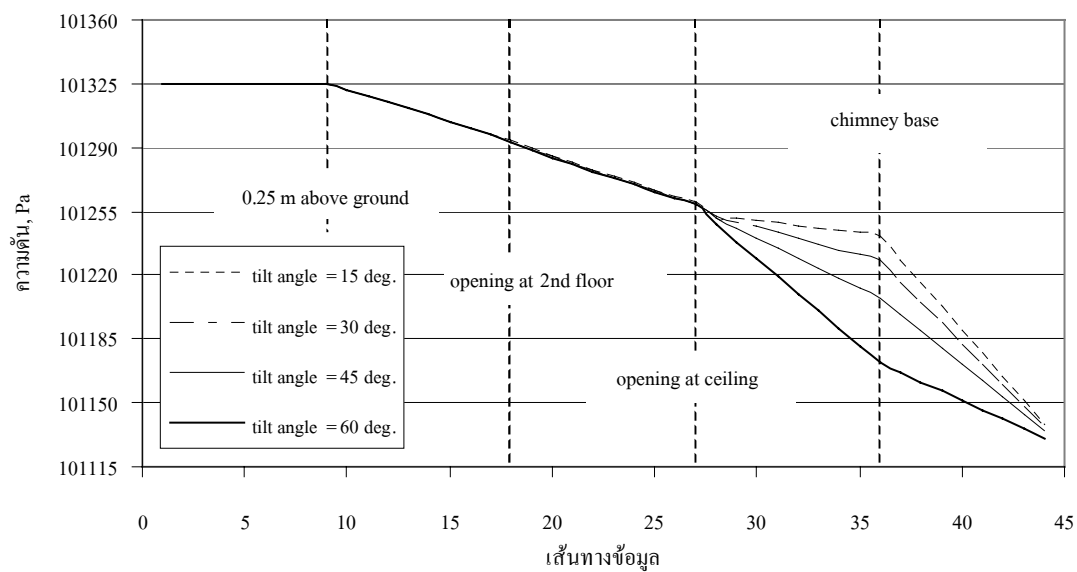
รูปที่ 4.106 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



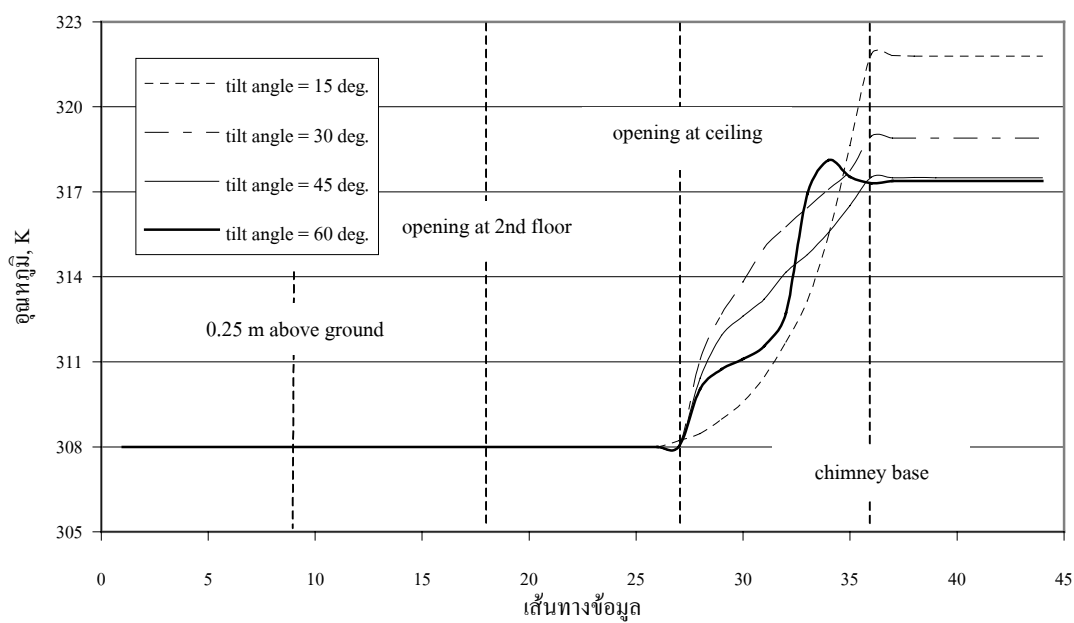
รูปที่ 4.107 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



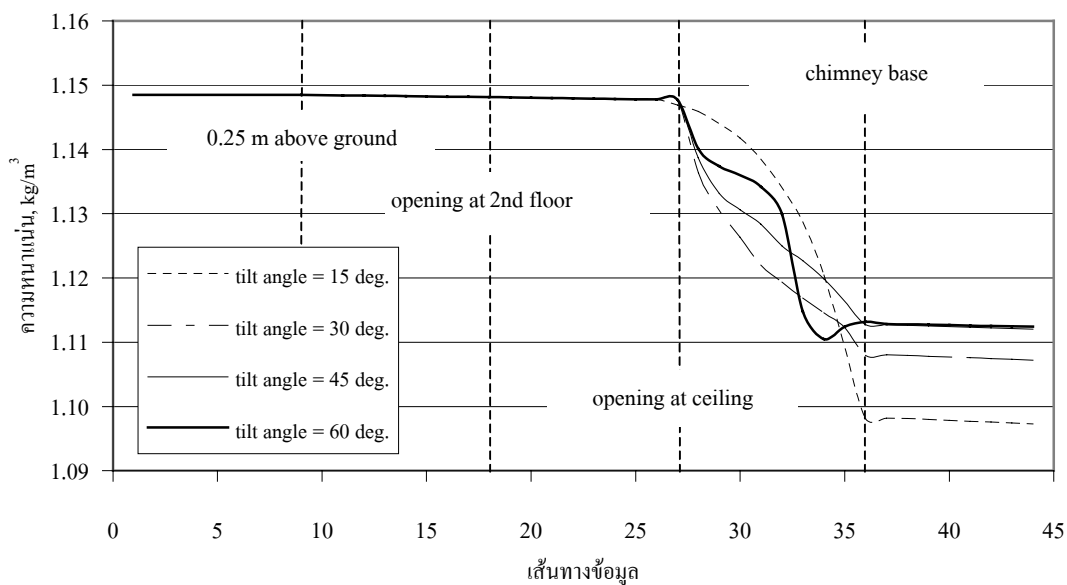
รูปที่ 4.108 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 5 m



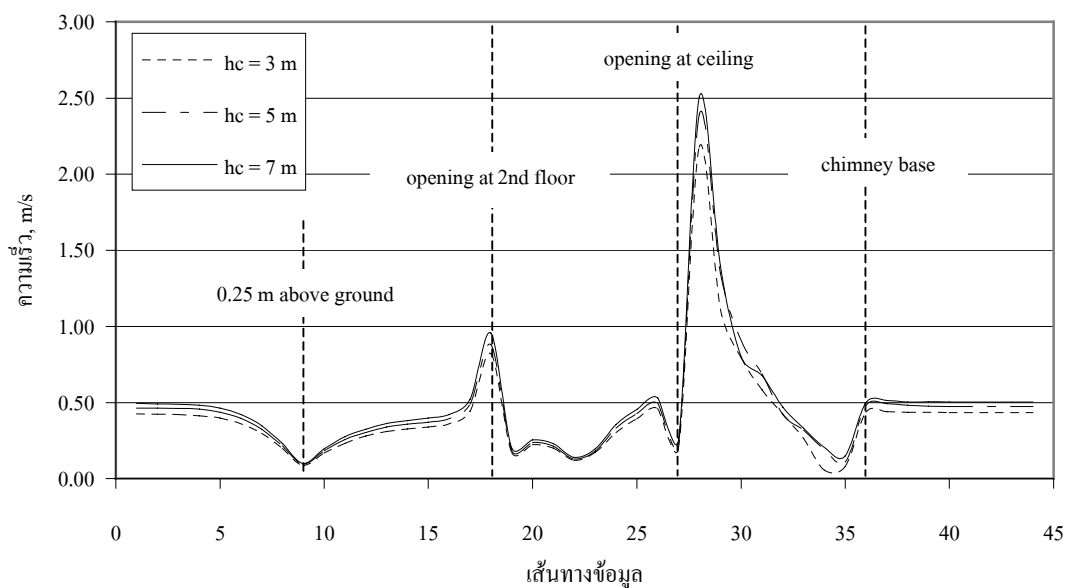
รูปที่ 4.109 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



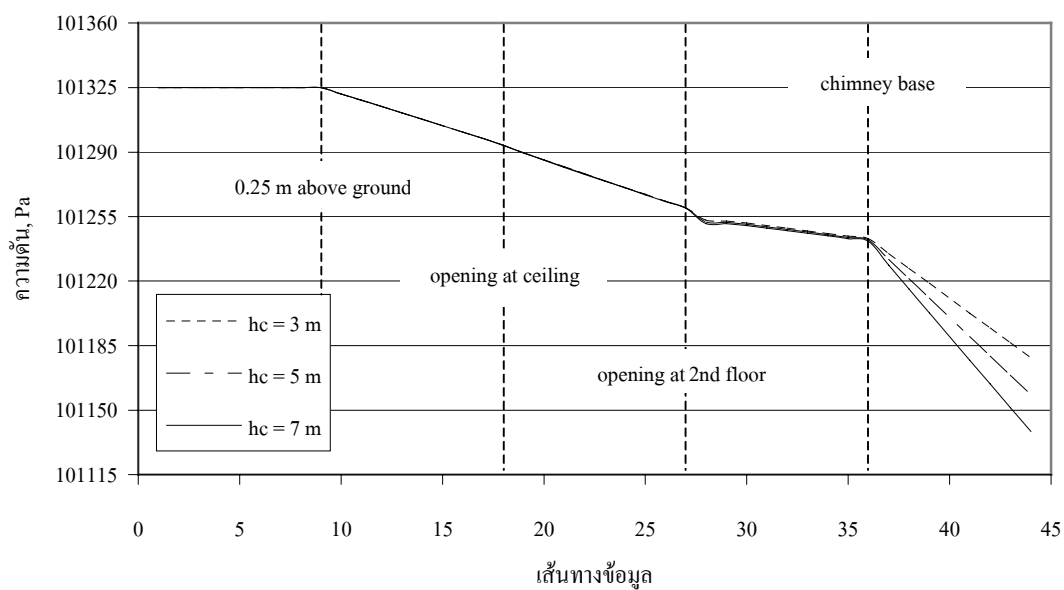
รูปที่ 4.110 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



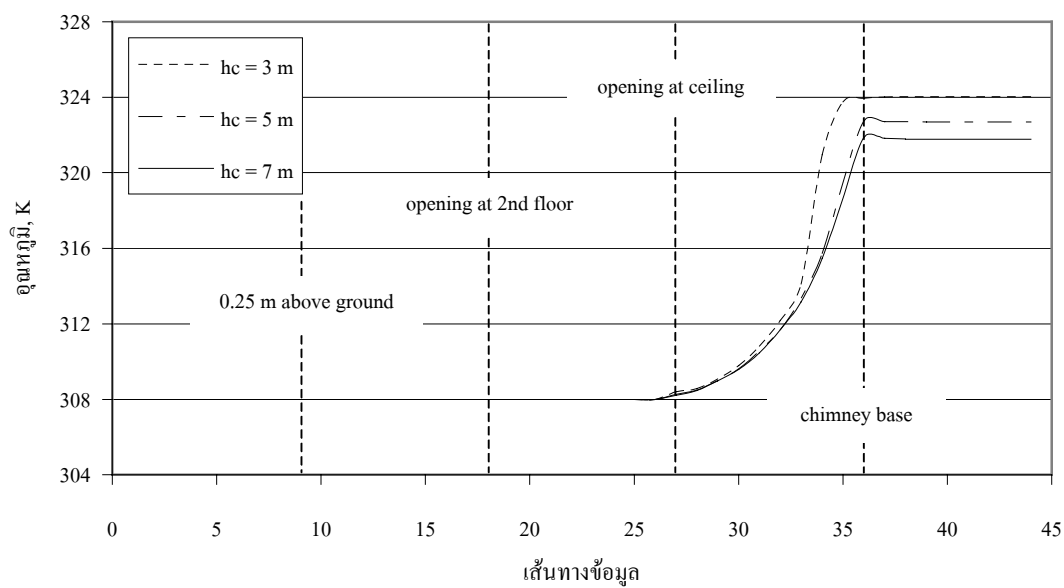
รูปที่ 4.111 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีปล่องสูง 7 m



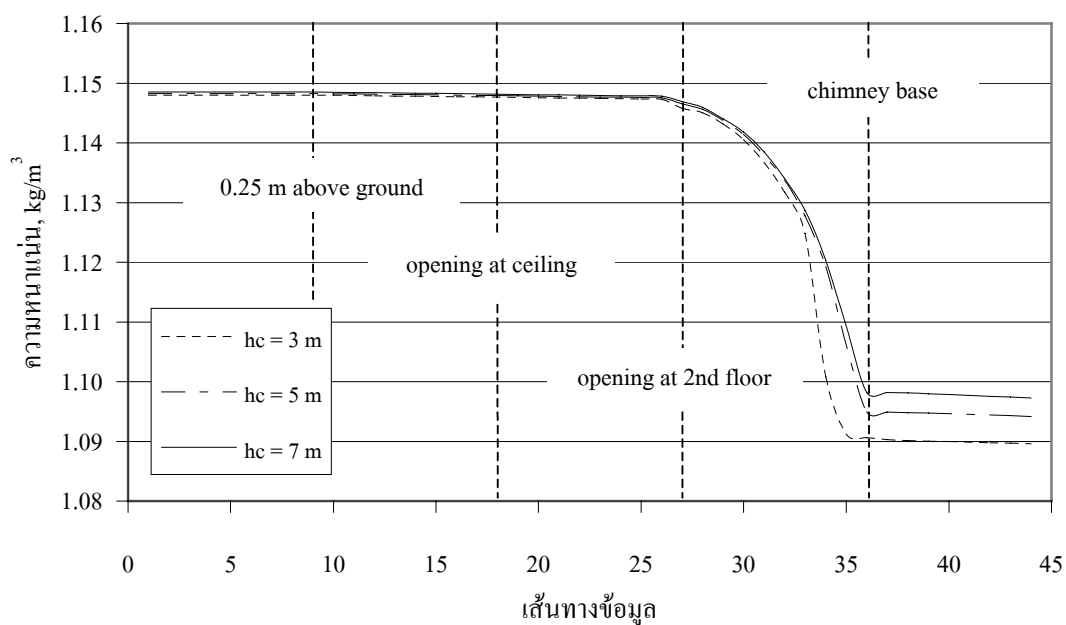
รูปที่ 4.112 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



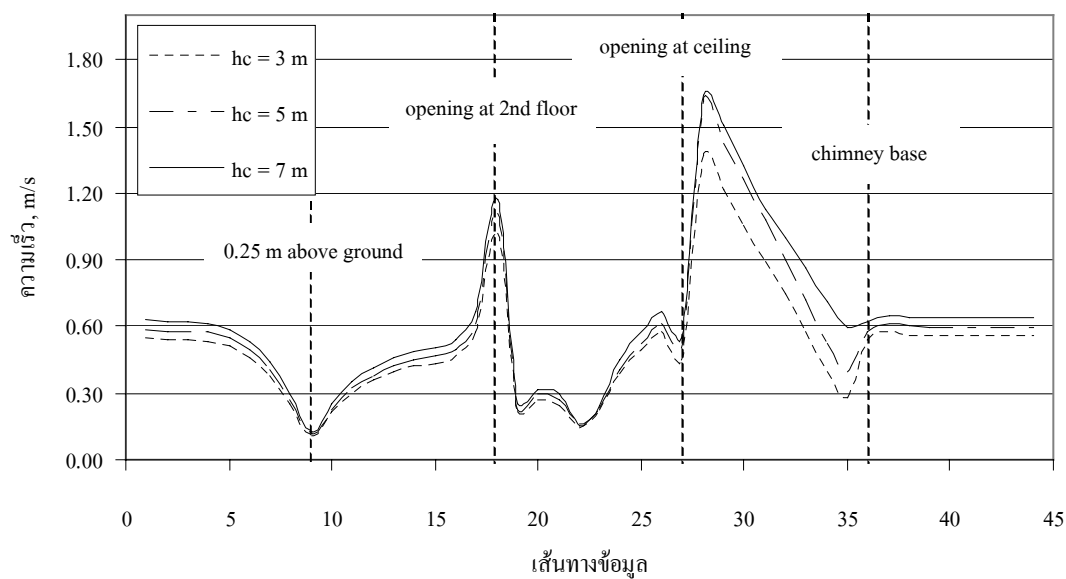
รูปที่ 4.113 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



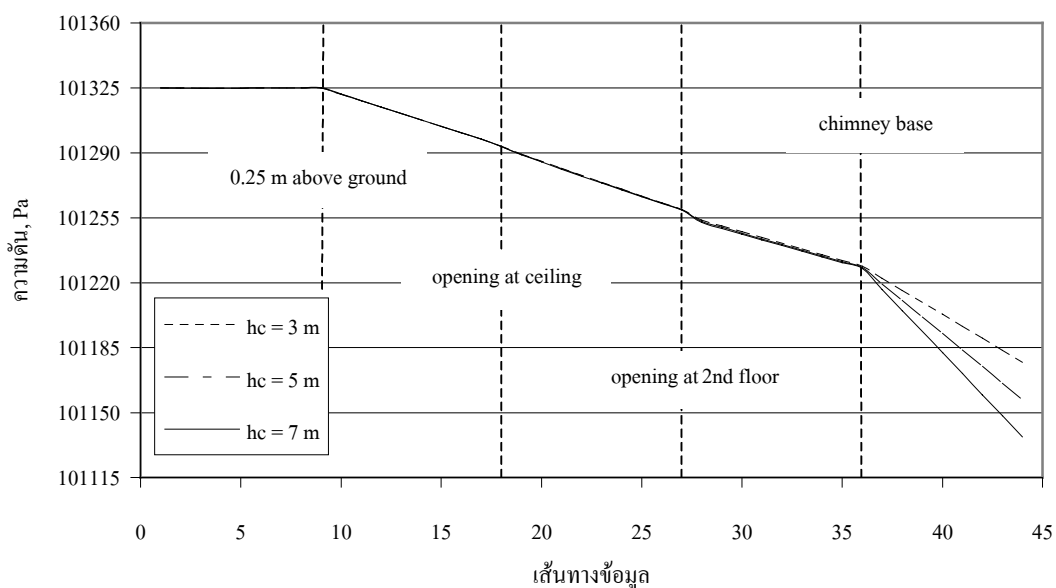
รูปที่ 4.114 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



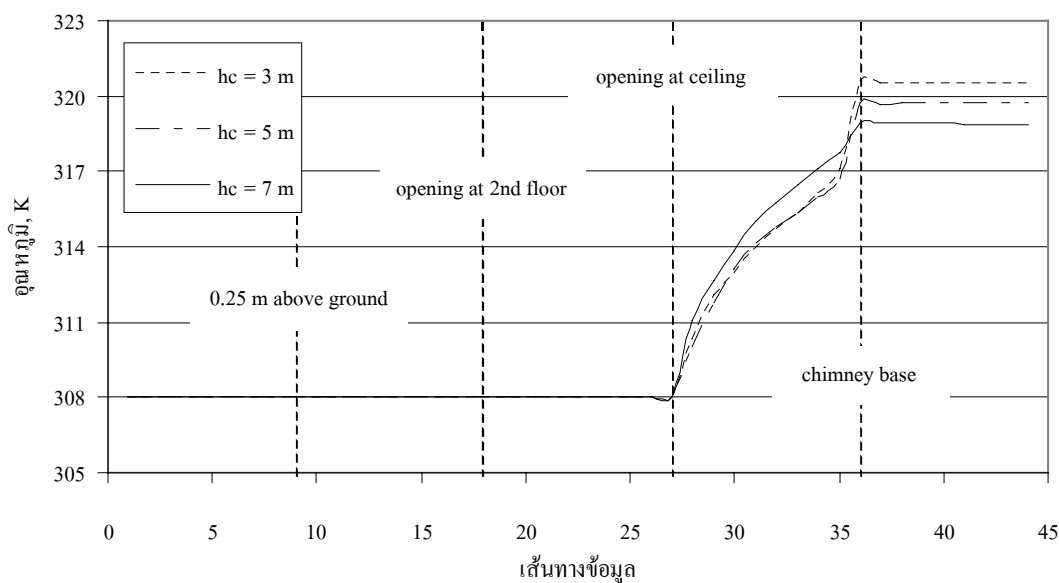
รูปที่ 4.115 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 15°



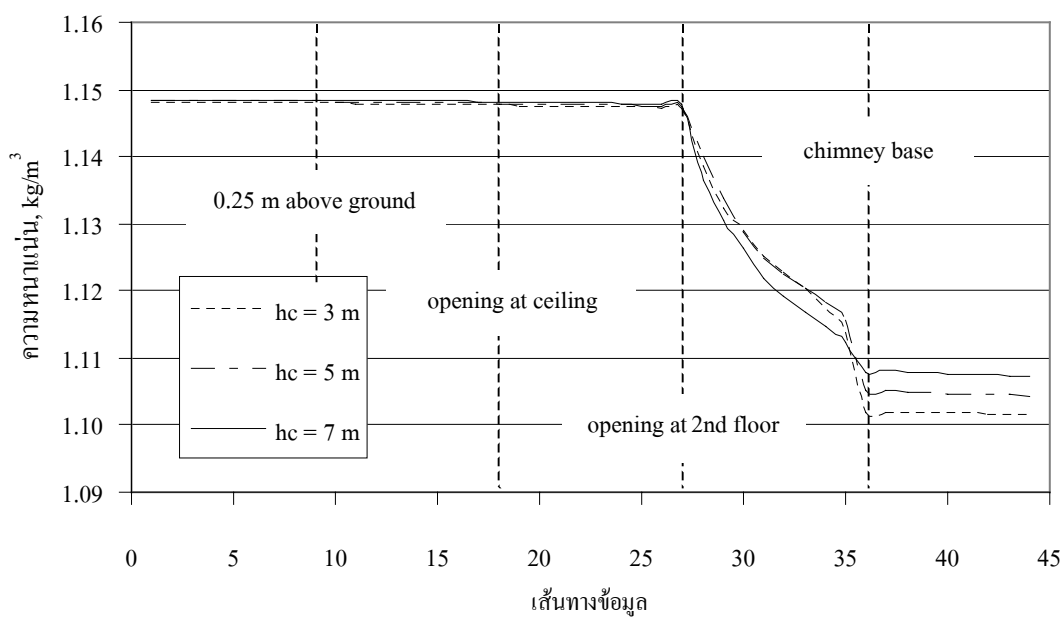
รูปที่ 4.116 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



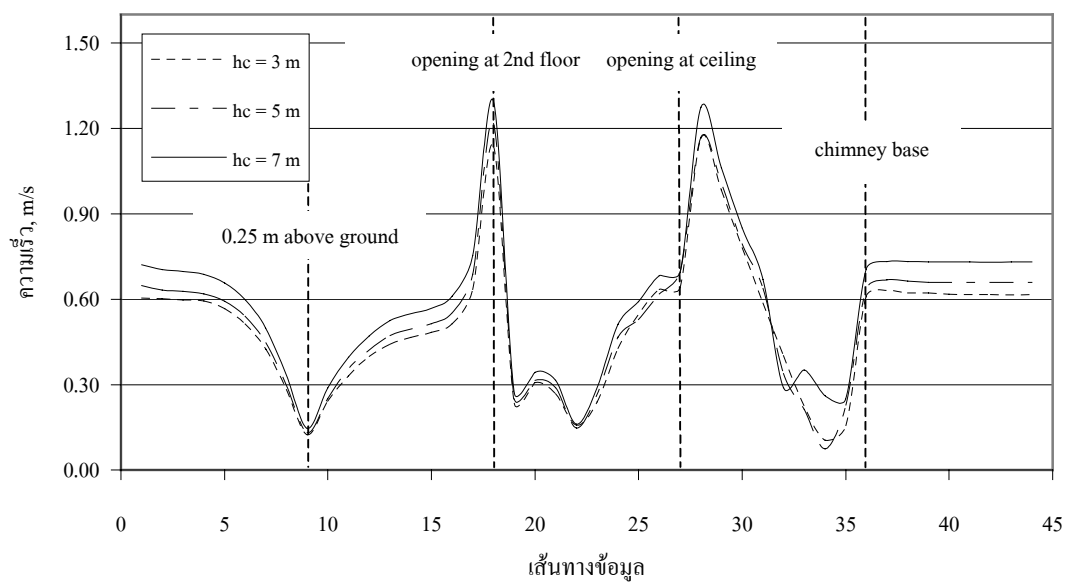
รูปที่ 4.117 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



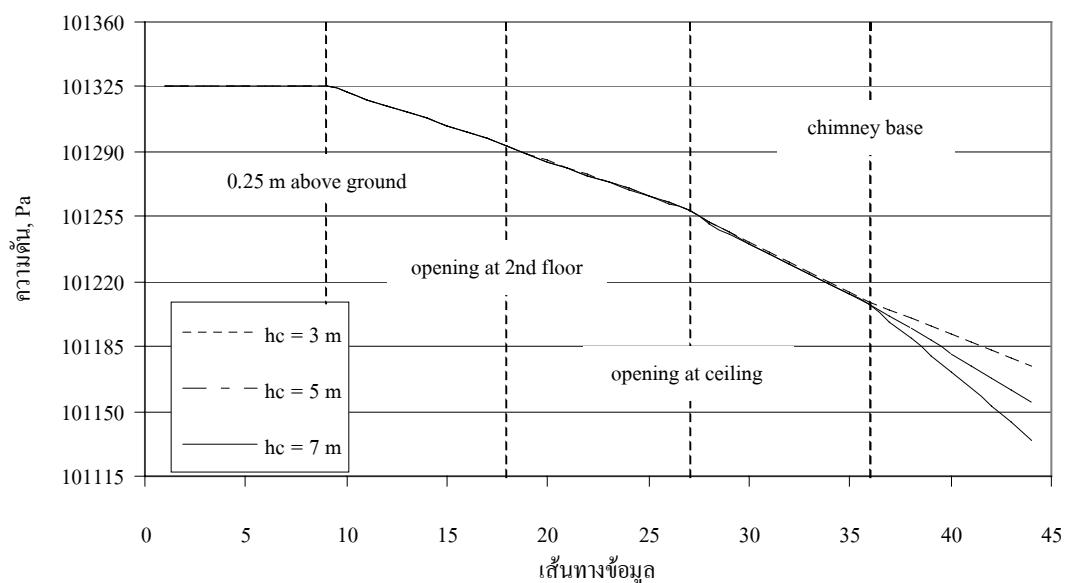
รูปที่ 4.118 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



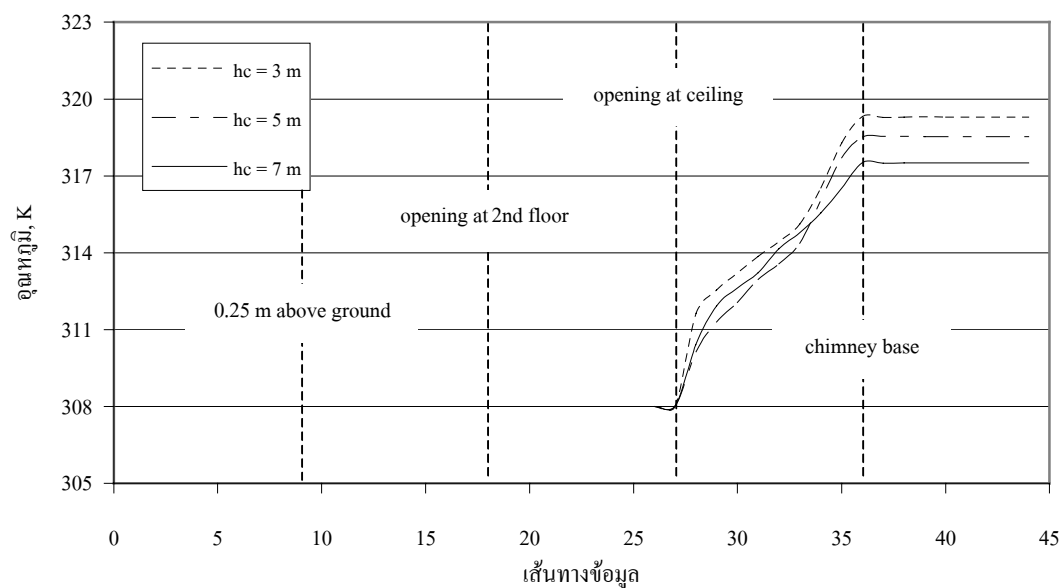
รูปที่ 4.119 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 30°



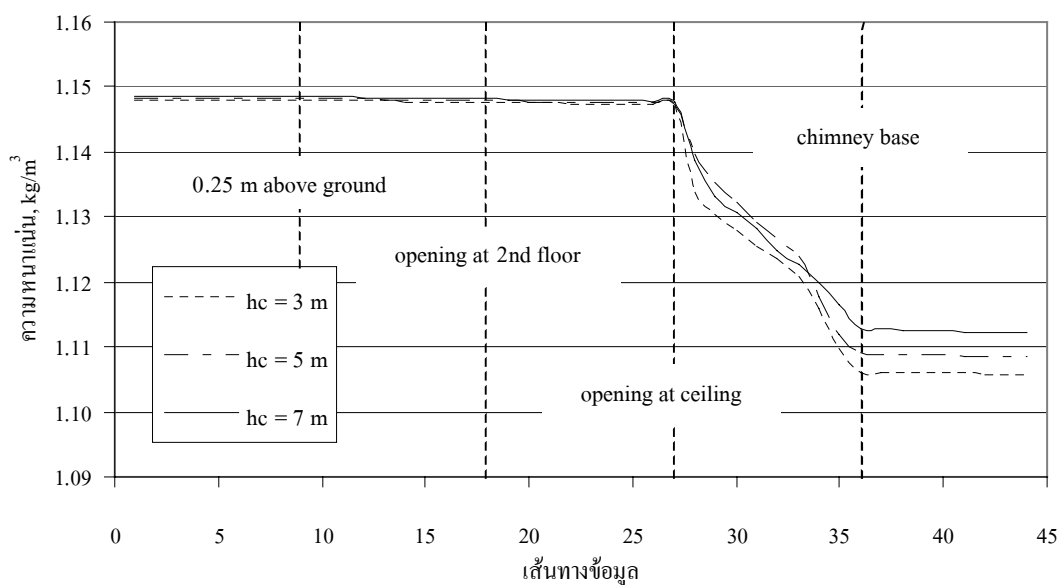
รูปที่ 4.120 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



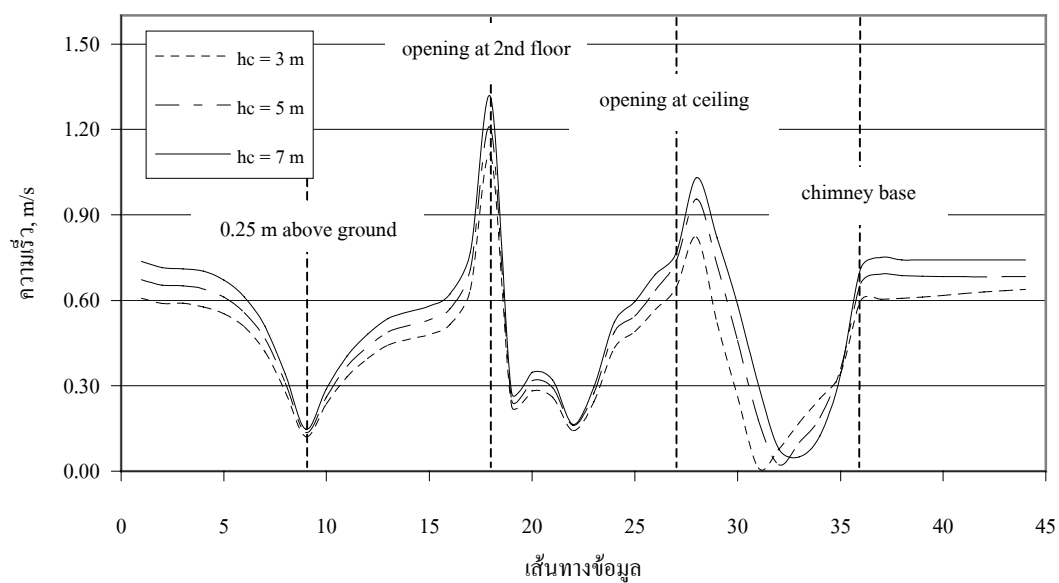
รูปที่ 4.121 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



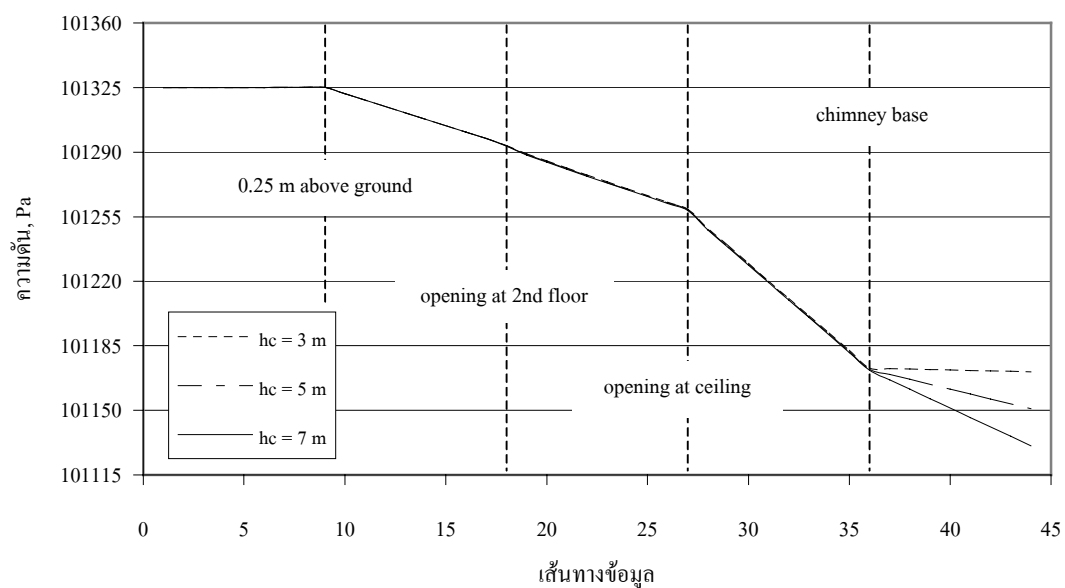
รูปที่ 4.122 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



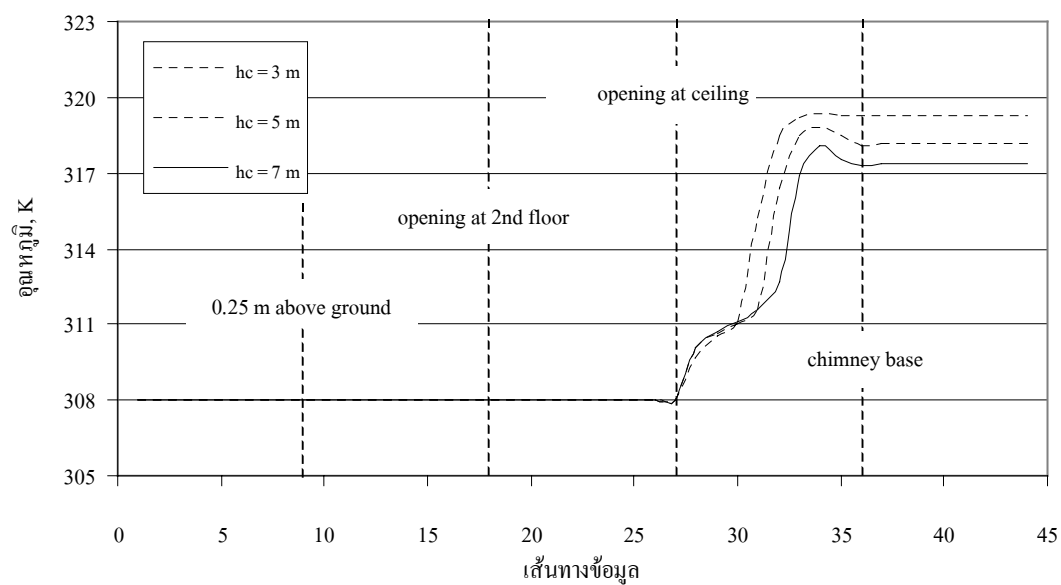
รูปที่ 4.123 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 45°



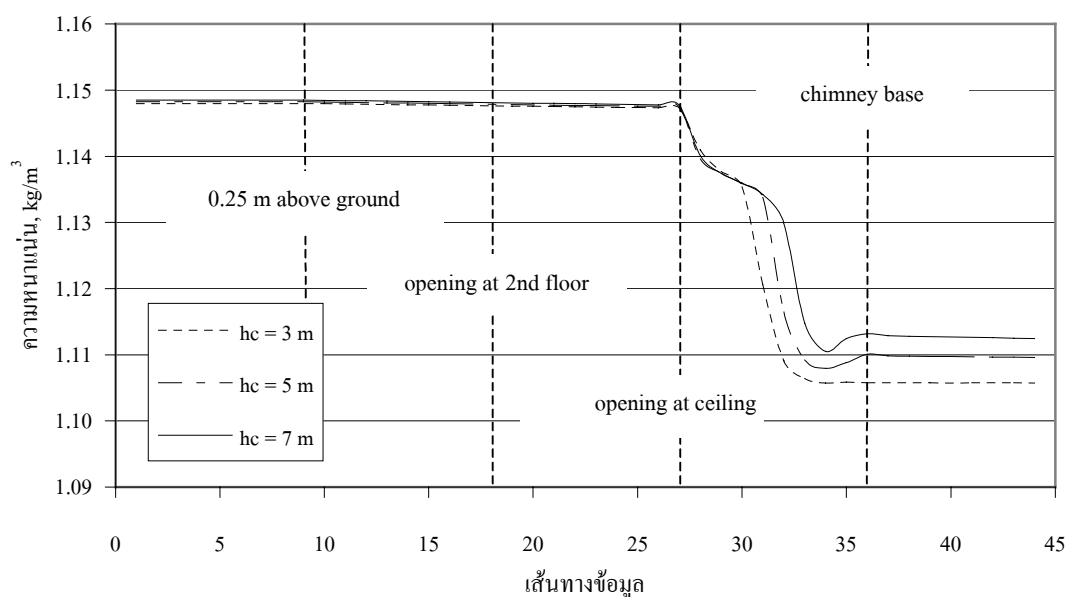
รูปที่ 4.124 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.125 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.126 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°



รูปที่ 4.127 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลกรณีหลังคาเอียง 60°

สำหรับที่ค่าความเข้มของแสงแดดเป็น 800W/m^2 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ ค่าเฉลี่ยของความเร็วและอุณหภูมิภายในปล่องของแต่ละกรณี ได้รวบรวมมาแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณี 25 – 36

กรณี	h_c (m)	θ ($^\circ$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
25	3	15	62.0330	0.4330	324.0
26	3	30	79.5766	0.5561	320.5
27	3	45	88.0707	0.6149	319.3
28	3	60	88.2593	0.6243	319.3
29	5	15	67.7173	0.4728	322.7
30	5	30	84.9603	0.5933	319.7
31	5	45	94.4043	0.6590	318.5
32	5	60	97.7670	0.6831	318.2

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

กรณีที่	h_c (m)	θ ($^{\circ}$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
33	7	15	72.1569	0.5036	321.8
34	7	30	91.3145	0.6379	318.9
35	7	45	104.690	0.7308	317.5
36	7	60	107.535	0.7418	317.4

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ทั้งการเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคา และการเพิ่มความสูงของปล่อง ที่ค่าความเข้มของแสงแดด 800 W/m^2 นี้ ต่างส่งผลให้ได้อัตราการไหลโดยมวลที่ไหลผ่านอาคารมากขึ้นเช่นเดียวกัน และการเพิ่มค่าความเข้มของแสงแดดยังส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยภายในปล่อง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในปล่องและอัตราการไหลมีค่ามากขึ้น

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในปล่อง พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมเอียงของหลังคามากขึ้น และที่มุมเอียงของหลังคา 30° ขึ้นไปจะเห็นว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิมิเพียงเล็กน้อย ยกเว้นค่าที่มุมเอียงเป็น 15° เท่านั้นที่พบว่าการกระโดดของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในปล่องขึ้นไปค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับที่ค่ามุมอื่น ๆ

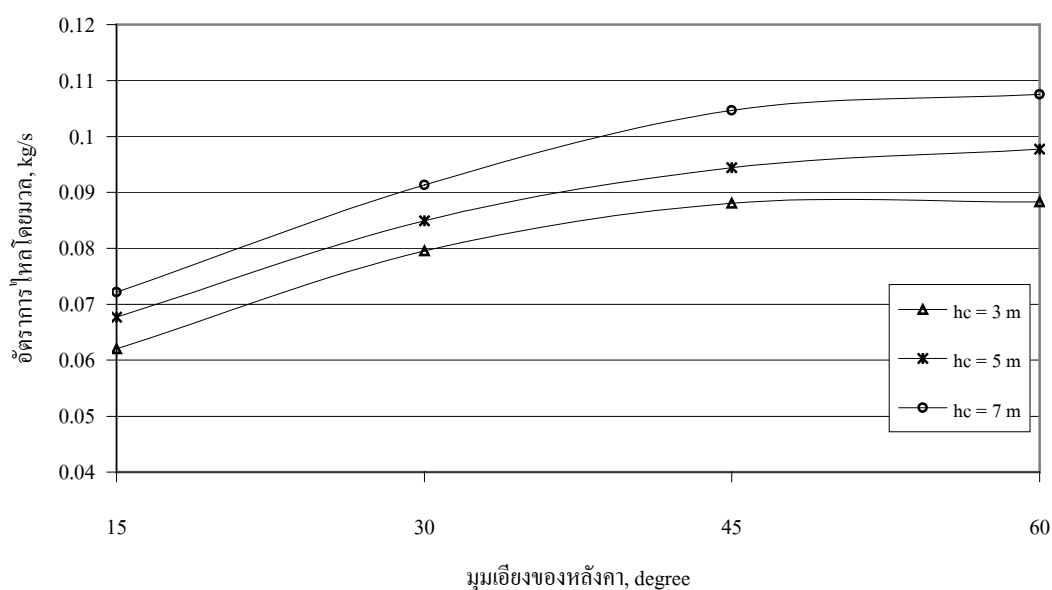
ที่ค่าความสูงของปล่อง 3 m เมื่อมุมเอียงของหลังคาเพิ่มจาก 15° เป็น 30° พบว่าสามารถทำให้ได้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิม 28.3% หากเพิ่มมุมเอียงของหลังคาเป็น 3 เท่า (เท่ากับ 45°) และ 4 เท่า (เท่ากับ 60°) แล้วจะได้ว่า สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 42.0% และ 42.3% ตามลำดับ จะเห็นว่า อัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาที่ค่าความเข้มของแสงแดดมากกว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าความเข้มของแสงแดด 550 W/m^2 (ซึ่งเท่ากับ 25.8%, 39.0% และ 41.0% ตามลำดับ)

ที่ค่าความสูงของปล่อง 5 m พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเป็น 25.5%, 39.4% และ 44.4% เมื่อเพิ่มค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 2 เท่า, 3 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความสูงปล่องเป็น 7 m พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 26.5%, 45.1% และ 49.0% ตามลำดับ

ที่มุมเอียงของหลังคา 15° เมื่อเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 5 m พบว่า อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น 9.2% และที่ค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 30° , 45° และ 60° พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 6.8%, 7.2% และ 10.8% ตามลำดับ และหากเพิ่มความสูงของปล่องจาก 3 m เป็น 7 m

พบว่า อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 16.3%, 14.8%, 18.9% และ 21.8% ที่มุมเอียงของหลังคา 15°, 30°, 45°, 60° ตามลำดับ

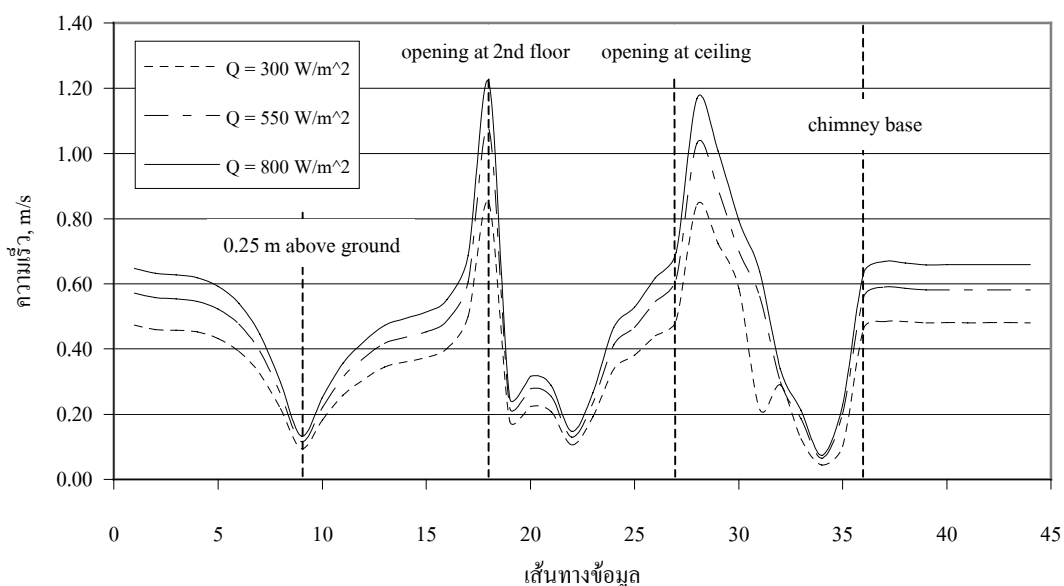
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศสำหรับ 12 กรณีที่ค่าความเข้มของแสงแดด 800 W/m² นี้ แสดงดังรูปที่ 4.129 โดยกำหนดให้ความสูงของปล่องเป็นตัวแปรรองเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องที่มีต่อค่าอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.128 อัตราการไหลโดยมวลของอากาศกรณี 25 – 36

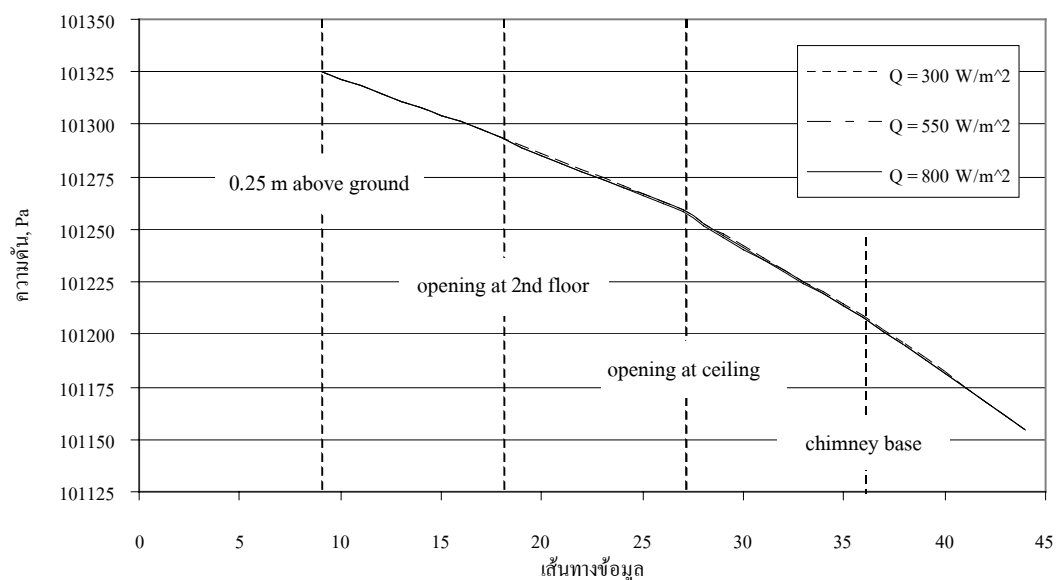
4.2.4 เปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงแดด

จากการจำลองในแต่ละค่าความเข้มของแสงแดด แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มของแสงแดดมากขึ้น อัตราการไหลของอากาศที่ได้ก็จะสูงขึ้นด้วย นำค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมาพล็อตเทียบกับเส้นทางข้อมูล โดยมีความเข้มของแสงแดดเป็นตัวแปรรองดังแสดงในรูปที่ 4.129–4.132

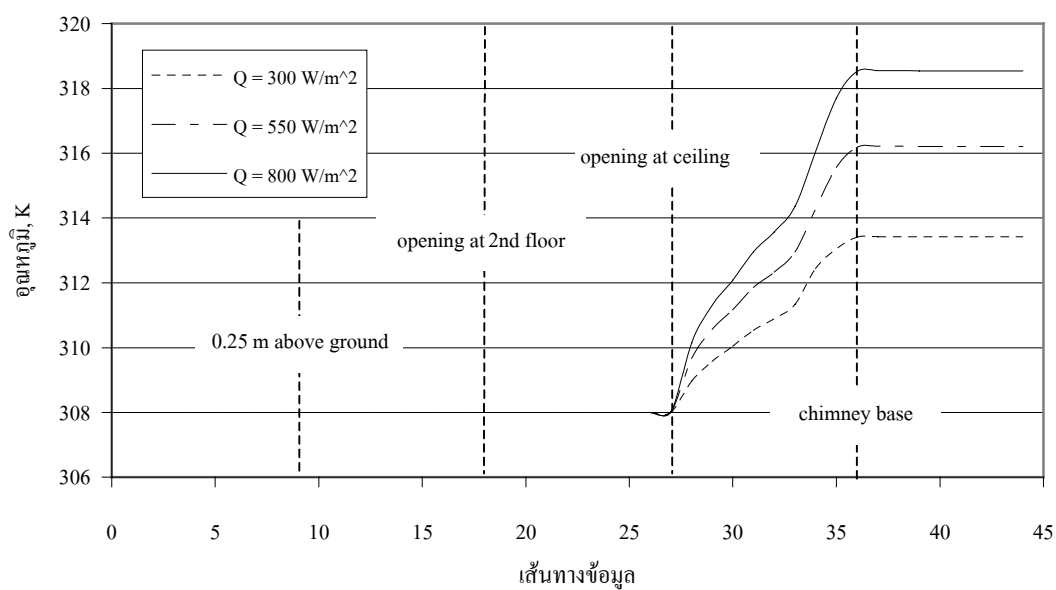


รูปที่ 4.129 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ

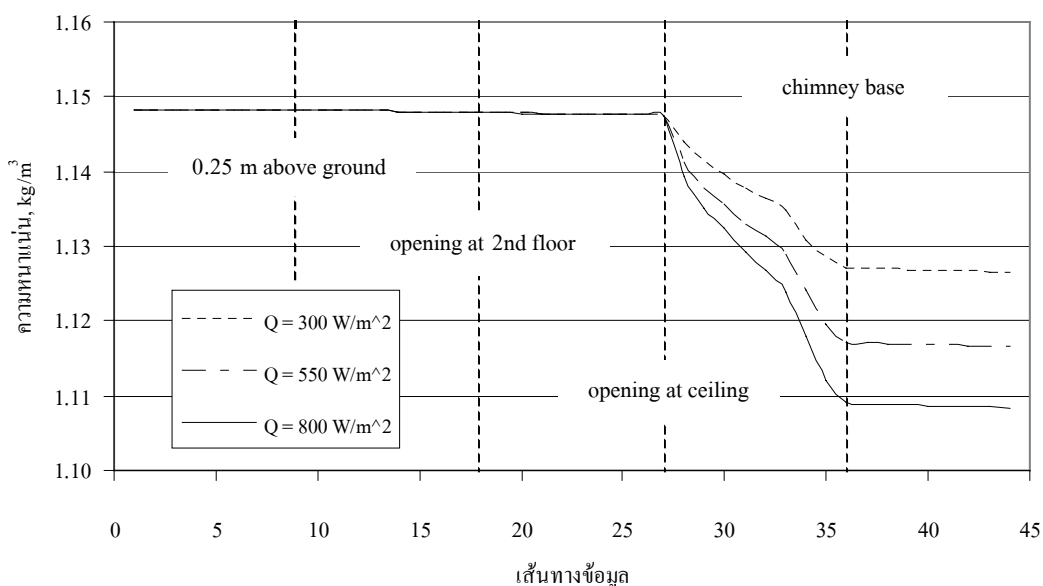
พิจารณารูปที่ 4.129 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อความเข้มของแสงแดดมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วในการไหลของอากาศสูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟที่แยกตัวห่างจากกันอย่างชัดเจน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นมูลเหตุในการเพิ่มขึ้นของปริมาณอัตราการไหลของอากาศ ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความเข้มของแสงแดดมีค่าสูง จึงทำให้อุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นที่น้อยลง ทำให้เกิดผลต่างความหนาแน่นมากขึ้น แรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจึงมากขึ้นด้วย อุณหภูมิของอากาศที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.131 ส่วนรูปที่ 4.132 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น และรูปที่ 4.130 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ



รูปที่ 4.130 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ



รูปที่ 4.131 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ



รูปที่ 4.132 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูลที่ค่าความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ

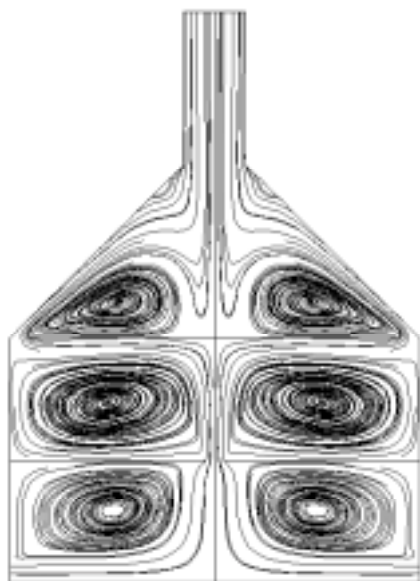
จากผลการวิจัย จึงสามารถสรุปได้ว่า ยิ่งความเข้มของแสงแดดสูงมากเท่าใด ยิ่งส่งผลดีต่อการถ่ายเทอากาศมากเท่านั้น ดังนั้น วันไหนที่อากาศร้อนจัดอันเนื่องมาจากความเข้มของแสงแดดมีค่าสูง อัตราการถ่ายเทอากาศในวันนั้น ๆ ก็จะสูงตามไปด้วย

4.2.5 ผลการจำลองกรณีปล่องกว้าง 1.5 m และ 0.5 m

การจำลองที่ผ่านมามีทั้งหมด 36 กรณีข้างต้น เป็นการจำลองที่ความกว้างของปล่องเป็น 1 m ทั้งสิ้น ดังนั้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของปล่อง จึงเปลี่ยนขนาดความกว้างของปล่องเป็น 1.5 m และ 0.5 m ตามลำดับ โดยเลือกจำลองที่ค่าความสูงของปล่องเป็น 3 m มุมเอียงของหลังคา 45° และความเข้มของแสงแดด 800 W/m^2 เมื่อกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ เกี่ยวกับอาคารนอกเหนือจากที่กล่าวมามีค่าเท่าเดิม

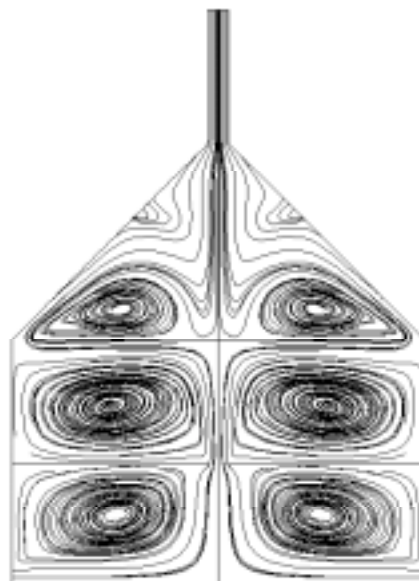
รูปที่ 4.133 – 138 แสดงเส้นการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และการกระจายของอุณหภูมิภายในอาคารสำหรับกรณีที่ 37 และ 38

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 1.5 \text{ m}$$



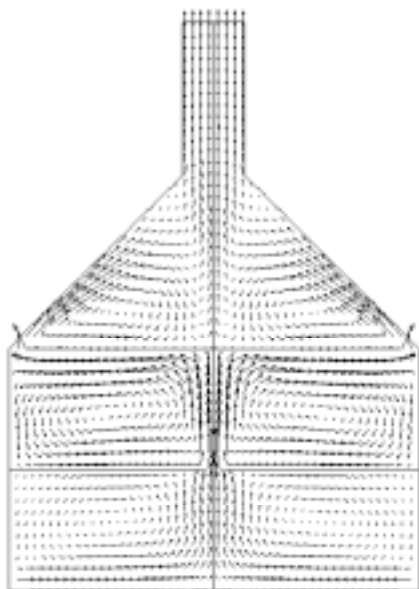
รูปที่ 4.133 เส้นแนวการไหลกรณีที่ 37

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 0.5 \text{ m}$$



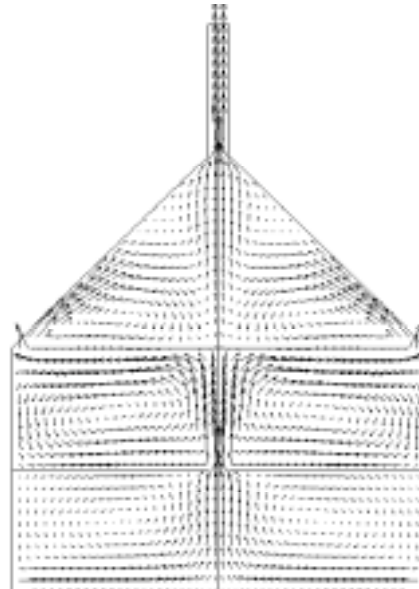
รูปที่ 4.134 เส้นแนวการไหลกรณีที่ 38

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 1.5 \text{ m}$$



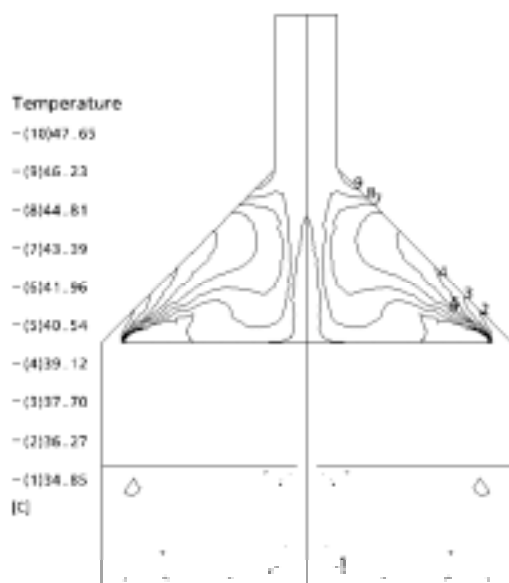
รูปที่ 4.135 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 37

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 0.5 \text{ m}$$



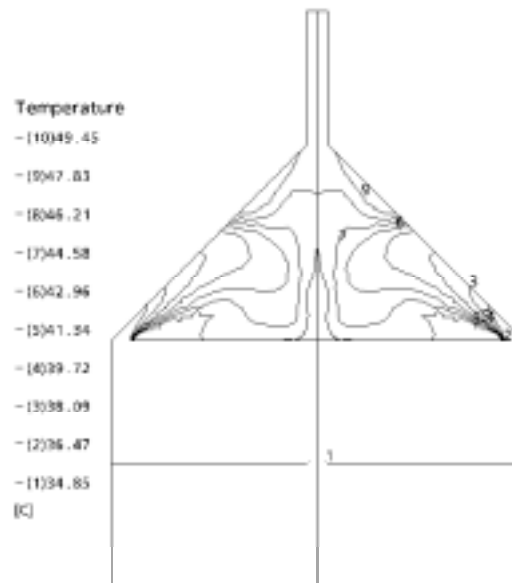
รูปที่ 4.136 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 38

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 1.5 \text{ m}$$



รูปที่ 4.137 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 37

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 3 \text{ m}, \theta = 45^\circ, d_c = 0.5 \text{ m}$$



รูปที่ 4.138 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 38

จากผลการจำลอง นำมาคำนวณค่าอัตราการไหลเมื่อพิจารณาที่ปล่องกว้าง 1.5 m ได้เท่ากับ $89.3354 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ และที่ปล่องกว้าง 0.5 m ได้เท่ากับ $80.0096 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ เปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลจากการจำลองที่ปล่องกว้าง 1.0 m ซึ่งมีค่าเท่ากับ $88.0707 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มความกว้างของปล่องขึ้น 1.5 เท่า อัตราการไหลที่ได้เพิ่มเพียงเล็กน้อย คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นได้เท่ากับ 1.4% เท่านั้น และเมื่อลดความกว้างของปล่องลงครึ่งหนึ่งจาก 1.0 m เหลือเพียง 0.5 m พบว่า อัตราการไหลที่ได้มีค่าลดลง 9.2% ของอัตราการไหลที่ค่าความกว้างปล่อง 1.0 m ทั้งที่ความจริงแล้ว การลดความกว้างของปล่องลงส่งผลให้ความเร็วในการไหลของอากาศภายในปล่องสูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยจะเห็นว่าค่าความเร็วเฉลี่ยภายในปล่องมีค่าสูงถึง 0.9974 m/s

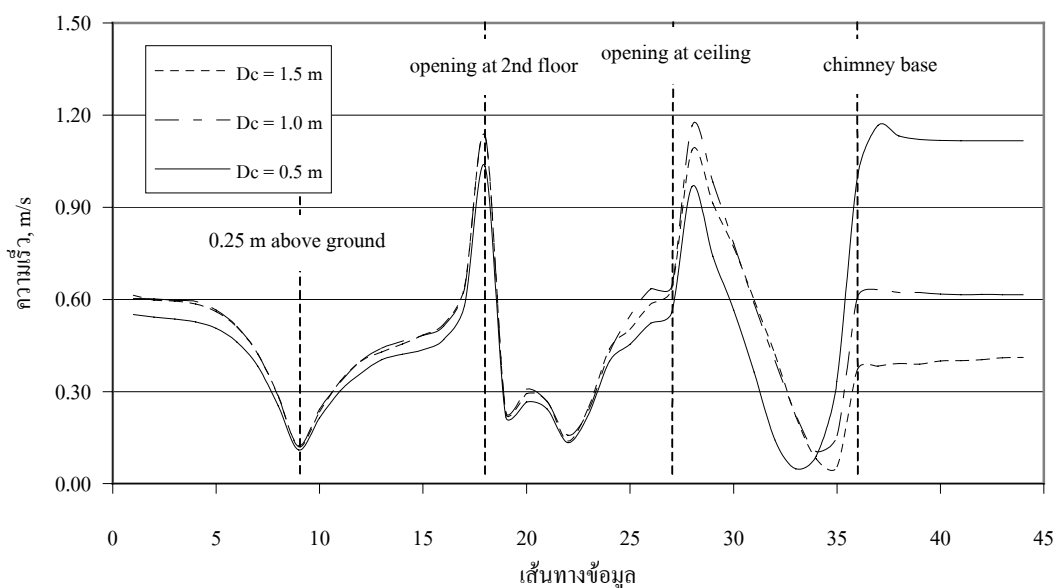
หากพิจารณาผลลัพธ์ที่ความกว้างของปล่อง 1.5 m พบว่า ความเร็วเฉลี่ยภายในปล่องมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าที่ 1.0 m แต่ก็ยังพบว่า อัตราการไหลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อุณหภูมิเฉลี่ยภายในปล่องสำหรับกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 319.1 K ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ 1.0 m (เท่ากับ 319.3 K)

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองที่ความกว้างของปล่องทั้ง 3 ค่า เพื่อสามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้ง่ายยิ่งขึ้น

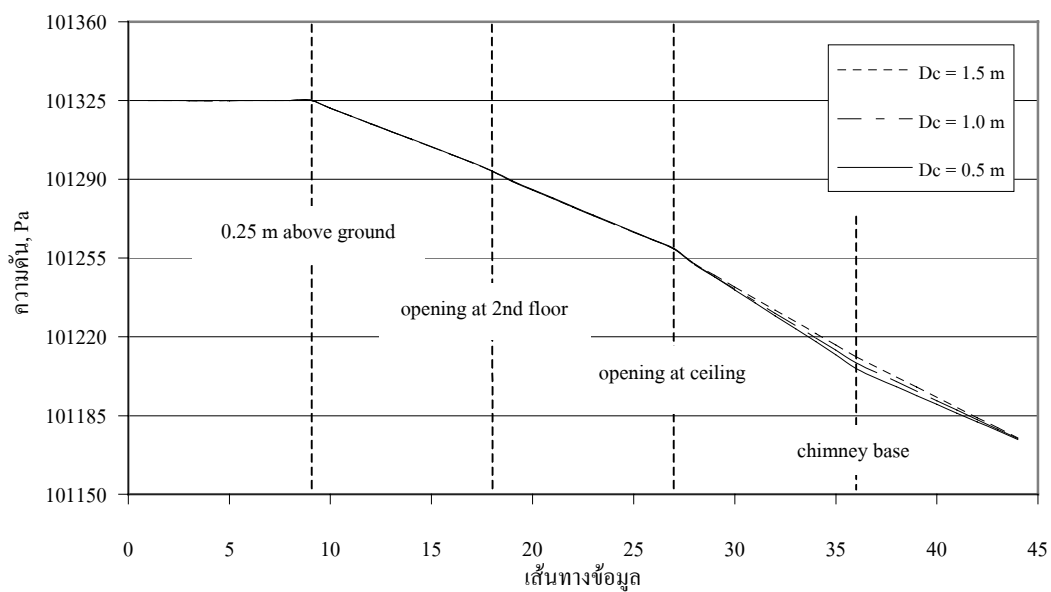
ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 37, 38 และ 27

กรณีที่	d_c (m)	θ ($^{\circ}$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
37	1.5	45	89.3354	0.4163	319.1
27	1.0	45	88.0707	0.6149	319.3
38	0.5	45	80.0096	0.4728	320.5

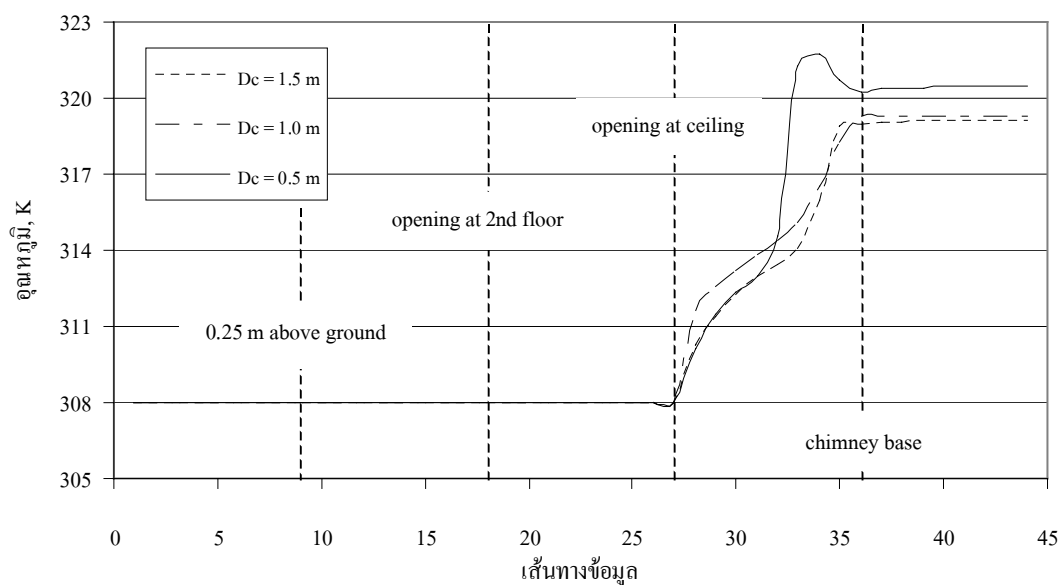
รูปที่ 4.139 – 4.142 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น ตามเส้นทางข้อมูลเปรียบเทียบที่ค่าความกว้างของปล่องต่าง ๆ กัน 3 ค่า คือ 1.5 m, 1.0 m และ 0.5 m เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และมองเห็นภาพโดยรวมของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากการคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยภายในปล่องเมื่อให้ความกว้างของปล่องลดลงนั้นพบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างมาก แต่หากพิจารณาจากรูปที่ 4.139 จะเห็นได้ชัดว่า การลดขนาดความกว้างของปล่องส่งผลให้ความเร็วที่ทางเข้าของอาคารต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สันนิษฐานว่าเกิดจากพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางออกน้อยลงถึง 4 เท่า ทำให้อัตราการไหลที่ทางออกลดลง บังคับให้อัตราการไหลที่ทางเข้าลดลงด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน ตามกฎของการอนุรักษ์มวล แต่พื้นที่หน้าตัดการไหลและค่าความหนาแน่นที่ทางเข้ายังคงเท่าเดิม ดังนั้น ตัวแปรที่ทำให้อัตราการไหลลดลงคือความเร็วของอากาศนั่นเอง ส่วนการเพิ่มขนาดความกว้างของปล่องนั้นพบว่าความเร็วที่ทางเข้าไม่เปลี่ยนแปลงเท่าใดนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ความกว้าง 1.0 m โดยจะเห็นได้จากเส้นกราฟเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน



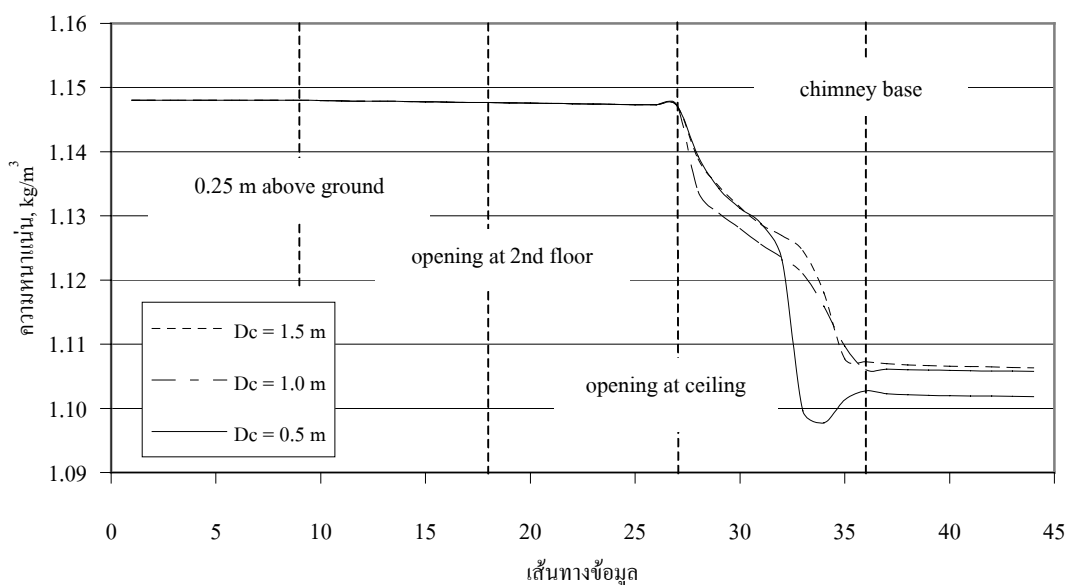
รูปที่ 4.139 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ



รูปที่ 4.140 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ



รูปที่ 4.141 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ



รูปที่ 4.142 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นภูมิตามเส้นทางข้อมูลที่ความกว้างของปล่องต่าง ๆ

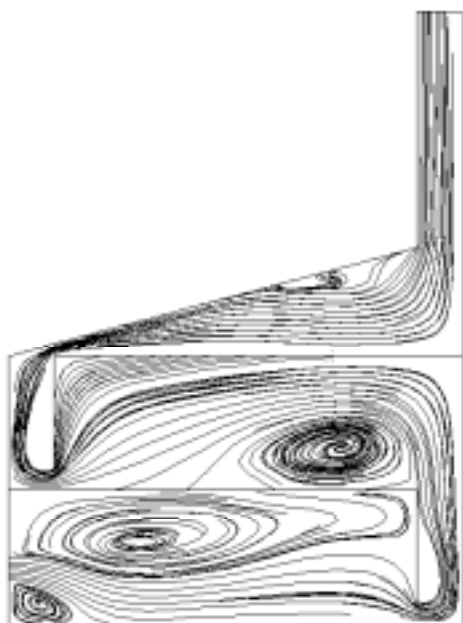
4.2.6 ผลการจำลองกรณีอาคารแบบไม่สมมาตร

จากผลการจำลองกรณีสุดท้าย ซึ่งออกแบบให้ปล่องอยู่บนยอดหลังคาเช่นเดิม แต่หลังคาเอียงเพียงด้านเดียวด้วยมุม 15° จุดเด่นอีกประการหนึ่งในการออกแบบครั้งนี้คือ การออกแบบให้มีช่องทางเดินของอากาศอยู่ในตัวอาคาร เพื่อบังคับทิศทางลมให้อยู่ในแนวอยู่อาศัยของ

คนในบ้าน เส้นการไหลสำหรับกรณีนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.143 การหมุนวนของอากาศที่เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดมี 2 บริเวณ คือ ด้านบนของชั้นที่ 1 และด้านล่างขวาของชั้นที่ 2 โดยที่ชั้นที่ 1 จะมีบริเวณของการเกิดการหมุนวนที่ยาวกว่าในแนวนอน ส่วนรูปที่ 4.144 – 145 เป็นการแสดงเวกเตอร์ความเร็ว และคอนทัวร์อุณหภูมิ สำหรับกรณีนี้ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า อุณหภูมิจากการจำลองครั้งนี้มีค่าค่อนข้างสูง โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าถึง 56.74°C

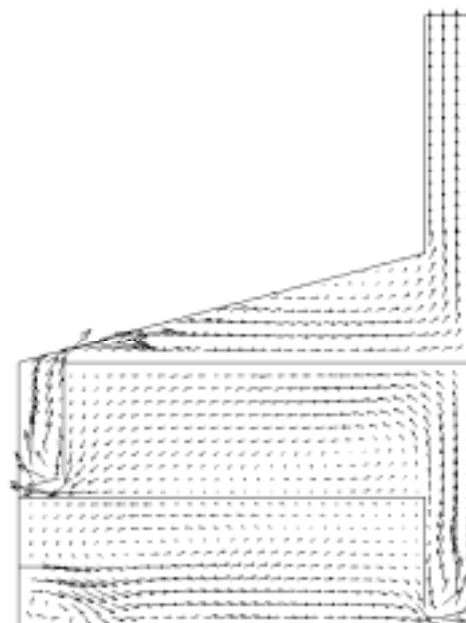
พิจารณาค่าอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณสำหรับกรณีนี้มีค่าเท่ากับ $142.06 \times 10^3 \text{ kg/s}$ ส่วนกรณีอาคารแบบสมมาตรที่เงื่อนไขเดียวกันมีค่า $67.72 \times 10^3 \text{ kg/s}$ แต่ค่านี้คิดเพียงครึ่งเดียวของอาคารเท่านั้น หากคูณด้วยสองจะได้เท่ากับ $135.44 \times 10^3 \text{ kg/s}$ จะเห็นว่า อัตราการไหลโดยมวลในกรณีอาคารแบบไม่สมมาตรมีค่ามากกว่าอาคารแบบสมมาตรไม่มากนัก แต่การออกแบบเช่นนี้ช่วยให้ความเร็วที่ทางเข้าของอาคารสูงขึ้น ทำการรวบรวมค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณจากการจำลองทั้ง 2 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.6

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



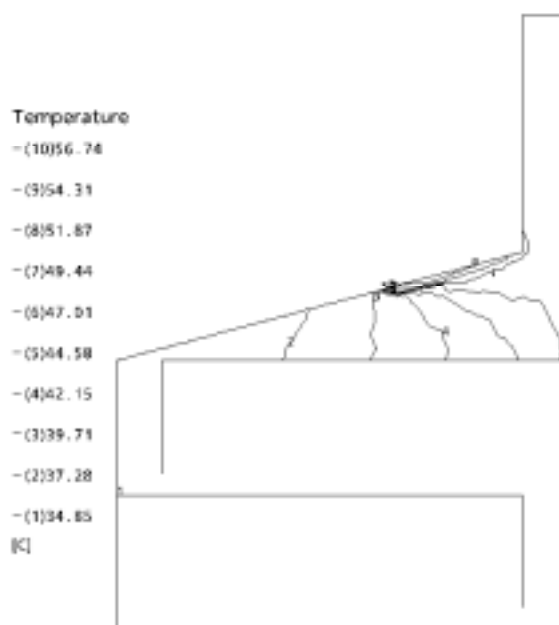
รูปที่ 4.143 เส้นแนวการไหลกรณีที่ 39

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



รูปที่ 4.144 เวกเตอร์ความเร็วกรณีที่ 39

$$Q = 800 \text{ W/m}^2, h_c = 5 \text{ m}, \theta = 15^\circ$$



รูปที่ 4.145 คอนทัวร์อุณหภูมิกรณีที่ 39

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรจากการคำนวณกรณีที่ 39 และ 29

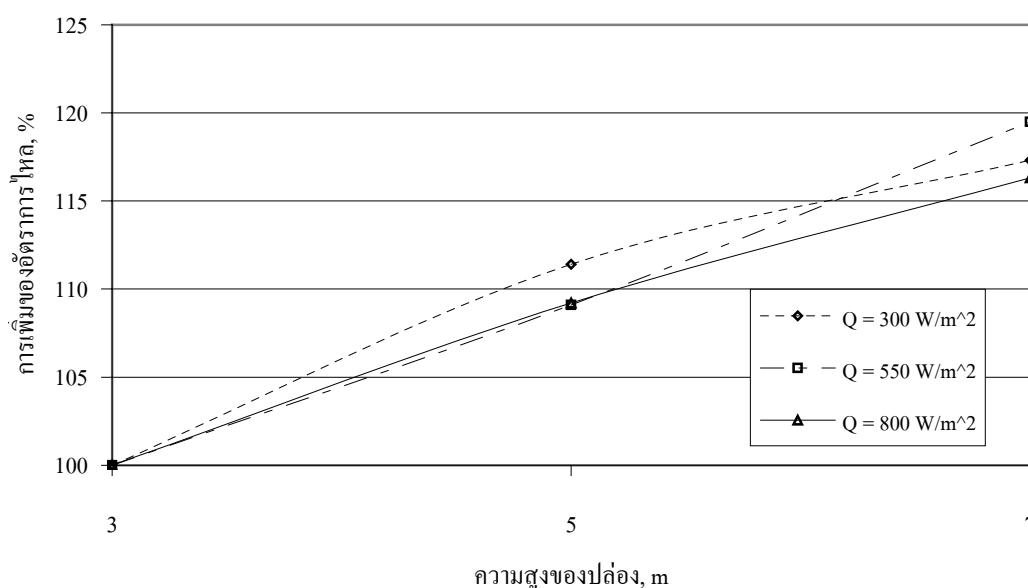
กรณีที่	h_c (m)	θ ($^\circ$)	\dot{m} ($\times 10^{-3}$ kg/s)	\bar{V}_c (m/s)	\bar{T}_c (K)
39	5	15	142.06	0.4960	322.0
29	5	15	135.44	0.4728	322.0

4.3 การอภิปรายผล

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อปริมาณอัตราการถ่ายเทอากาศผ่านอาคารที่ได้ทำการศึกษามีอยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ ความสูงของปล่อง มุมเอียงของหลังคา พื้นที่หน้าตัดการไหลของปล่อง (ในที่นี้เป็น การจำลองใน 2 มิติ การศึกษาผลกระทบจากพื้นที่หน้าตัดการไหลจึงเป็นการเปลี่ยนแปลงความ กว้างของปล่อง) ความเข้มของแสงแดด และความสมมาตร/ไม่สมมาตรของหลังคา โดยปริมาณการ ถ่ายเทอากาศจะพิจารณาได้จากปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้น จึงขอนำสรุปผลกระทบ ของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 ผลกระทบจากความสูงของปล่อง

จากผลการจำลองที่ได้นำเสนอ สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มความสูงของปล่องส่งผลให้อัตราการไหลโดยมวลของอากาศสูงขึ้น โดยพบว่าปล่องที่สูงขึ้นทำให้ความเร็วในการไหลของอากาศภายในปล่องมากขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการไหลโดยมวลเพิ่มขึ้นดังกล่าว เมื่อคิดร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับอัตราการไหลในกรณีปล่องสูง 3 m โดยกำหนดให้อัตราการไหลที่ปล่องสูง 3 m เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และนำค่าร้อยละการเพิ่มขึ้นมาพล็อตเพื่อดูผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจากการเพิ่มความสูงของปล่อง จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.146 (จากผลลัพธ์กรณีมุมเอียงของหลังคาเป็น 15°) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ความสูงน้อยกว่า ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อให้ความสูงของปล่องมากขึ้นด้วยสัดส่วนเท่า ๆ กัน มีค่าน้อยกว่าเมื่อให้มุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มมุมเอียงของหลังคายอมทำให้มีพื้นที่ของหลังคามากขึ้น สิ่งที่มาคือ ความเสี่ยงเปลืองในการใช้วัสดุที่จะปูหลังคา ดังนั้น ในการตัดสินใจเลือกมุมเอียงของหลังคาต้องคำนึงถึงหลักทางเศรษฐศาสตร์ด้วย

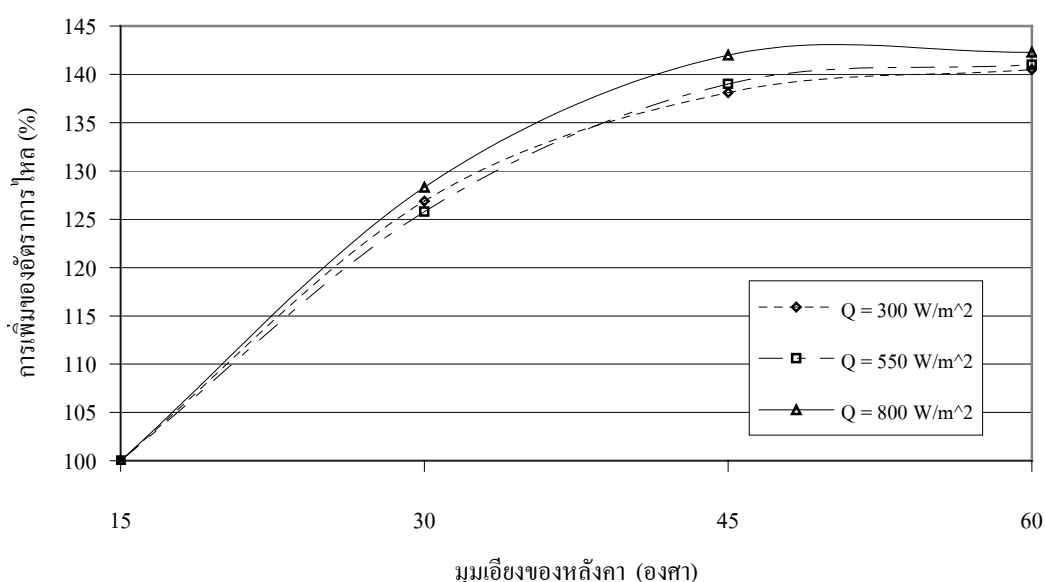


รูปที่ 4.146 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความสูงของปล่อง ($\theta = 15^\circ$)

4.3.2 ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา

การเพิ่มมุมเอียงของหลังคาส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มความสูงของปล่อง โดยพบว่าเมื่อมุมเอียงของหลังคาสูงขึ้นทำให้ความเร็วภายในปล่องมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มมุมเอียงของหลังคาทำให้เกิดพื้นที่มากขึ้น จึงเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุเพื่อ

มุงหลังคามากกว่าในกรณีเพิ่มความสูงของปล่อง การตัดสินใจออกแบบอาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศนั้น ควรมีการวิเคราะห์ถึงราคาวัสดุที่จะนำมาใช้ เพื่อให้เกิดการลงทุนที่ได้ประโยชน์สูงสุด และประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุดด้วย อีกทั้งต้องคำนึงถึงลักษณะทางสถาปัตยกรรมด้วย เพราะปล่องที่สูงมากอาจจะดูไม่สวยงาม เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบจากการเพิ่มมุมเอียงของหลังคาต่อปริมาณอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ จึงทำการพล็อตกราฟแสดงร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล โดยคิดอ้างอิงกับค่าอัตราการไหลกรณีหลังคาเอียง 15° ดังแสดงในรูปที่ 4.147 (ผลลัพท์ที่กรณีปล่องสูง 3 m) ซึ่งจะเห็นว่า อัตราการไหลมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มมุมเอียงของหลังคาจาก 45° เป็น 60° อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมาก โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากเส้นกราฟ ซึ่งไม่คุ้มกับพื้นที่ของหลังคาที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปจากผลลัพท์ของงานวิจัยนี้ได้ว่า มุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 30° ถึง 45°

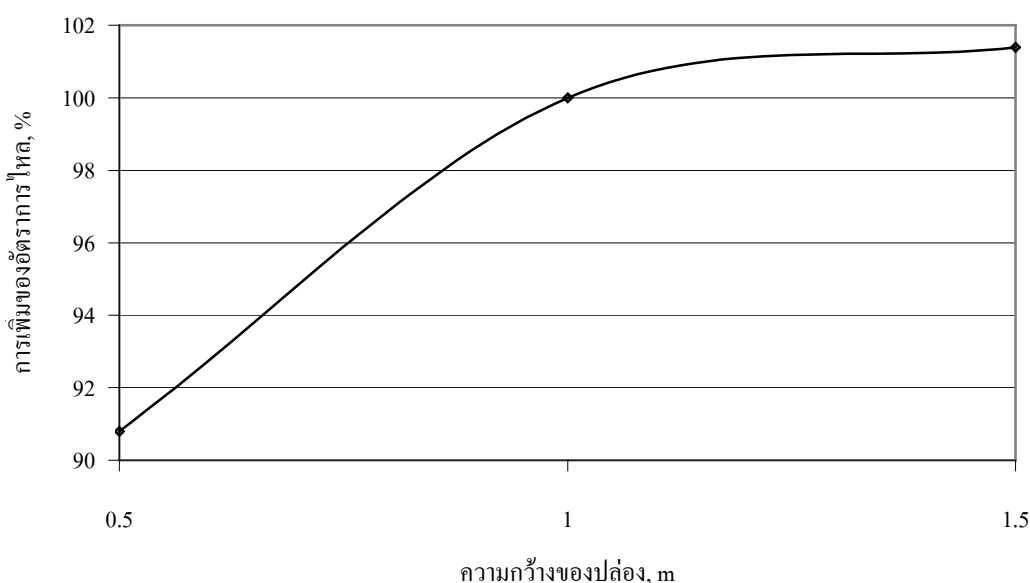


รูปที่ 4.147 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล โดยมวลเทียบมุมเอียงของหลังคา ($h_f = 3$ m)

4.3.3 ผลกระทบจากความกว้างของปล่อง

คิดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของปล่อง โดยอ้างอิงกับผลลัพท์ที่ได้จากปล่องกว้าง 1.0 m จากผลการจำลอง สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความกว้างของปล่องมากขึ้นทำให้ปริมาณอัตราการไหลสูงขึ้น แต่ปริมาณการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความกว้างนั้นมีค่าน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากผลการจำลองที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4 ซึ่งคำนวณได้ว่า เมื่อเพิ่มความกว้างของปล่องจาก 1.0 m เป็น 1.5 m (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า) สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้เพียง

ประมาณ 1.4% เท่านั้น ส่วนการลดความกว้างของปล่องลงจาก 1.0 m เป็น 0.5 m ส่งผลให้ความเร็วในปล่องสูงขึ้นอย่างมากก็จริง แต่อัตราการไหลมีค่าลดลงถึง 9.2% ดังแสดงในรูปที่ 4.148 (ปล่องสูง 3 m หลังคาเอียง 45°) ดังนั้น การออกแบบขนาดของปล่องจึงควรกระทำด้วยความระมัดระวัง และควรมีการศึกษาด้วยกรรมวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อให้ได้ค่าความกว้างของปล่องที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปเกิดการถ่ายเทโดยธรรมชาติที่เหมาะสมทั้งในแง่ของปริมาณการถ่ายเท และความคุ้มทุนโดยมีการพิจารณาเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วยเสมอ

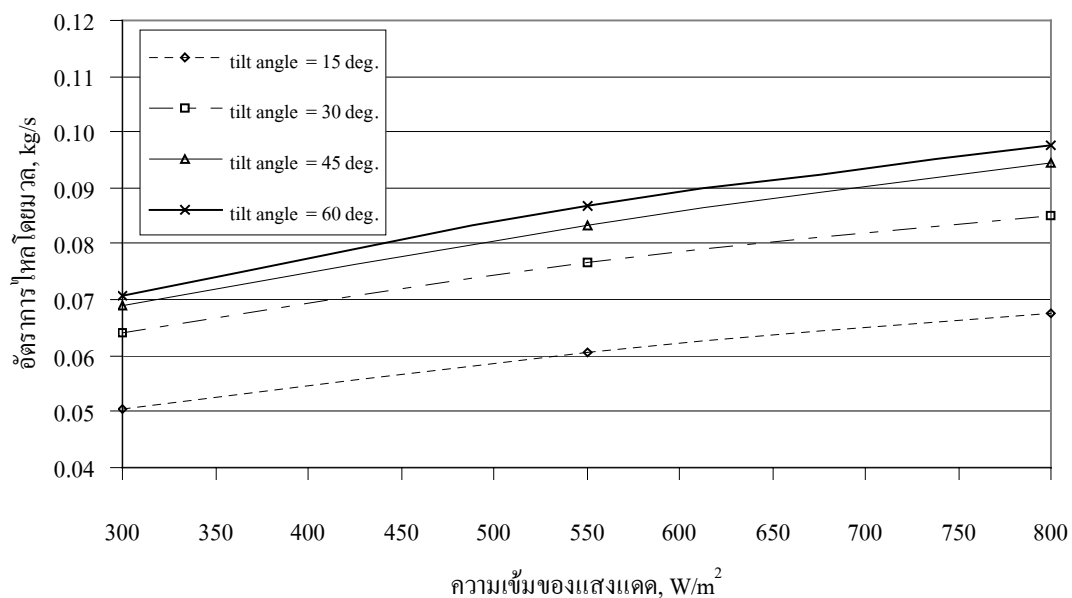


รูปที่ 4.148 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความกว้างของปล่อง

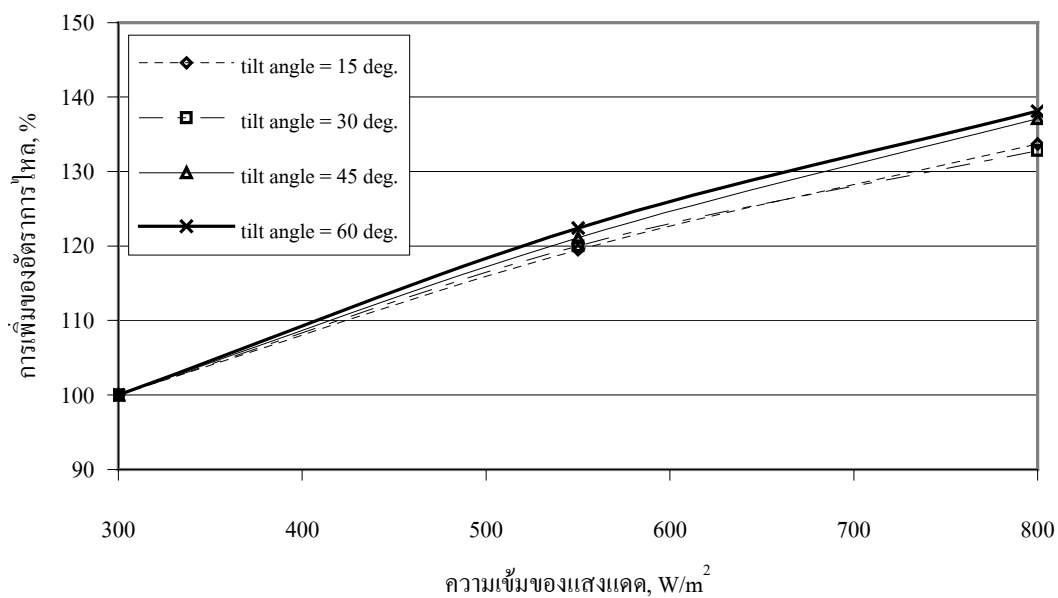
4.3.4 ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด

จากผลการจำลอง สรุปได้ว่า ความเข้มของแสงแดดยิ่งสูงยิ่งส่งผลดีต่อการถ่ายเทอากาศ รูปที่ 4.149 แสดงค่าอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดดที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ โดยพบว่า กรณีปล่องสูง 5 m มุมเอียงของหลังคาเป็น 15° หากเพิ่มความเข้มของแสงแดดจาก 300 W/m² เป็น 550 W/m² (เพิ่มขึ้นประมาณ 83.3%) อัตราการไหลโดยมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น 19.5% และหากเพิ่มจาก 300 W/m² เป็น 800 W/m² (เพิ่มขึ้นประมาณ 166.7%) อัตราการไหลเพิ่มขึ้น 33.7% รูปที่ 4.150 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลคิดเป็นร้อยละของค่าอัตราการไหลกรณีความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m² โดยในที่นี้เป็นผลลัพธ์จากการจำลองที่ความสูงของปล่อง 5 m ที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ และหากพล็อตร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดย

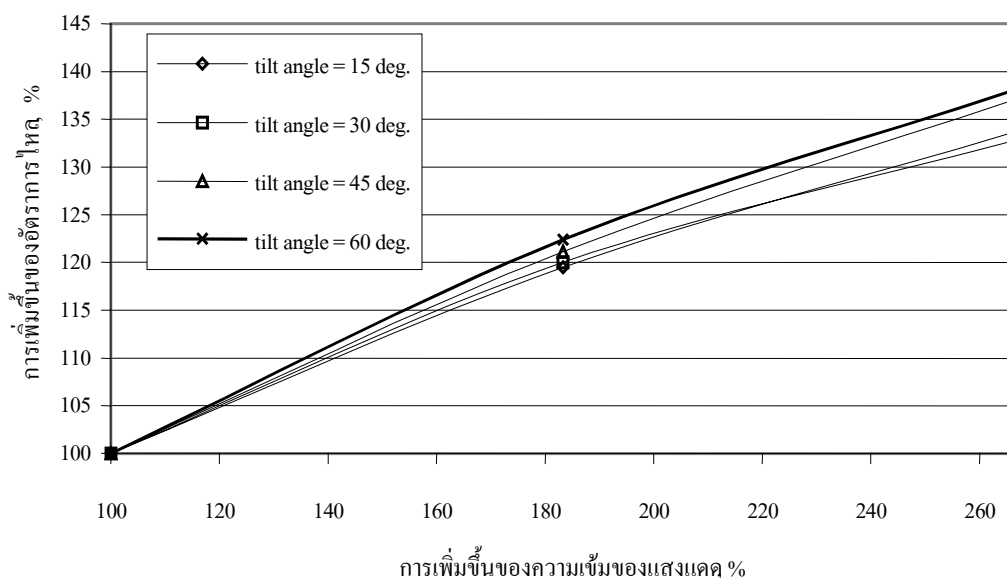
มวลดเทียบกับร้อยละการเพิ่มขึ้นของความเข้มของแสงแดด เมื่อให้กรณีความเข้มของแสงแดด 300 W/m^2 เป็นกรณีอ้างอิง จะได้ดังรูปที่ 4.151



รูปที่ 4.149 อัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด



รูปที่ 4.150 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด



รูปที่ 4.151 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับร้อยละการเพิ่มขึ้นของความเข้มของแสงแดด

ผลลัพธ์เช่นนี้ ส่งผลดีอย่างมากต่อประเทศเมืองร้อน เพราะที่ความเข้มของแสงแดดสูง ๆ สามารถเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศได้มากกว่าที่ความเข้มของแสงแดดต่ำ ๆ ดังนั้น อากาศยิ่งร้อน การถ่ายเทยิ่งเกิดขึ้นได้มาก

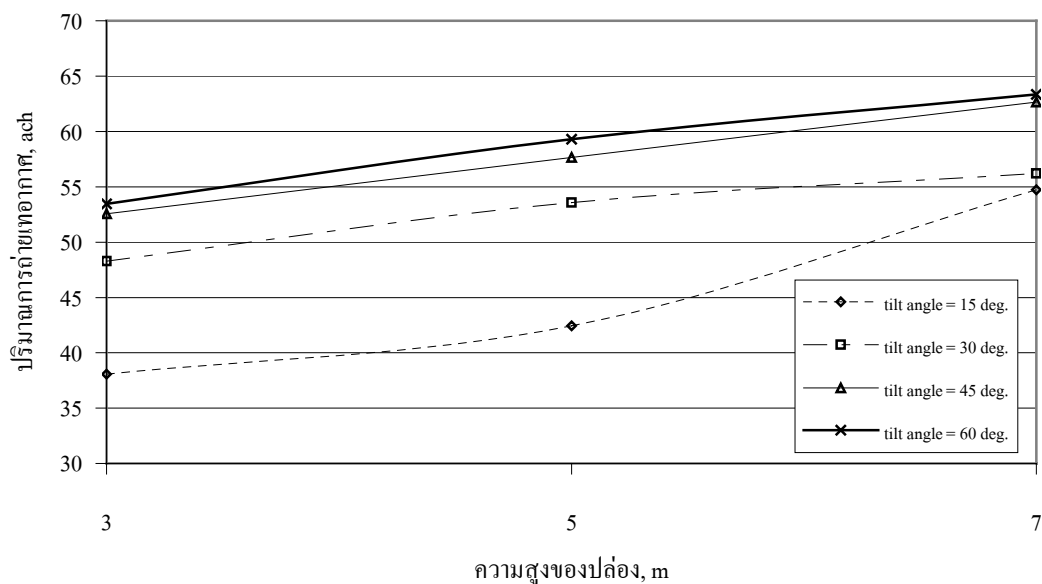
4.3.5 ผลกระทบจากอาคารแบบสมมาตรกับไม่สมมาตร

จากผลการจำลอง สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบอาคารแบบไม่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.2 นั้น ช่วยให้อากาศไหลเข้าสู่อาคารได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อผู้พักอาศัยที่อยู่บริเวณชั้นที่ 1 แต่ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศมากนัก โดยอัตราการไหลเพิ่มขึ้นคิดเป็นประมาณ 4.9% ของปริมาณอัตราการไหลแบบสมมาตร

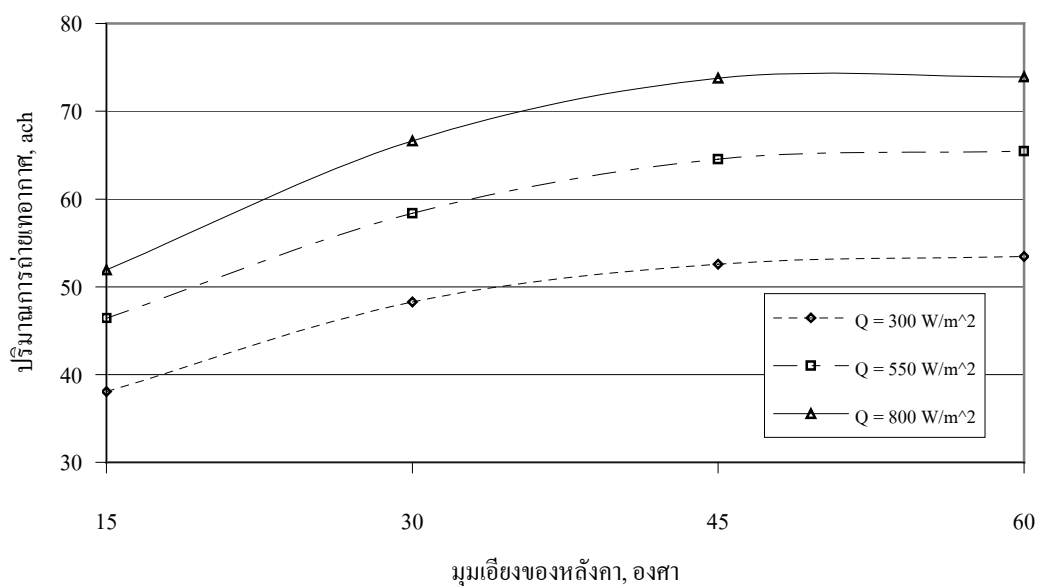
4.3.6 ผลกระทบจากตัวแปรต่อปริมาณการถ่ายเทอากาศ

ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2 ว่า ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศ (air exchange per hour, ach) คือปริมาณการถ่ายเทอากาศคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง และมีหน่วยเป็น ach ในที่นี้จะแสดงค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศโดยคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องพักชั้นที่ 1 ของอาคารเมื่อให้ตัวแปรต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพบว่า ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศของกรณีที่ดีที่สุด ($h_c = 3 \text{ m}$, $\theta = 15^\circ$, $Q = 300 \text{ W/m}^2$) มีค่าประมาณ 38 ach และกรณีที่ดีที่สุด ($h_c = 7 \text{ m}$, $\theta = 60^\circ$, $Q = 800 \text{ W/m}^2$) มีค่าถึง 90 ach ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความสบายต่อผู้

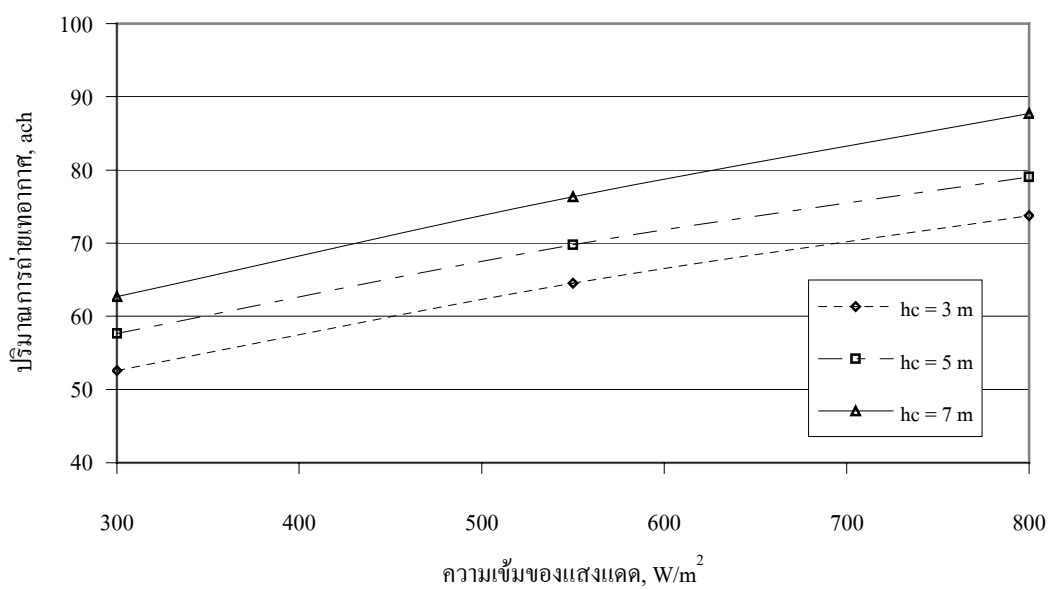
อยู่อาศัย จากรูปทั้งสาม จะเห็นว่า ความสูงของปล่อง มุมเอียงของหลังคา และความเข้มของแสงแดด ต่างเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศ



รูปที่ 4.152 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความสูงของปล่อง ($Q = 300 \text{ W/m}^2$)



รูปที่ 4.153 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคา ($h_c = 3 \text{ m}$)



รูปที่ 4.154 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความเข้มของแสงแดด ($\theta = 45^\circ$)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดจากการจำลองปัญหาการไหลแบบการพาอิสระภายในอาคารผ่านห้องหลังคาเรียบด้วยโปรแกรม **CFX-5** สามารถสรุปผลและประมวลข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยเพื่อขยายผลต่อไป ดังนี้

5.1 สรุปผล

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านอาคารด้วยการไหลแบบการพาโดยอิสระ สามารถสรุปได้ว่า

- 5.1.1 การเพิ่มมุมเอียงของหลังคา ความสูงและความกว้างของปล่อง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทอากาศตามธรรมชาติสูงขึ้น
- 5.1.2 มุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง $30^{\circ} - 45^{\circ}$
- 5.1.3 ที่ค่าความเข้มของแสงแดดสูง ๆ สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศได้มากกว่า
- 5.1.4 ข้อดีของอาคารแบบไม่สมมาตรคือทำให้ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าสูงขึ้น แต่ค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 5%)
- 5.1.5 ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศสูงพอที่จะสร้างความรู้สึกสบายให้กับผู้พักอาศัยได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ขยายขอบเขตของการศึกษาด้วยกรรมวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณใน 3 มิติ เพื่อให้ได้พฤติกรรมการไหลที่สมจริงยิ่งขึ้น
- 5.2.2 ควรทำการจำลองพฤติกรรมการไหลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เช่น มีการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของปล่อง
- 5.2.3 ควรศึกษาผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทอากาศอันเนื่องมาจากขนาดของช่องเปิด ณ บริเวณต่าง ๆ ของอาคาร
- 5.2.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมว่าค่ามุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องเท่าใดที่เหมาะสมที่สุด (**Optimum values**) ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยคำนึงถึงเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย

5.2.5 ควรสร้างอาคารและทำการทดลองวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม **CFX-5** นี้

5.2.6 ในการออกแบบควรคำนึงถึงเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเสมอ เพราะการเพิ่มมุมเอียงของหลังคา หรือความสูงปล่อง ต่างทำให้เพิ่มพื้นที่ และปริมาณวัสดุที่ใช้ ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- เกชา ชีระโกเมน. (2000). ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมปรับอากาศ [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thailvac.com/knowledge/fundamental/fundamental.html>.
- Aforso, C., and Olivera, A. (2000). Solar Chimneys: simulation and experiment. **Energy and Buildings** 32(1): 71-79.
- Andersen, K.T. (1995). Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy. **ASHRAE Transactions** 101(2): 1103-1117.
- Awbi, H.B. (1996). Air movement in naturally-ventilated buildings. **WREC**: 241-247.
- Bender, R., and Stowell, R.R. Chimneys: A natural ventilation alternative for two story bars (On-line): <http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0115.html>.
- Cengel, Y.A. (1998). **Heat transfer: A practical approach** (International ed.). McGraw-Hill.
- Chen, Z.D., Li Y., and Mahoney, J. (2000). Experimental modeling of buoyancy-driven flows in buildings using a fine-bubble technique. **Building and Environment** 36(4): 447-455.
- Chen, Z.D., and Li, Y. (2002). Buoyancy-driven displacement natural ventilation in a single-zone building with three-level openings. **Building and Environment** 37(3): 295-303.
- Chitsomboon, T. (2001). A Validated Analytical Model for Flow in Solar Chimney. **International Journal of Renewable Energy Engineering** 3(2): 339-346.
- Chitsomboon, T., and Tongbai, P. (1998). A Mathematical Model of Solar Chimney for Electrical Energy Production. **Proceedings of the 12th National Mechanical Engineering Conference** (pp 14-20). Chulalongkorn University, Thailand.
- Chitsomboon, T., and Tongbai, P. (1999). The Effect of Chimney-Top Convergence on Efficiency of a Solar Chimney. **Proceedings of the 13th National Mechanical Engineering Conference** (pp 263-268). Pataya, Thailand.
- Chitsomboon, T., and Unthamesra, S. (1999). MOYA: A computer Program for Flow Analysis. **Proceedings of the 13th National Mechanical Engineering Conference** (pp 124-131). Pataya, Thailand.

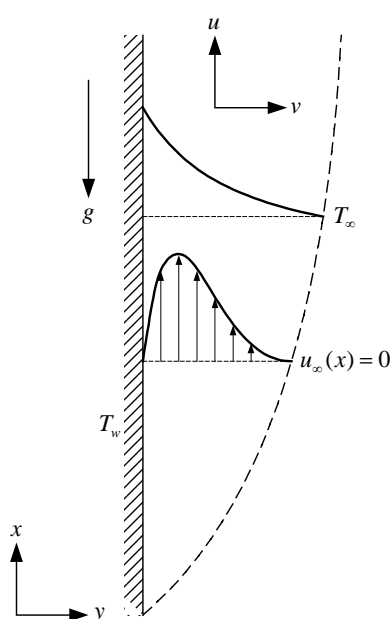
- Haves, P. **Preliminary assessment of natural ventilation design options** [On-line]. Available: <http://www.caed.asu.edu/msenergy/Neeraj/Haves.pdf>.
- Hirunlabh, J., Kongduang W., Namprakai, P., and Khedary, J. (1999). Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. **Renewable Energy** 18(1): 109-119.
- Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong N., and Khedary, J. (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. **Building and Environment** 36(3): 383-391.
- Jani, K.A., and Jacobson, L.D. (1995). **Natural ventilation for poultry** [On-line]. Available: <http://www.bae.umn.edu/extens/arc/ratvent.pdf>.
- Kays, W.M and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer**: (3rd ed) Singapore: McGraw-Hill.
- Khalifa, A.J.N., and Sahib, W.K. (2002). Turbulent buoyancy driven convection on partially divided enclosures. **Energy Conversion and Management** 43(16): 2115-2121.
- Khedary, J., Hirunlabh, J., and Bunnag T. (1997). Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses. **Energy and Buildings** 26(2): 159-164.
- Khedary, J., Mansirisub, W., Chaima, S., Pratinthong N., and Hirunlabh, J. (2000). Field measurements of performance of roof solar collector. **Energy and Buildings** 31(3): 171-178.
- Khedary, J., Suttisonk, B., Pratinthong N., and Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. **Cement & Concrete Composites** 23(1): 65-70.
- Khedary, J., Ingkawanich, S., Waewsak, J., and Hirunlabh, J. (2002). A PV system enhanced the performance of roof solar collector. **Building and Environment** 37(12): 1317-1320.
- Khedary, J., Yimsamerjit, P., and Hirunlabh, J. (2002). Experimental investigation of free convection in roof solar collector. **Building and Environment** 37(5): 455-459.
- Khedary, J., Rawankul, R., Chimchavee, W., Hirunlabh, J., and Watanasungsuit, A. (2002). Feasibility study of using agriculture waste as desiccant for air conditioning system. **Renewable Energy** 28(10): 1617-1628.

- Li, Y. (2000). Buoyancy-driven natural ventilation in a thermally stratified one-zone building. **Building and Environment** 35(3): 207-214
- Li, Y., and Delsante, A. (2001). Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. **Building and Environment** 36(1): 59-71.
- Linden, P.F., Lane, G.F. and Smeed, D.A. (1990). Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. **J Fluid Mech** 212: 309-335.
- Lomas, K.J. Eppel, H., Cook, M., and Mardaljevic, J. **Ventilation and thermal performance of design options for stadium Australia** [On-line]. Available: <http://www.ibpsa.org/proceedings/bs97/papers/P160>. PDF.
- Mavriplis, D.J. (1994). A Three Dimensional Multigrid Reynolds-Averaged Navier-Stokes Solver for Unstructured Meshes. **AIAA Paper**: 94-1878
- NASA's Observatorium (2001). **Wind chill: Wind chill chart** [On-line]. Available: http://observe.arc.nasa.gov/nasa/earth/wind_chill/chill_home.html.
- Venkatakrishnan (1993). Implicit Solvers for Unstructured Meshes. **Journal of Computational** 105: 83-91.

ภาคผนวก ก

ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหลโดยการพาอิมพัลส์ผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

พิจารณาแผ่นร้อนที่วางตัวในแนวตั้งซึ่งมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 500K ความยาวของแผ่นร้อนเท่ากับ 10cm ความหนาทางแกน Z ไม่ถูกนำมาพิจารณาเพราะเป็นการพิจารณาปัญหาใน 2 มิติ แผ่นร้อนถูกแวดล้อมด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 300 K และที่ความดันบรรยากาศ ($1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$) คำตอบที่สนใจจะอยู่ในรูปของการพล็อตด้านข้างของความเร็วและอุณหภูมิ (velocity and temperature profiles) ในบริเวณชั้นซิดผิว (boundary layer) และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของแผ่นร้อน เมื่อการไหลที่พิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)



รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของปัญหา

ความยาวของแผ่นร้อนเท่ากับ 10 cm นั้นสามารถนำไปพิสูจน์ได้ว่าช่วงของการไหลอยู่ในช่วงราบเรียบจริงได้ โดยการคำนวณหาค่าเลขราเลย์ (Rayleigh number) หากการไหลอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ค่าเลขราเลย์จะมีค่าไม่เกิน 1×10^9 หากค่าเลขราเลย์มีค่าเกินกว่าค่านี้ถือว่าการไหลในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งค่าเลขราเลย์นี้เป็นฟังก์ชันของค่าเลขกราสอฟ (Grashof number) และค่าเลขพรันเทิล (Prantl number) ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Ra = Gr \times Pr \quad (\text{ก.1})$$

$$\text{เมื่อ } Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (\text{ก.2})$$

$$\text{และ } Pr = \frac{\rho c}{\mu} \quad (\text{ก.3})$$

จะเห็นว่าค่าเลขพรันเทิลเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของของไหล ซึ่งเป็นค่าคงที่ ณ อุณหภูมิ หนึ่ง ๆ ดังนั้น จึงสามารถหาค่าเลขพรันเทิลนี้ได้จากการเปิดตารางคุณสมบัติได้โดยตรง

จากตารางคุณสมบัติ (Kays and Crawford, 1993) สามารถหาค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 300 K ได้ดังต่อไปนี้

$$\rho = 1.1766 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\mu = 1.853 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$\nu = 1.575 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.02614 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$Pr = 0.711$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} = \frac{1}{300 \text{ K}} = 0.003333 \text{ 1/K}$$

คำนวณหาค่าเลขกราชอฟจากสมการ (ก.2) ที่ความยาวแผ่นร้อนเท่ากับ 10 cm หรือ เท่ากับ 0.1 m ($X=0.1 \text{ m}$) โดยใช้ค่าคุณสมบัติที่ได้จากตาราง จะได้ค่า $Gr = 2.6364 \times 10^7$ ดังนั้น จากสมการ (ก.1) สามารถคำนวณหาค่าเลขราเลย์ได้เท่ากับ 1.8745×10^7 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1×10^9 จึงสามารถสรุปได้ว่าการไหลผ่านแผ่นร้อนในครั้งนี้เป็นกรไหลที่อยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ

กระบวนการการหาผลเฉลยจะใช้กรรมวิธีของ Similarity Method ซึ่งคำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Similarity solution) ดังนี้

$$F'(\eta) = \frac{u}{\sqrt{\beta g(T_w - T_\infty)x}} \quad (\text{ก.4})$$

และ

$$G(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} \quad (\text{ก.5})$$

$$\text{เมื่อ } \eta = \frac{y}{x} Gr_x^{0.25} \quad (\text{ก.6})$$

สมการที่ถูกนำมาวิเคราะห์หาคำตอบเป็นสมการที่ทำการแปลงให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (simultaneous ordinary differential equations) ในรูปของตัวแปรไร้มิติเรียบร้อยแล้ว ดังนี้

$$F''' + \frac{3FF''}{4} - \frac{F'^2}{2} + G = 0 \quad (\text{ก.7})$$

$$G'' + \frac{3}{4} Pr FG' = 0 \quad (\text{ก.8})$$

ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกันกับสมการก่อนที่จะแปลงให้เป็นสมการในรูปตัวแปรไร้มิติ แต่ได้ทำการแปลงให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ในรูปไร้มิติเรียบร้อยแล้ว ดังนี้

$$\text{ที่ } \eta = 0: \quad F' = 0$$

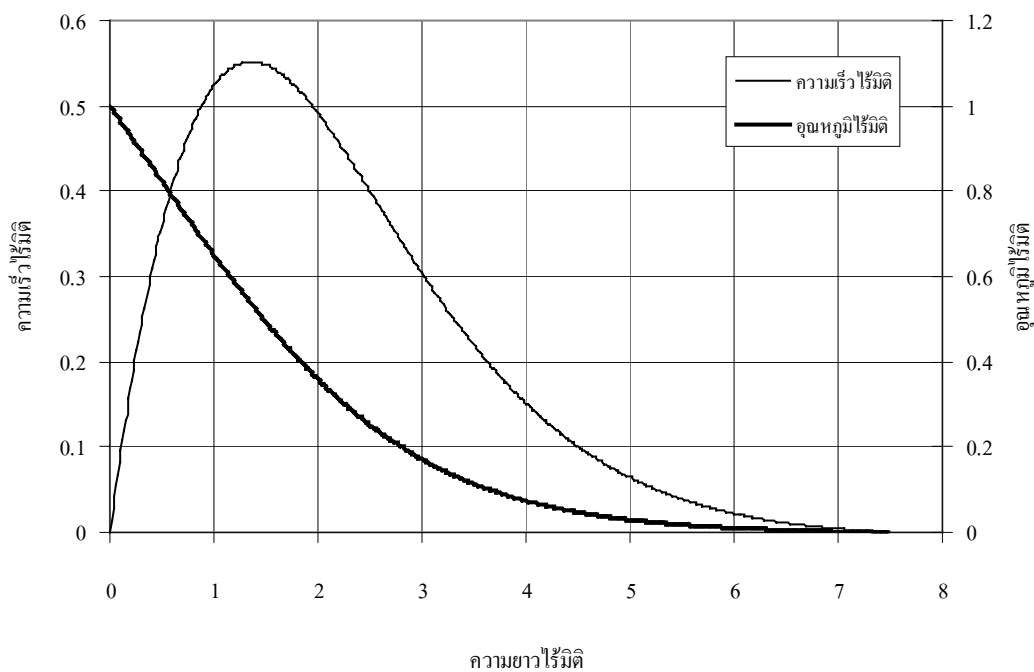
$$\text{ที่ } \eta = 0: \quad F = 0$$

$$\text{ที่ } \eta = 0: \quad G = 1$$

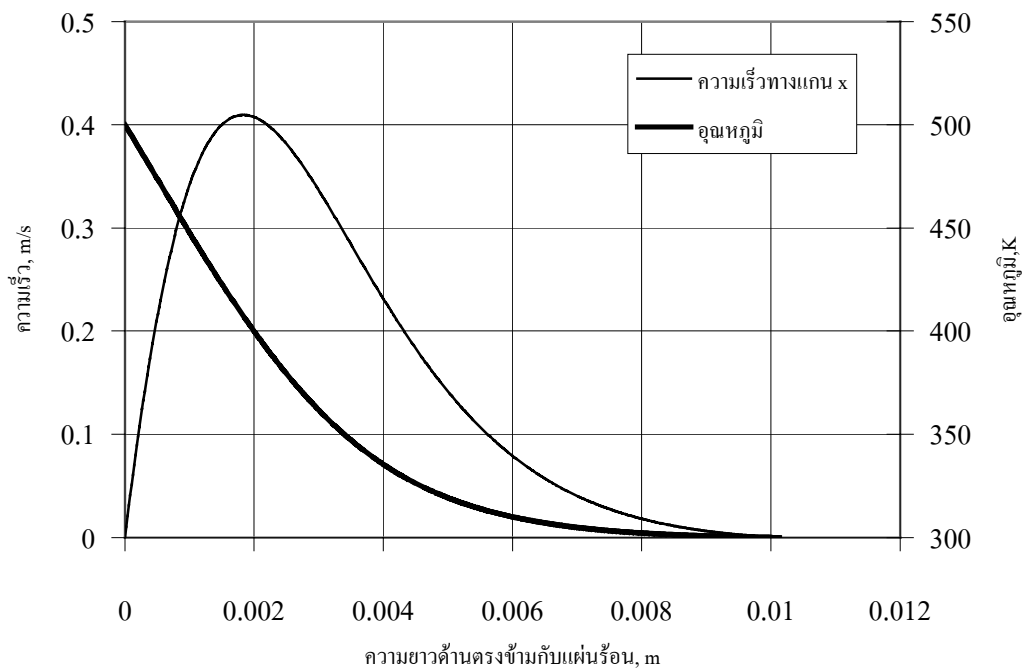
$$\text{หาก } \eta \text{ มีขนาดใหญ่แล้ว } \quad F' \rightarrow 0$$

$$\text{หาก } \eta \text{ มีขนาดใหญ่แล้ว } \quad G \rightarrow 0$$

จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรนง่าย ๆ เพื่อคำนวณสมการ (ก.7) และ (ก.8) ไปพร้อม ๆ กัน เพราะเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกัน คำตอบที่ต้องการจะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ คือ $F'(\eta)$ และ $G(\eta)$ ซึ่งหากต้องการทราบค่าที่มีมิติ ก็สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (ก.4) และ (ก.5) ก็จะได้ค่าความเร็วและอุณหภูมิตามลำดับ



รูปที่ ก.2 รูปด้านข้างตัวแปรไวมิตีของความเร็วและอุณหภูมิ



รูปที่ ก.3 รูปด้านข้างของความเร็วและอุณหภูมิ

ตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง หรือการไหลแบบการพาโดยทั่วไปอย่างหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, h) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{Nu_x}{Gr_x^{0.25}} = -G'(0) \quad (ก.9)$$

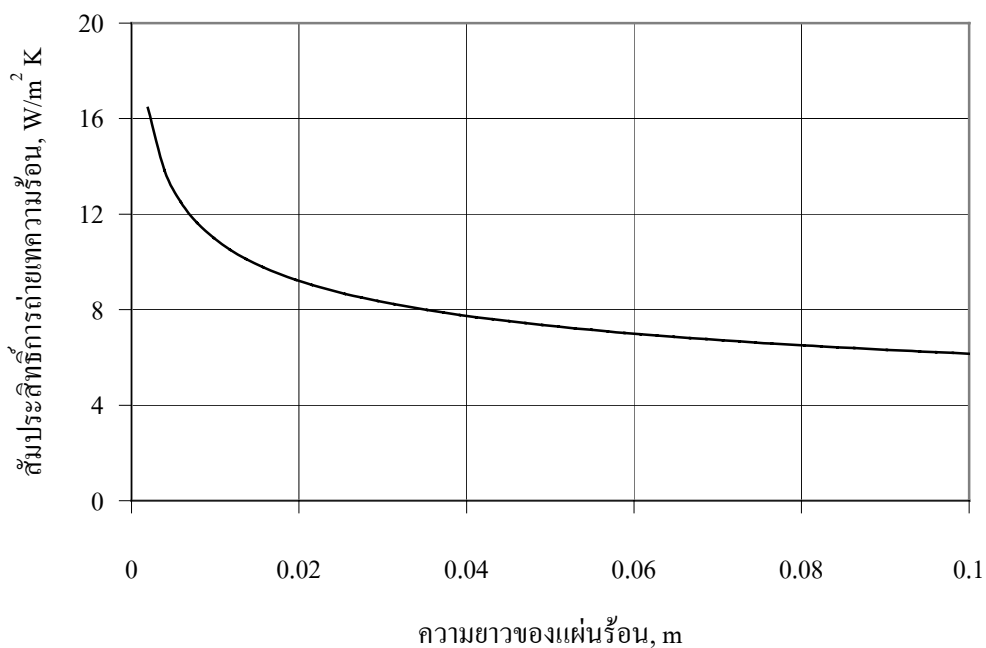
ค่า G' ที่ $\eta = 0$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมฟอร์แทรนที่ใช้ในการหาคำตอบดังกล่าว ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่า Nu_x นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$Nu_x = \frac{xh_x}{k} \quad (ก.10)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Nu_x = \frac{xh_x}{k} = -G'(0) \left[\frac{\beta g (T_w - T_\infty) x^3}{\nu^2} \right]^{0.25} \quad (ก.11)$$

โดยค่าที่อยู่ในวงเล็บสี่เหลี่ยมก็คือค่าของ Gr ดังแสดงไว้ในสมการ (ก.2) นั่นเอง จะเห็นได้จากสมการว่าค่า h_x เป็นฟังก์ชันของ X ซึ่งคือความยาวของแผ่นร้อนกับค่าคุณสมบัติของของไหล หากแทนค่าคุณสมบัติของของไหล ซึ่งในที่นี้คืออากาศที่อุณหภูมิ 300 K และแทนค่าที่ X ณ ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วก็จะทราบค่า h_x ได้ รูปที่ ก.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากสมการ (ก.11) ดังกล่าว



รูปที่ ก.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบกับความยาวของแผ่นร้อน

Code โปรแกรมที่ใช้ในการหาผลเฉลยแม่นยำตรง

```

*****
*****          SIMPLNAT          *****
*****
***** THIS PROGRAM GIVES SIMILARITY SOLUTION RESULTS FOR *****
***** LAMINAR FREE CONVECTIVE BOUNDARY LAYER FLOW OVER A *****
***** VERTICAL ISOTHERMAL FLAT PLATE. *****
*****
      DIMENSION T(10000),F(10000),G(10000),H(10000),A(10000)
      & ,HGUESS(3),AGUESS(3),FPIN(3),TPIN(3)
      REAL KF0,KG0,KH0,KF1,KG1,KH1,KF2,KG2,KH2,KF3,KG3,KH3
      & ,KT0,KA0,KT1,KA1,KT2,KA2,KT3,KA3
      COMMON DETA,PR
*****
      OPEN(UNIT=1,FILE='SIMPLNPR.DAT')
      OPEN(UNIT=2,FILE='SIMPLNPL.DAT')
*****
      WRITE(6,4250)

```

```

WRITE(6,4290)
WRITE(6,4260)
READ(5,*) PR
WRITE(6,4250)
DETA=0.0015
N=10000
WRITE(1,4290)
WRITE(1,4270) PR
*****
* N=NUMBER OF GRID POINTS
* PR=PRANDTL NUMBER
* DETA=ETA STEP SIZE
*****
INTR=1
HGUESS(1)=0.45
AGUESS(1)=-1.1
IF(PR.LT.15) THEN
  HGUESS(1)=0.6
  AGUESS(1)=-0.9
ENDIF
IF(PR.LT.10) THEN
  HGUESS(1)=0.7
  AGUESS(1)=-0.7
ENDIF
IF(PR.LT.5) THEN
  HGUESS(1)=0.8
  AGUESS(1)=-0.5
ENDIF
IF(PR.LT.1) THEN
  HGUESS(1)=0.9
  AGUESS(1)=-0.4
ENDIF
100 CONTINUE
DO 1001 J=1,3
  F(1)=0.0
  G(1)=0.0
  T(1)=1.0

```

```
H(1)=HGUESS(J)
A(1)=AGUESS(J)
DO 1000 I=2,N
  F0=F(I-1)
  G0=G(I-1)
  H0=H(I-1)
  A0=A(I-1)
  T0=T(I-1)
  FC=F0
  GC=G0
  HC=H0
  AC=A0
  TC=T0
  CALL RUTKUN(FC,GC,HC,TC,KF0,KG0,KH0)
  CALL RUTTUN(TC,AC,FC,KT0,KA0)
  FC=F0+0.5*KF0
  GC=G0+0.5*KG0
  HC=H0+0.5*KH0
  TC=T0+0.5*KT0
  AC=A0+0.5*KA0
  CALL RUTKUN(FC,GC,HC,TC,KF1,KG1,KH1)
  CALL RUTTUN(TC,AC,FC,KT1,KA1)
  FC=F0+0.5*KF1
  GC=G0+0.5*KG1
  HC=H0+0.5*KH1
  TC=T0+0.5*KT1
  AC=A0+0.5*KA1
  CALL RUTKUN(FC,GC,HC,TC,KF2,KG2,KH2)
  CALL RUTTUN(TC,AC,FC,KT2,KA2)
  FC=F0+KF2
  GC=G0+KG2
  HC=H0+KH2
  TC=T0+KT2
  AC=A0+KA2
  CALL RUTKUN(FC,GC,HC,TC,KF3,KG3,KH3)
  CALL RUTTUN(TC,AC,FC,KT3,KA3)
  F(I)=F(I-1)+(KF0+2.0*KF1+2.0*KF2+KF3)/6.0
```

```

G(I)=G(I-1)+(KG0+2.0*KG1+2.0*KG2+KG3)/6.0
H(I)=H(I-1)+(KH0+2.0*KH1+2.0*KH2+KH3)/6.0
T(I)=T(I-1)+(KT0+2.0*KT1+2.0*KT2+KT3)/6.0
A(I)=A(I-1)+(KA0+2.0*KA1+2.0*KA2+KA3)/6.0
1000 CONTINUE
FPIN(J)=G(N)
TPIN(J)=T(N)
IF(ABS(FPIN(1)).LT.0.0000005) GO TO 300
IF (J.EQ.1) THEN
  HGUESS(2)=HGUESS(1)+0.001
  AGUESS(2)=AGUESS(1)
ENDIF
IF (J.EQ.2) THEN
  HGUESS(3)=HGUESS(1)
  AGUESS(3)=AGUESS(1)+0.001
ENDIF
1001 CONTINUE
IF(INTR.GT.100) GO TO 200
DEFVF=(FPIN(2)-FPIN(1))/0.001
DEFVT=(FPIN(3)-FPIN(1))/0.001
DETVF=(TPIN(2)-TPIN(1))/0.001
DETVT=(TPIN(3)-TPIN(1))/0.001
DH=(TPIN(1)/DETVT - FPIN(1)/DEFVT)/(DETVF/DETVT-DEFVF/DEFVT)
DA=(TPIN(1)/DETVF - FPIN(1)/DEFVF)/(DETVT/DETVF-DEFVT/DEFVF)
write(6,9999) INTR,FPIN(1),TPIN(1)
9999 format(2x' Iter. No. = ',I4,' F prime infin. = ',F10.5,
& ' T infin. = ',F10.5)
HGUESS(1)=HGUESS(1)-0.5*DH
AGUESS(1)=AGUESS(1)-0.5*DA
INTR=INTR+1
GO TO 100
200 WRITE(6,2000)
GO TO 7777
300 WRITE(6,3000) INTR
7777 CONTINUE
WRITE(1,4500)
DO 7000 I=1,N,10

```

```

ETA=(I-1)*DETA
WRITE(1,4000) ETA,F(I),G(I),H(I),T(I)
WRITE(2,5500) ETA,G(I),T(I)
7000 CONTINUE
WRITE(1,4280) A(1)
WRITE(6,4280) A(1)
WRITE(1,4281) H(1)
WRITE(6,4281) H(1)
CLOSE(1)
CLOSE(2)
STOP
2000 FORMAT(' ***** FAILURE TO CONVERGE *****')
3000 FORMAT(' VELOCITY FUNCTION CONVERGENCE IN ',I5,'ITERATIONS')
4000 FORMAT(5F10.6)
4250 FORMAT(////)
4260 FORMAT(' INPUT THE VALUE OF THE PRANDTL NUMBER THEN ')
4270 FORMAT(//,' PRANDTL NUMBER = ',F12.3,/)
4280 FORMAT(//,' THETA GRADIENT AT WALL = ',F9.3)
4281 FORMAT(//,' F PRIME GRADIENT AT WALL = ',F9.3)
4290 FORMAT(/,'SIMILARITY SOLUTION FOR FREE CONVECTIVE FLOW',/
$ ' OVER A VERTICAL ISOTHERMAL PLATE',/,
$ ' _____',/)
4500 FORMAT(' ETA F dF/DETA D2F/DETA2 THETA')

5500 FORMAT(F10.6,',',F10.6,',',F10.6)
END
*****
*   RUTTA-KUNGE SOLUTION ROUTINE FOR VELOCITY
*****
SUBROUTINE RUTKUN(F,G,H,T,KF,KG,KH)
REAL KF,KG,KH
COMMON DETA,PR
KF=DETA*G
KG=DETA*H
KH=(-0.75*F*H+G*G/2.0-T)*DETA
RETURN
END

```

* RUTTA-KUNGE SOLUTION ROUTINE FOR TEMPERATURE

SUBROUTINE RUTTUN(T,A,F,KT,KA)

REAL KT,KA

COMMON DETA,PR

KT=DETA*A

KA=-0.75*PR*F*A*DETA

RETURN

END

ภาคผนวก ข

โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล **CFX**

ข.1 กล่าวนำ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป **CFX-5** ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก เพราะเป็นโปรแกรมขนาดใหญ่ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาได้หลายแขนง รวมถึงปัญหาเกี่ยวกับการไหลตัวด้วยแรงลอยตัวดังในกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ด้วย แม้ว่าโปรแกรมจะผ่านการทดสอบมาอย่างดีแล้วก่อนที่จะนำมาจำหน่าย แต่ผู้วิจัยก็ต้องทำการทดสอบการใช้โปรแกรมตัวเองเช่นกัน โดยทำการศึกษาเรียนรู้กระบวนการทำงานของโปรแกรม การกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม เพื่อสร้างความมั่นใจในการใช้โปรแกรมให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

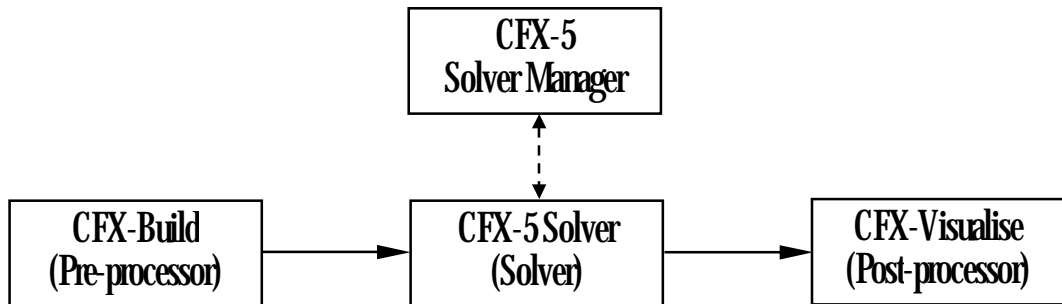
โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล **CFX** เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปอีกหนึ่งโปรแกรมที่มีผู้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในกลุ่มนักวิจัยต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก อาจเป็นเนื่องจากความยากในการใช้งานของโปรแกรมเพราะเป็นโปรแกรมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาการไหลหลายรูปแบบจึงทำให้มีขั้นตอนและกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน จำเป็นที่ผู้ใช้จะต้องศึกษาเรียนรู้ และฝึกฝนการใช้โปรแกรมให้เกิดความชำนาญก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหลที่ต้องการศึกษา สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล **CFX-5** เริ่มตั้งแต่ **CFX-5.4** จนกระทั่งถึง **CFX-5.5.1** โดยรายละเอียดและการประยุกต์ใช้งานของโปรแกรมแล้วไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แต่เวอร์ชันหลัง ๆ อาจมีการเพิ่มคำสั่งบางคำสั่งในโปรแกรม และปรับปรุงให้การใช้งานสะดวกและง่ายขึ้น

โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล **CFX-5** เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเหมือนกับโปรแกรมโดยทั่วไป คือ 1) กระบวนการเริ่มต้น 2) ขั้นตอนการวิเคราะห์ และ 3) กระบวนการขั้นท้าย ซึ่งจะทำการแก้สมการของการไหลด้วยกรรมวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะมีความยุ่งยากเนื่องจากมีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน ตลอดจนการสร้างเมชและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล **CFX-5** ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยการทำงานของโปรแกรมในกระบวนการขั้นต้นจะอยู่บนพื้นฐานของการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบ (**computer edge design, CAD**) เพื่อช่วยให้ขั้นตอนการสร้างรูปร่างลักษณะของปัญหาง่ายขึ้น รวมถึงการสร้างเมชแบบไร้โครงสร้างโดยอัตโนมัติที่มีอยู่ในโปรแกรม

ข.2 การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป **CFX-5**

CFX-5 มีลักษณะของการทำงานเช่นเดียวกันกับโปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอน ดังได้กล่าวไว้ในตอนต้น นั่นคือ กระบวนการเริ่มต้น ขั้นตอนการ

วิเคราะห์ และกระบวนการขั้นท้าย โดยจะทำการแก้สมการของปัญหาการไหลด้วยกรรมวิธี ปริมาตรจำกัด (**finite volume method**) สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป **CFX-5** จะประกอบด้วยซอฟต์แวร์ทั้งหมด 4 ส่วนด้วยกัน ซึ่งจะทำงานร่วมกันเป็นลูกโซ่ ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ลูกโซ่การทำงาน of โปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป **CFX-5**

ซึ่งแต่ละซอฟต์แวร์จะมีหน้าที่คล้ายคลึงกับกระบวนการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป โดยมีรายละเอียด ดังนี้

CFX-Build: มีหน้าที่เช่นเดียวกับกระบวนการเริ่มต้นของ โปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป

CFX-5 Solver Manager: มีหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้โดยการแสดงค่าที่ได้จาก **CFX-Solver** บนหน้าจอ ในขณะที่ **CFX-Solver** กำลังอยู่ในขั้นตอนของการคำนวณ

CFX-5 Solver: มีหน้าที่เช่นเดียวกับขั้นตอนการวิเคราะห์ของ โปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป

CFX-Visualise: มีหน้าที่เช่นเดียวกับกระบวนการขั้นท้ายของ โปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป

ความสามารถในการจำลองการไหลของโปรแกรมฯ มีหลายรูปแบบ ดังนี้

- **steady-state** และ **transient flows**
- **laminar** และ **turbulent flows**
- **subsonic, transonic** และ **supersonic flows**
- **heat transfer**
- **buoyancy**
- **non-Newtonian flows**
- **transport of non-reacting scalar components**

ข.2.1 CFX-Build

CFX-Build เป็นซอฟต์แวร์ในส่วนที่เกี่ยวกับการกำหนดรูปร่างลักษณะของปัญหา ฟิสิกส์ของการไหล เงื่อนไขขอบเขต พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการสร้างเมช เงื่อนไขเริ่มต้น และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ (**solver**) นอกจากความสามารถในการสร้างรูปร่างลักษณะของปัญหา ด้วยเครื่องมือที่มีอยู่ใน **CFX-Build** ด้วยตัวเองแล้ว ยังสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรมช่วยออกแบบหลายโปรแกรมด้วยกัน โดยสร้างรูปร่างลักษณะของปัญหาบนโปรแกรมช่วยออกแบบเหล่านั้น จากนั้นจึงส่งไฟล์เข้ามาใน **CFX-Build** เพื่อนำไปกำหนดโดเมนและค่าอื่น ๆ ต่อไป โปรแกรมช่วยออกแบบที่สนับสนุนกับโปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป **CFX-5** ประกอบด้วย **Pro/ENGINEER, Unigraphics, CATIA, Euclid 3, CADD5** และ **Solid Works** เป็นต้น นอกจากนี้ **CFX-5** ยังสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ลักษณะรูปร่างของปัญหาได้โดยตรง ตลอดจนความสามารถในการสร้างเมชลักษณะต่าง ๆ ได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการสร้างเมชได้มากขึ้น

ข.2.2 CFX-5Solver

เป็นขั้นตอนต่อจากการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นที่ **CFX-Build** โดย **CFX-Solver** จะทำการหาคำตอบให้กับปัญหาการไหลที่ผู้ใช้ทำการจำลองขึ้นนี้ในรูปของตัวแปรคำตอบ (**solution variables**) ต่าง ๆ

ข.2.1 CFX-Solver Manager

CFX-Solver Manager จะอยู่ใน **CFX-Build** เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมที่มีหน้าที่หลักเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของ **Solver** ซึ่งจะแสดงผลออกมาในรูปของกราฟิก หน้าที่หลักของ **CFX-Solver Manager** คือ กำหนด **input file** ให้กับ **CFX-5 Solver** เริ่มต้นหรือหยุด การทำงานของ **CFX-5 Solver** และแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณผ่านหน้าจอแสดงผล

ข.2.4 CFX-Visualise

เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับกระบวนการขึ้นท้าย ประกอบด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ที่จะช่วยวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม **CFX-5** ลักษณะที่สำคัญของซอฟต์แวร์ส่วนนี้ คือ

- การพล็อตสีของไอโซเซอร์เฟซ (**isosurface coloured**) ของตัวแปรต่าง ๆ
- ภาพฉายแบบเพอร์สเปกทีฟ (**perspective views**) โดยไม่แสดงเส้นที่ถูกบังได้
ตลอดจนความสามารถในการแสดงเป็นแสงเงาของวัตถุ (**shading**)
- การพล็อตเวกเตอร์ความเร็ว (**velocity vector**) และเส้นโครงร่าง (**contour**) บนระนาบที่ต้องการ

- การพล็อตสีของเส้นแนวการไหล (**coloured streamline**)
- การแสดงค่าผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลข
- การคำนวณค่าเชิงปริมาณต่าง ๆ
- การแสดงเมชที่ใช้ในการจำลอง

ข.3 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรมจะทำการบันทึกไว้ในไฟล์เก็บข้อมูลซึ่งเรียกว่า **“Output File”** ข้อมูลที่ถูกบันทึกมีทั้งข้อมูลที่กำหนดก่อนการคำนวณและข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณไว้ในไฟล์ชนิดนี้ ในที่นี้ขอนำ **Output File** สำหรับกรณีที่ 9 มาแสดงเป็นตัวอย่าง ข้อมูลส่วนแรกเป็นข้อมูลที่กำหนดให้กับโปรแกรมก่อนที่จะคำนวณ ส่วนที่สองเป็นการแสดงค่าส่วนตกค้าง (**Residual**) ที่ได้ในแต่ละรอบการคำนวณ ซึ่งสำหรับกรณีนี้โปรแกรมทำการคำนวณทั้งสิ้น 2000 รอบ จึงหยุด การแสดงผลในแต่ละรอบการคำนวณจะมีลักษณะเดียวกัน ผู้วิจัยได้แสดงผลให้ดูเพียงรอบการคำนวณที่ 1, 2 และ รอบที่ 2000 เท่านั้น เพื่อเป็นการประหยัด และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ดังนี้

This run of the CFX-5.5.1 Solver started at 15:39:31 on 27 Dec 2003 by user polly1 on POLLY (intel_p3_winnt5.1) using the command
 C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\perl\lib\cfx5solve.pl -stdout-comms -batch-ccl-
 Using the CFX-5 Solver optimised for the winnt architecture from
 C:\CFX\CFX-5.5.1\bin\5.5.1\winnt\solver-pvm.exe
 Setting up CFX-5 Solver run...

```

+-----+
|                                     |
|           CFX Command Language for Run           |
|                                     |
+-----+

```

LIBRARY :

MATERIAL : Air at 308K

Option = Pure Substance

PROPERTIES :

Option = General Fluid

Density = 1.1464 [kg m⁻³]

Dynamic Viscosity = 1.8875E-5 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Specific Heat Capacity = 1.005E3 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Thermal Conductivity = 2.673E-2 [W m⁻¹ K⁻¹]

Thermal Expansivity = 3.247E-3 [K⁻¹]

```
END
END
END
EXECUTION CONTROL :
PARTITIONER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
PARTITIONING TYPE :
  MeTiS Type = k-way
  Option = MeTiS
END
END
RUN DEFINITION :
  Definition File = straightchim7m45deg_2.def
  Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL :
  Runtime Priority = Standard
EXECUTABLE SELECTION :
  Double Precision = Off
  Use 64 Bit = Off
END
PARALLEL ENVIRONMENT :
  Option = Serial
  Parallel Mode = PVM
END
END
FLOW :
SOLUTION UNITS :
  Mass Units = [kg]
  Length Units = [m]
  Time Units = [s]
  Temperature Units = [K]
  Angle Units = [rad]
  Solid Angle Units = [sr]
END
SIMULATION TYPE :
  Option = Steady State
END
DOMAIN : straightchim7m45deg2
  Location = straightchim7m45deg2
```

Coord Frame = Coord 0
Fluids List = Air at 308K
DOMAIN MODELS :
DOMAIN MOTION :
Option = Stationary
END
BUOYANCY MODEL :
Option = Buoyant
Gravity X Component = 0.00 [ms⁻²]
Gravity Y Component = -9.81 [ms⁻²]
Gravity Z Component = 0.00 [ms⁻²]
Buoyancy Reference Temperature = 3.08E2 [K]
END
REFERENCE PRESSURE :
Reference Pressure = 1.0133E5 [Pa]
END
END
FLUID MODELS :
TURBULENCE MODEL :
Option = Laminar
END
HEAT TRANSFER MODEL :
Option = Thermal Energy
END
THERMAL RADIATION MODEL :
Option = None
END
END
SUBDOMAIN : Attic
Location = Attic
Coord Frame = Coord 0
SOURCES :
EQUATION SOURCE : energy
Option = Source
Source = 3.2323E2 [W m⁻³]
END
END
END
SUBDOMAIN : Ceiling
Location = Ceiling
Coord Frame = Coord 0


```
END
SUBDOMAIN : Floor
  Location = Floor
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : Inlet
  Boundary Type = INLET
  Location = Inlet
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Total Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
    FLOW DIRECTION :
      Option = Normal to Boundary Condition
    END
    HEAT TRANSFER:
      Option = Static Temperature
      Static Temperature = 3.08E2 [K]
    END
  END
END
BOUNDARY : Outlet
  Boundary Type = OUTLET
  Location = Outlet
  Coord Frame = Coord 0
  BOUNDARY CONDITIONS :
    FLOW REGIME :
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Static Pressure
      Relative Pressure = 0.00 [Pa]
    END
  END
END
BOUNDARY : Ceiling1
```

```
Boundary Type = WALL
Location = Ceiling1
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
WALL INFLUENCE ON FLOW :
Option = No Slip
END
HEAT TRANSFER :
Option = Adiabatic
END
END
BOUNDARY : Ceiling2
Boundary Type = WALL
Location = Ceiling2
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
WALL INFLUENCE ON FLOW :
Option = No Slip
END
HEAT TRANSFER :
Option = Adiabatic
END
END
BOUNDARY : Floor1
Boundary Type = WALL
Location = Floor1
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
WALL INFLUENCE ON FLOW :
Option = No Slip
END
HEAT TRANSFER :
Option = Adiabatic
END
END
BOUNDARY : Floor2
Boundary Type = WALL
Location = Floor2
```

```
Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
WALL INFLUENCE ON FLOW :
  Option = No Slip
END
HEAT TRANSFER :
  Option = Adiabatic
END
END
BOUNDARY : Sym1
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = Sym1
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : Sym2
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = Sym2
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : Sym3
  Boundary Type = SYMMETRY
  Location = Sym3
  Coord Frame = Coord 0
END
BOUNDARY : Default
  Boundary Type = WALL
  Location = Default
  Coord Frame = Coord 0
BOUNDARY CONDITIONS :
WALL INFLUENCE ON FLOW :
  Option = No Slip
END
HEAT TRANSFER :
  Option = Adiabatic
END
END
INITIALISATION :
  Option = Automatic
  Coord Frame = Coord 0
```

```
INITIAL CONDITIONS :
  STATIC PRESSURE :
    Option= Automatic with Value
    Relative Pressure = 0.00 [Pa]
  END
  TEMPERATURE :
    Option= Automatic with Value
    Temperature = 3.08E2 [K]
  END
  CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS :
    Option= Automatic with Value
    U = 0.00 [ms^-1]
    V = 0.00 [ms^-1]
    W = 0.00 [ms^-1]
  END
END
END
SOLVER CONTROL :
  CONVERGENCE CONTROL :
    Maximum Number of Iterations = 500
    Timescale Control = Auto Timescale
  END
  CONVERGENCE CRITERIA :
    Residual Type = RMS
    Residual Target = 1.E-10
  END
  ADVECTION SCHEME :
    Option= Upwind
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL :
    Global Dynamic Model Control = Yes
  END
END
OUTPUT CONTROL :
  END
END
COMMAND FILE :
  Version = 5.5.1
END
```

```

+-----+
| Solver |
+-----+

+-----+
| CFX-5 Solver 5.5.1 |
| Version 2002.05.29-23.00      Wed May 29 23:00:33 2002 |
| Copyright 1996-2002 AEA Technology plc. |
+-----+

+-----+
| Job Information |
+-----+

Run mode:  serial run
Host computer:  POLLY
Job started:  Sat Dec 27 15:39:54 2003

+-----+
| Memory Usage Information |
+-----+

Data Type      Kwords  Words/Node  Kbytes  Bytes/Node

Real           2822.8   611.65   11026.4  2446.59
Integer        827.2    179.24   3231.1   716.94
Character      872.1    188.96   851.6    188.96
Logical        10.0     2.17     39.1     8.67
Double         16.0     3.47     125.0    27.74

+-----+
| Total Number of Nodes, Elements, and Faces |
+-----+

Domain Name : straightchim7m45deg2
Total Number of Nodes      = 4615
Total Number of Elements   = 17677
Total Number of Tetrahedrons = 17677
Total Number of Faces      = 5970

+-----+
| Adaption Parameters |
+-----+

```

Domains = straightchim7m45deg2
 Sub-domains = Attic
 Sub-domains = Ceiling
 Sub-domains = Default
 Sub-domains = Floor
 Adaption Variables = Pressure
 Adaption Variables = Temperature
 Adaption Variables = Velocity
 Number of Adaption Steps = 3
 Number of Nodes = MultipleofInitialMesh
 Multiple of Nodes = 2
 Adaption Criteria = SolutionVariation
 Min Edge Length = 0.00132273
 Allocation Parameter = 0
 Number of Adaption Levels = 3
 Adapting to Geometry = No
 Save Intermediate Files = No
 Max Its. per Step = 500
 Type of Residual = RMSNormforResiduals
 Target Residual = 9.999997E-010

Average Scale Information

Domain Name : straightchim7m45deg2
 Global Length = 2.2592E+00
 Density = 1.1464E+00
 Dynamic Viscosity = 1.8875E-05
 Velocity = 0.0000E+00
 Thermal Conductivity = 2.6730E-02
 Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 1.0050E+03
 Thermal Expansivity = 3.2470E-03
 Prandtl Number = 7.0967E-01

The Equations Solved in This Calculation

Subsystem Name : Momentum and Mass

U-Mom
 V-Mom
 W-Mom
 P-Mass

Subsystem Name : Heat Transfer

H-Energy

CFD Solver started: Sat Dec 27 15:40:08 2003

```

+-----+
|           Convergence History           |
+-----+

```

```

!           Timescale Information           !

```

```

! Equation | Type | Timescale |
+-----+
! U-Mom   | Auto Timescale | 9.30011E+04 | !
! V-Mom   | Auto Timescale | 9.30011E+04 | !
! W-Mom   | Auto Timescale | 9.30011E+04 | !
! P-Mass  | Auto Timescale | 9.30011E+04 | !
+-----+
! H-Energy | Auto Timescale | 9.30011E+04 | !
+-----+

```

```

OUTER LOOP ITERATION = 1           CPU SECONDS = 2.01E+00

```

```

| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+
| U-Mom   | 0.00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 OK |
| V-Mom   | 0.00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 OK |
| W-Mom   | 0.00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 OK |
| P-Mass  | 0.00 | 0.0E+00 | 0.0E+00 | 8.8 0.0E+00 OK |
+-----+
| H-Energy | 0.00 | 9.3E-04 | 6.6E-03 | 13.6 5.7E-02 OK |
+-----+

```

```

OUTER LOOP ITERATION = 2           CPU SECONDS = 1.07E+01

```

```

| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+
| U-Mom   | 0.00 | 2.3E-10 | 5.3E-09 | 1.1E+06 F |
| V-Mom   | 0.00 | 1.8E-02 | 1.3E-01 | 1.7E-02 OK |
| W-Mom   | 0.00 | 5.4E-20 | 1.6E-18 | 1.0E+15 * |
| P-Mass  | 0.00 | 6.0E-15 | 8.8E-14 | 16.6 1.6E+01 F |
+-----+
| H-Energy | 14.10 | 1.3E-02 | 1.2E-01 | 9.8 3.9E-02 OK |
+-----+

```

OUTER LOOP ITERATION = 2000 (500) CPU SECONDS = 2.32E+04 (7.83E+03)

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	1.01	1.9E-07	2.4E-06	5.6E-03 OK
V-Mom	1.15	2.9E-07	1.5E-05	6.4E-03 OK
W-Mom	0.99	2.2E-07	2.6E-06	2.9E-03 OK
P-Mass	0.97	2.8E-08	1.7E-07	8.8 1.4E-02 OK
H-Energy	0.96	9.3E-08	3.1E-06	5.4 9.1E-03 OK

CFD Solver finished: Sat Dec 27 22:33:01 2003

Execution terminating: maximum number of time-step iterations,
or maximum time has been reached.

Boundary Flow and Total Source Term Summary

U-Mom		
Boundary	: Ceiling1	-1.1276E-04
Boundary	: Floor1	6.6123E-05
Boundary	: Inlet	-3.8201E-02
Boundary	: Outlet	4.6325E-05
Boundary	: Sym1	-7.4798E+00
Boundary	: Sym2	4.5324E-17
Boundary	: Default	7.5182E+00
Boundary	: Ceiling2	-2.3207E-04
Boundary	: Floor2	-1.7234E-05
Global Balance :		-3.9212E-07

Global Imbalance, in%: 0.0000%

V-Mom		
Boundary	: Ceiling1	2.3148E+00
Boundary	: Floor1	-2.5679E+00
Boundary	: Inlet	1.8174E-07
Boundary	: Outlet	-7.6481E-02

Boundary	: Sym1	1.2584E-07
Boundary	: Sym2	5.6096E-17
Boundary	: Default	3.0288E+00
Boundary	: Ceiling2	-4.5594E+00
Boundary	: Floor2	3.8986E-01
Domain	: straightchim7m45deg2	1.4702E+00

Global Balance : -9.5367E-07

Global Imbalance, in%: 0.0000%

W-Mom

Boundary	: Ceiling1	-9.1970E-07
Boundary	: Floor1	-1.4256E-06
Boundary	: Inlet	-4.0460E-08
Boundary	: Outlet	2.6052E-07
Boundary	: Sym1	-1.8033E-08
Boundary	: Sym2	-8.3115E+01
Boundary	: Sym3	8.3115E+01
Boundary	: Default	-7.2367E-06
Boundary	: Ceiling2	2.1217E-07
Boundary	: Floor2	-1.6108E-07

Global Balance : 4.4377E-07

Global Imbalance, in%: 0.0000%

P-Mass

Boundary	: Inlet	1.0469E-01
Boundary	: Outlet	-1.0469E-01

Global Balance : -2.9802E-08

Global Imbalance, in%: 0.0000%

H-Energy

Boundary	: Inlet	3.2406E+04
Boundary	: Outlet	-3.3406E+04

Sub-Domain : Attic 9.9999E+02

Global Balance : -1.6479E-02

Global Imbalance, in%: 0.0000%

Wall Force and Moment Summary

Note: Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

Pressure Force On Walls			
	X-Comp	Y-Comp	Z-Comp
Ceiling1	2.6615E-07	-2.3148E+00	0.0000E+00
Floor1	-1.7963E-08	2.5678E+00	3.2820E-12
Default	-7.5178E+00	-3.0293E+00	1.6144E-10
Ceiling2	-4.8691E-07	4.5594E+00	0.0000E+00
Floor2	1.8865E-08	-3.8988E-01	-4.4343E-15
Viscous Force On Walls			
	X-Comp	Y-Comp	Z-Comp
Ceiling1	1.1249E-04	1.1258E-05	9.1970E-07
Floor1	-6.6105E-05	1.5194E-05	1.4256E-06
Default	-4.3997E-04	4.3517E-04	7.2366E-06
Ceiling2	2.3255E-04	8.3441E-06	-2.1217E-07
Floor2	1.7215E-05	1.3357E-05	1.6108E-07
Pressure Moment On Walls			
	X-Comp	Y-Comp	Z-Comp
Ceiling1	2.8928E-01	3.3264E-08	-5.5476E+00
Floor1	-3.2095E-01	-2.2652E-09	6.6573E+00
Default	3.7856E-01	-9.3965E-01	5.7618E+01
Ceiling2	-5.6981E-01	-6.0867E-08	1.0307E+01
Floor2	4.8641E-02	2.3593E-09	-1.0257E+00
Viscous Moment On Walls			
	X-Comp	Y-Comp	Z-Comp
Ceiling1	3.9981E-06	1.3108E-05	-6.4753E-04

Floor1	2.0102E-06	-1.3014E-05	1.8743E-04
Default	1.0045E-05	-7.0151E-05	2.1877E-03
Ceiling2	-2.3083E-06	3.1421E-05	-1.3497E-03
Floor2	-1.2301E-06	1.2418E-06	-5.3472E-05

Locations of Maximum Residuals

Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	2765	5.000E+00	3.187E+00	0.000E+00
V-Mom	5	-2.296E-07	6.000E+00	2.500E-01
W-Mom	5428	4.297E+00	6.108E+00	2.239E-01
P-Mass	175	3.516E+00	6.000E+00	0.000E+00
H-Energy	5	-2.296E-07	6.000E+00	2.500E-01

Peak Values of Residuals

Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	1	5.53240E-03	1.91250E-07
V-Mom	1	3.47782E-03	2.86917E-07
W-Mom	1	1.52733E-03	2.16207E-07
P-Mass	1	1.45309E-03	2.81429E-08
H-Energy	1	3.34158E-04	9.29250E-08

False Transient Information

Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	6.69110E+02
V-Mom	Auto	6.69110E+02
W-Mom	Auto	6.69110E+02
P-Mass	Auto	6.69110E+02
H-Energy	Auto	6.69110E+02

Average Scale Information

Domain Name : straightchim7m45deg2

Global Length = 2.2592E+00
 Density = 1.1464E+00
 Dynamic Viscosity = 1.8875E-05
 Velocity = 5.1269E-01
 Advection Time = 4.4066E+00
 Reynolds Number = 7.0349E+04

-----+
 | ERROR #002100004 has occurred in subroutine Out_Scales_Flu |
 | Message: |
 | The Reynolds number is outside of the range expected based on the |
 | Option selected for the TURBULENCE MODEL. Check this setting |
 | the values of the properties, mesh scale, consistency of units |
 | and solution values in the input file. Execution will proceed. |
 -----+

Thermal Conductivity = 2.6730E-02
 Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 1.0050E+03
 Thermal Expansivity = 3.2470E-03
 Prandtl Number = 7.0967E-01
 Temperature Range = 1.6319E+01
 Rayleigh Number = 1.5691E+10
 Buoyancy Time = 2.7260E+00

-----+
 | Variable Range Information |
 -----+

Domain Name : straightchim7m45deg2

-----+
 | Variable Name | min | max |
 -----+
Velocity u	-1.18E+00	1.12E+00
Velocity v	-4.54E-01	1.66E+00
Velocity w	-1.67E-01	1.39E-01
Pressure	-4.11E+00	2.77E-04
Density	1.15E+00	1.15E+00
Dynamic Viscosity	1.89E-05	1.89E-05
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
Thermal Conductivity	2.67E-02	2.67E-02
Thermal Expansivity	3.25E-03	3.25E-03
Temperature	3.08E+02	3.24E+02
Static Enthalpy	3.10E+05	3.26E+05
 -----+

```

+-----+
|           CPU Requirements of Numerical Solution           |
+-----+
Subsystem Name      Discretization   Linear Solution
                   (secs. %total) (secs. %total)
-----
Momentum and Mass   4.86E+03 67.3%  7.51E+02 10.4%
Heat Transfer       1.32E+03 18.2%  2.93E+02  4.1%
-----
Summary             6.17E+03 85.5%  1.04E+03 14.5%

```

```

+-----+
|           Job Information           |
+-----+
Host computer: POLLY
Job finished: Sat Dec 27 22:33:15 2003
Total CPU time: 7.848E+03 seconds
                or: (  0   2   10  48.045)
                   ( Days: Hours: Minutes: Seconds)
End of solution stage.
This run of the CFX-5 Solver has finished.

```

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรสวรรค์ ทองใบ เกิดเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2518 เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2541 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้ทำงานในหน้าที่ ผู้ช่วยวิจัย โครงการการผลิตกระแสไฟฟ้าราคาถูกลงโดยระบบปล่องลมแดด: การศึกษาเชิงทฤษฎี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมี รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ดำรงตำแหน่งเป็นหัวหน้าโครงการฯ เป็นเวลาทั้งสิ้น 2 ปี โดยได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2544

ปัจจุบัน ทำงานในตำแหน่ง วิศวกรประจำโครงการพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบใหม่ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมี รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ ดำรงตำแหน่งเป็นหัวหน้าโครงการฯ โดยได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจาก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ