

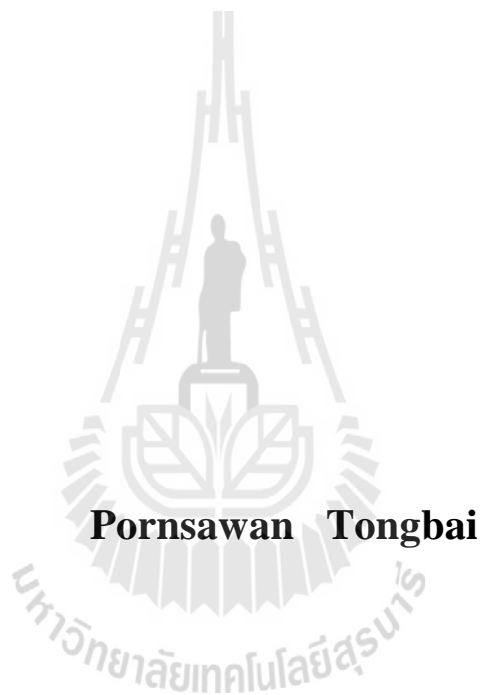
การระบายอากาศและทำความเย็นในอาคารด้วยระบบปล่องแสงแดด



นางสาวพรสวรรค์ ทองใบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**VENTILATION AND COOLING IN BUILDING USING
SOLAR CHIMNEY SYSTEM**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การระบายอากาศและทำความเย็นในอาคารด้วยระบบปล่องแสงแดด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ.ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.เอกชัย จันทสาโร)

กรรมการ

(รศ. ดร.พิพัฒน์ อมตฉายา)

กรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรสวรรค์ ทองใบ : การระบายอากาศและทำความเย็นในอาคารด้วยระบบปล่องแสงแดด
(VENTILATION AND COOLING IN BUILDING USING SOLAR CHIMNEY
SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์, 157 หน้า

ระบบปล่องแสงแดดเป็นระบบที่ใช้ในการระบายอากาศในอาคารโดยวิธีการไหลแบบธรรมชาติ (natural convection) ข้อดีของระบบปล่องแสงแดด คือ เป็นระบบที่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า (passive system) ไม่สร้างมลภาวะ และมีต้นทุนต่ำ แนวคิดคือใช้หลังคาทำจากวัสดุโปร่งใส (transparent roof) เพื่อให้รับแสงแดดได้มากด้วยปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) โดยใช้แผ่นโลหะสีดำเป็นหลังคาชั้นในเพื่อช่วยดูดซับความร้อนจากแสงแดดได้มากขึ้น ระหว่างหลังคาโปร่งใสกับแผ่นโลหะมีช่องว่าง (air channel) เพื่อให้อากาศร้อนไหลผ่าน และไหลออกทางช่องเปิดด้านบนของหลังคาด้วยแรงลอยตัว (buoyancy force) ซึ่งการไหลนี้เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของอากาศจากภายนอกผ่านช่องเปิดทางด้านล่างเข้าสู่อาคารทำให้เกิดการระบายอากาศ

ศึกษาหาแนวทางการออกแบบระบบเพื่อการระบายอากาศที่ดีที่สุดด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ทำการจำลองการไหลผ่านระบบปล่องแสงแดด เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการระบายอากาศ ได้แก่ ความเข้มของแสงแดด มุมเอียงของหลังคา ความกว้างของช่องอากาศ ความสูงของปล่องบนหลังคา และมุมบานตัวของช่องอากาศ ซึ่งตัวแปรท้ายสุดนี้เป็นตัวแปรที่ผู้วิจัยยังไม่พบหลักฐานการศึกษามาก่อนจากงานวิจัยในอดีต พบว่าทุกตัวแปรต่างมีอิทธิพลต่ออัตราการระบายอากาศทั้งสิ้น โดยเฉพาะการบานตัวของช่องอากาศ ซึ่งพบว่าเพียงให้ช่องอากาศบานออก 6° สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ถึง 30% เทียบกับกรณีปกติ นับว่าเป็นการค้นพบที่สำคัญในการที่จะออกแบบอาคารเพื่อการระบายอากาศที่มากขึ้น นอกจากนี้ ยังศึกษาเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศผ่านระบบปล่องแสงแดดเมื่อใช้หลังคาสองชั้นแบบราบและมีปล่อง กับหลังคาแบบเอียง (ไม่มีปล่อง) เมื่อให้ความสูงรวมของหลังคาเท่ากัน พบว่า หลังคาแบบเอียง ให้อัตราการระบายอากาศที่ดีกว่าแบบราบที่มีปล่องประมาณ 15% เมื่อพิจารณาที่ความสูงรวม 1 m

PORNSAWAN TONGBAI : VENTILATION AND COOLING IN BUILDING
USING SOLAR CHIMNEY SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
TAWIT CHITSOMBOON, Ph.D., 157 PP

SOLAR CHIMNEY SYSTEM/NATURAL CONVECTION/CHANNEL EXPANDING
ANGLE

Solar chimney is the system that is employed to ventilate and cooling system. It's a passive system that has the advantages are it can work on its own without the need for electricity, reducing pollutions and cost. The main idea is to use a transparent roof to capture solar radiation by the greenhouse effect. A black metal sheet underneath the roof helps in absorbing more heat. The air gap between the roof and the metal sheet allows heated air to flow through and out at the top opening of the roof by buoyancy effect, inducing an air flow into building through the bottom opening to ventilation.

Numerical analyses are carried out to investigate to optimize ventilation in building by using commercial computational fluid dynamics software, ANSYS CFX. Simulation was performed for solar chimney to analyses the effect of parameters on ventilation rate, namely: solar intensity, inclination angles of roof, air channel width, vertical chimney attachment heights and channel expanding angles. The last parameter was new concepts that seem to have never been studied before. All of the mentioned parameters were found to exhibit positive effects on the ventilation. Especially, increasing the channel expanding angle at about 6° , we found that the flow rate increased by about 30% over the no expansion case. This is quite significant and it offers a new means to enhance the ventilation rate. In addition, comparison the airflow rate between using the flat roof with chimney and the inclined roof without chimney at the same height is investigated. Consider the result at 1-m height, we found that the airflow rate of inclined roof better than another one about 15%.

This research can be made toward the goal of researching and considering options to improve the testing process hard drives through a measure that used to be considered. Rate took part in the test increased by 27 % and the performance of the system hard drive, a 26% increase.



กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณครูอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำแนะนำ ความเมตตา และคอยกระตุ้นให้ผู้วิจัยได้มีกำลังใจในการดำเนินการวิจัยอยู่เสมอ

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลามารับฟัง และตัดสินการสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคคลดังต่อไปนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยจักระลึกถึงตลอดไป

- คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา เจ้าหน้าที่และธุรการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
- พี่น้องร่วมกลุ่มวิจัยในความดูแลของ อาจารย์ทวิช จิตรสมบูรณ์ ทุกคน ที่ได้ร่วมทุกข์ ร่วม

สุข ร่วมสนทนางานวิจัย ให้กำลังใจ กันและกันตลอดมา ตลอดจนเพื่อนพี่น้องร่วมสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ข้าพเจ้ามีจากกล่าวถึงได้หมด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่สงวน และคุณพ่อสมหมาย ทองใบ ที่ได้ให้กำเนิดและอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนให้โอกาสทางการศึกษาเล่าเรียนและให้กำลังใจอยู่ตลอด และขอบคุณน้องสาวและพี่ชายที่คอยให้กำลังใจเสมอมา คุณความดีใด ๆ อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ข้าพเจ้าขออุทิศแด่คุณพ่อสมหมาย ทองใบ ผู้ล่วงลับ ซึ่งเป็นบุคคลที่ส่งเสริมและผลักดันให้ลูกสาวคนนี้得有โอกาสศึกษาจนมีวันนี้

พรสวรรค์ ทองใบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองการไหล	3
1.4.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กล่าวนำ	6
2.2 การระบายอากาศ	6
2.3 ดวงอาทิตย์และแสงแดด	7
2.3.1 กลไกทางฟิสิกส์ของการพาอิสระ	8
2.3.2 ค่าเลขกราชอฟ (The Grashof Number)	12
2.3.3 การพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง	13
2.3.4 สมการชั้นผิวบาง (The Boundary-Layer Equations)	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.5 รายการอ้างอิง	26
3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	30
3.1 กล่าวนำ	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	กล่าวนำ	30
3.3	การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ANSYS CFX	31
3.4	การศึกษาการระบายอากาศใน 2 มิติ	31
3.4.1	รูปแบบของห้องหลังคาที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติ	32
3.4.2	ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการระบายอากาศ	32
3.5	การศึกษาการระบายอากาศใน 3 มิติ	33
3.6	การวิเคราะห์มิติและความเสมือนของระบบปล่องแสงแดด	33
3.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปล่องแสงแดด	33
4.	การใช้ห้องหลังคาและปล่องช่วยในการถ่ายเทอากาศ: การวิเคราะห์เชิงตัวเลข	34
4.1	บทคัดย่อ	34
4.2	บทนำ	34
4.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	35
4.4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	39
4.4.1	ผลกระทบจากความสูงของปล่อง	44
4.4.2	ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา	45
4.4.3	ผลกระทบจากความกว้างของปล่อง	46
4.4.4	ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด	47
4.4.5	ผลกระทบจากอาคารแบบสมมาตรกับไม่สมมาตร	48
4.4.6	ผลกระทบจากตัวแปรต่อปริมาณการถ่ายเทอากาศ	48
4.5	สรุปและข้อเสนอแนะ	50
4.5.1	สรุปผล	50
4.5.2	ข้อเสนอแนะ	50
4.6	รายการอ้างอิง	51
5.	การเพิ่มประสิทธิภาพปล่องแดดเพื่อระบายอากาศในอาคาร	52
5.1	บทคัดย่อ	52
5.2	บทนำ	53
5.3	แนวทางการดำเนินการวิจัย	54
5.4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	56
5.4.1	ผลกระทบจากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2	ผลกระทบจากความยาวของปล่องแคบ.....	58
5.4.3	ผลกระทบจากการเพิ่มความกว้างของช่องอากาศ.....	58
5.5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	60
5.6	รายการอ้างอิง.....	60
6.	ปัจจัยกระทบต่อปริมาณการระบายอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องแคบ.....	62
6.1	บทคัดย่อ.....	62
6.2	คำนำ.....	62
6.3	แนวทางการดำเนินการวิจัย.....	64
6.4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล.....	67
6.4.1	ผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล.....	67
6.4.2	ผลกระทบจากความยาวของหลังคา.....	68
6.4.3	ผลกระทบจากความกว้างของช่องอากาศ.....	70
6.4.4	ผลกระทบจากความสูงของปล่องที่ต่อต้านบนหลังคา.....	71
6.5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
6.6	รายการอ้างอิง.....	73
7.	การศึกษาเชิงตัวเลขของปัจจัยกระทบต่อปริมาณการระบายอากาศแบบธรรมชาติ	
	ในอาคารด้วยระบบปล่องแคบ.....	75
7.1	บทคัดย่อ.....	75
7.2	บทนำ.....	75
7.3	แนวทางการดำเนินการวิจัย.....	78
7.3.1	การทดสอบ โปรแกรม.....	78
7.3.2	ลักษณะของระบบปล่องแคบที่ทำการศึกษา.....	79
7.4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล.....	81
7.4.1	ผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหลของช่องอากาศ.....	81
7.4.2	ผลกระทบจากการเปลี่ยนความกว้างของช่องอากาศ.....	82
7.4.3	ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา.....	83
7.4.4	ผลกระทบจากการต่อปล่องเข้ากับหลังคา.....	84
7.4.5	ผลกระทบจากการใช้หลังคาแบบราบมีปล่องกับหลังคาเอียงที่	
	ความสูงรวมเท่ากัน.....	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.5	สรุปและข้อเสนอแนะ	86
7.6	รายการอ้างอิง	86
8.	การจำลองแบบสามมิติของการระบายอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องแดด	89
8.1	บทคัดย่อ	89
8.2	บทนำ	89
8.3	แนวทางการดำเนินการวิจัย	92
8.3.1	การสอบเทียบโปรแกรม	92
8.3.2	ลักษณะของอาคารต้นแบบ	92
8.4	ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	94
8.4.1	ผลกระทบจากการมุมเอียงของหลังคา	94
8.4.2	ผลกระทบจากความสูงปล่อง	94
8.4.3	ผลกระทบจากตำแหน่งของปล่องบนหลังคา	95
8.4.4	ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด	96
8.4.5	ผลลัพธ์จากการจำลองการไหลผ่านบ้านต้นแบบใน 2 มิติ และ 3 มิติ	96
8.5	สรุปและข้อเสนอแนะ	97
8.6	รายการอ้างอิง	97
9.	Enhancement of Roof Solar Chimney Performance for Building Ventilation	100
9.1	Abstract	100
9.2	Introduction	100
9.3	Methodology	102
9.4	Result and Discussion	105
9.4.1	Effects of Channel Expansion Angles	105
9.4.2	Effects of Air Gap	106
9.4.3	Effects of Roof Inclinations	107
9.4.4	Effects of Chimney Attachment	108
9.4.5	Chimney V.S. No Chimney	109
9.5	Conclusions	111
9.6	References	111

สารบัญ (ต่อ)

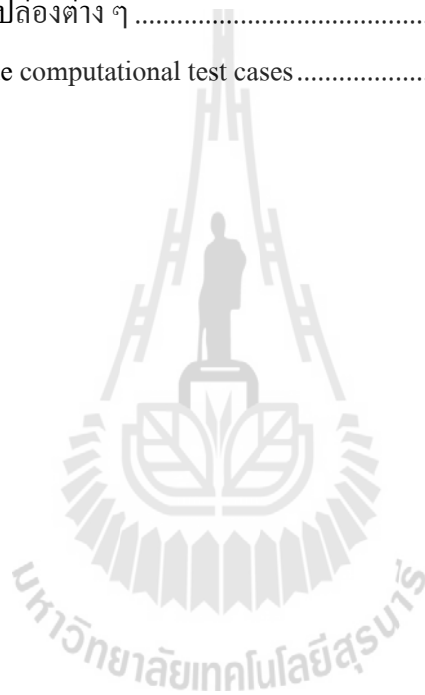
หน้า

10. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	114
10.1 บทสรุป	114
10.2 ข้อเสนอแนะ	115
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหล โดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง.....	117
ภาคผนวก ข การทดสอบโปรแกรม ANSYS CFX.....	128
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์มิติและความเสมือนของระบบปล่องแดด	142
ภาคผนวก ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปล่องแดด	148
ประวัติผู้เขียน	157



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัสดุที่ใช้สำหรับ RSC แต่ละรูปแบบ	23
8.1 ผลลัพธ์ที่ตำแหน่งของปล่องต่าง ๆ	100
9.1 Conclusions used in the computational test cases	104



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การพาอิสระของแก้วน้ำร้อน8
2.2	การพาอิสระของวัตถุเย็น9
2.3	การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง..... 13
3.1	รูปแบบของหลังคา (ก) หลังคาเอียงแบบดั้งเดิม (ข) หลังคาสองชั้น32
4.1	ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบสมมาตร35
4.2	สถานะเริ่มต้นของการไหลแบบการพาความร้อนอิสระ.....36
4.3	ผลลัพธ์จากการทดสอบโปรแกรม37
4.4	ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบไม่สมมาตร39
4.5	กราฟแสดงค่าส่วนตกค้าง 40
4.6	ผลลัพธ์ที่ $\dot{Q} = 300 \text{ W/m}^2$, $h_c = 3 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$42
4.7	เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบสมมาตร (เส้นตามลูกศร)42
4.8	การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูล 43
4.9	การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูล43
4.10	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูล..... 44
4.11	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูล 44
4.12	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความสูงของปล่อง45
4.13	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับมุมเอียงของหลังคา46
4.14	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความกว้างของปล่อง.....47
4.15	อัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด47
4.16	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด48
4.17	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความสูงของปล่อง.....49
4.18	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคา.....49
4.19	ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความเข้มของแสงแดด.....50
5.1	ความเร็วไว้มิติที่คำนวณได้จากโปรแกรม ANSYS CFX เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ55
5.2	อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ANSYS CFX เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ55
5.3	ลักษณะและองค์ประกอบของปล่องแดด.....56
5.4	อัตราการไหลเชิงมวลที่มุมบานต่าง ๆ.....57
5.5	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับกรณีมุมบานเท่ากับ 0°57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	58
5.7	59
5.8	59
6.1	65
6.2	65
6.3	66
6.4	66
6.5	68
6.6	68
6.7	69
6.8	69
6.9	70
6.10	71
6.11	72
6.12	72
7.1	79
7.2	80
7.3	80
7.4	81
7.5	82
7.6	83
7.7	83
7.8	84
7.9	85
7.10	86
8.1	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.2 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคาที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	94
8.3 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความสูงของปล่องที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	95
8.4 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความเข้มแสงแดด	96
9.1 Comparison of velocity and temperature profiles	103
9.2 Schematic of the roof solar chimney	104
9.3 Air mass flow rates per projected area of roof due to channel expansion angle ($L = 1 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$, $d = 14 \text{ cm}$)	106
9.4 Air mass flow rates per projected area of roof due to air gap variation ($L = 1 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$)	107
9.5 Air mass flow rates per projected area of roof due to roof length and roof angle ($\dot{Q} = 650 \text{ W/m}^2$, $\beta = 0^\circ$)	108
9.6 Air mass flow rates per projected area of roof due to chimney height ($d = 14 \text{ cm}$, $\dot{Q} = 800 \text{ W/m}^2$)	109
9.7 Air mass flow rates per projected area of roof due to overall height of chimney ($d = 14 \text{ cm}$, $\beta = 0^\circ$, $\dot{Q} = 800 \text{ W/m}^2$)	110

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

$\bar{\tau}$	=	Stress tensor
α	=	มุมปะทะ (angle of attack)
μ	=	Dynamics molecular viscosity
γ	=	Intermittency of turbulence
ν	=	kinetic viscosity
ω	=	Rotor speed / Specific dissipation rate = ε/k
ε	=	Turbulent dissipation rate
σ	=	ความตันของกังหัน (Solidity of rotor)
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid)
θ	=	มุมระหว่างเส้นแนวการไหลกับเส้นแนวรัศมี
β	=	มุมหัน (Azimuth angle of blade)
μ_T	=	Eddy viscosity or Turbulence viscosity
ν_t	=	kinematic eddy viscosity
a	=	Axial induction factor
A	=	Area
AR	=	Aspect ratio
BSR	=	Blade speed ratio ($\omega R/U$)
c	=	Chord length
C_D	=	Drag coefficient
C_L	=	Lift coefficient
C_N	=	Normal force coefficient
C_P	=	Power coefficient
C_T	=	Tangential force coefficient / torque coefficient
\bar{C}_f	=	Skin friction coefficient
D	=	Drag force
F	=	แรงที่กระทำกับระบบ
\vec{F}_b	=	แรงภายใน (body force)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

h	=	ขนาดกริดเฉลี่ย
H	=	Rotor height
k	=	Turbulent kinetic energy = $\overline{u'_i u'_i} / 2$
L	=	Lift force
N	=	Normal force coefficient / blade number
p	=	Apparent order
P	=	Pressure
Pr	=	Prandtl number
Q	=	Rotor torque
\vec{r}	=	Rotor radius vector
r	=	Grid refinement factor
R	=	Rotor radius
Ra	=	Rayleigh number
Re	=	Reynolds number
R_{ij}	=	ความเค้นเฉือนเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) = $-\rho \overline{u'_i u'_j}$
R^*	=	เกณฑ์การลู่เข้าของผลเฉลย
t	=	Airfoil section thickness
T	=	Tangential force
U	=	Wind velocity
W	=	Absolute velocity
y	=	Distance to nearest wall
y^+	=	Distance in wall coordinate

คำย่อ

BEM	=	Blade Element Momentum theory
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
Exp.	=	Experiment
RNG	=	Renormalized Group
S-A	=	Spallart-Allmaras turbulent model

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ

SST = Shear Stress Transport turbulent model

ตัวห้อย (Subscript)

∞ = Free stream

BE = Blade element

coarse = กริดหยาบ

d = Downwind

Dyn = Dynamics

fine = กริดละเอียด

m = Modify

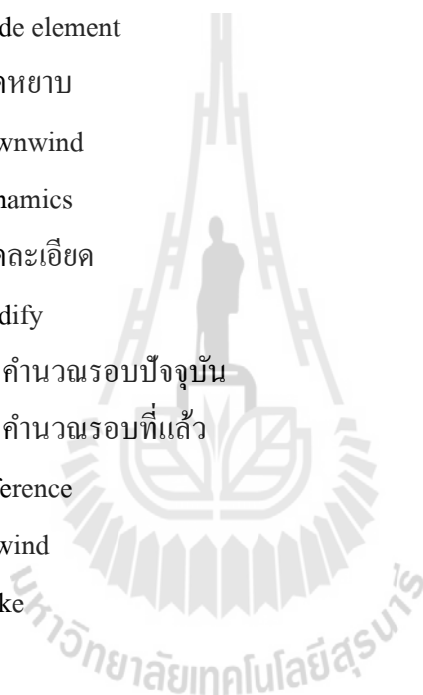
new = การคำนวณรอบปัจจุบัน

old = การคำนวณรอบที่แล้ว

ref = Reference

u = Upwind

w = Wake



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

มนุษย์ไม่เพียงต้องการที่อยู่อาศัย หากยังต้องการอยู่อาศัยภายใต้สภาวะความสบายเชิงความร้อน (thermal comfort) ด้วย การระบายอากาศและการทำความเย็นในอาคารจึงสำคัญต่อการดำรงชีวิตอย่างมีคุณภาพของมนุษย์ ตลอดจนถึงสัตว์และพืช การอยู่อาศัยภายใต้สภาวะสบายส่งผลให้มนุษย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัตว์เลี้ยงจะมีสุขภาพและมีการเจริญเติบโตที่ดีหากเลี้ยงในสภาวะอากาศที่เหมาะสม การเพาะเห็ดในโรงเรือน หากมีการระบายอากาศที่ดี มีอุณหภูมิและความชื้นที่พอเหมาะย่อมทำให้มีอัตราการงอกและการเจริญเติบโตที่ดี การระบายอากาศและการทำความเย็น โดยการใช้เครื่องปรับอากาศ หรือพัดลมนั้น ทำให้สูญเสียพลังงานและค่าใช้จ่าย และยังส่งผลให้เกิดมลพิษทั้งทางอากาศและทางเสียง นอกจากนี้ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการซ่อมแซมบำรุงรักษาอุปกรณ์อีกด้วย

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สภาวะความสบายเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แตกต่างกันไปตามสิ่งแวดล้อมและความเคยชินของผู้อาศัย สภาวะความไม่สบายเชิงความร้อน (thermal discomfort) ของผู้อยู่อาศัยในเขตสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (hot and humid climate) ส่วนใหญ่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่ภายในตัวอาคารผ่านหลังคา ผนัง หรือหน้าต่างของอาคาร ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ดังนั้นเพื่อความสบายในการอยู่อาศัย มนุษย์จึงใช้เครื่องจักรกลซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น พัดลม หรือเครื่องปรับอากาศ ในการปรับสภาวะของอากาศภายในอาคารให้มีความเหมาะสมต่อความสบายของผู้อยู่อาศัย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าทั้งยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

ในอดีต สิ่งปลูกสร้างสำหรับอยู่อาศัยของคนไทยมีรูปร่างลักษณะที่เอื้อให้เกิดการระบายอากาศแบบธรรมชาติที่ดี เช่น มีใต้ถุนสูง หน้าจั่วของหลังคามีรูปทรงเป็นมุมแหลม และมีจำนวนหน้าต่างหรือช่องลมมาก ทำให้ลมสามารถพัดผ่านได้โดยง่าย ผู้อยู่อาศัยจึงรู้สึกเย็นสบายโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องปรับอากาศ ประกอบกับความร่มรื่นรอบ ๆ บริเวณบ้านยังมีอยู่มาก ลมที่พัดจึงนำความเย็นเข้ามาด้วย ทำให้รู้สึกสบายยิ่งขึ้น

ปัจจุบัน อากาศร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี อันเนื่องมาจากการตัดไม้ทำลายป่าทำให้ปริมาณต้นไม้ที่สร้างความร่มรื่นมีจำนวนลดน้อยลง อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจึงสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน อุณหภูมิของอากาศอาจสูงถึง 40°C นอกจากนี้ ลักษณะของอาคารแบบใหม่ที่มีการรับเอาสถาปัตยกรรมจากตะวันตกมาผสมผสานกับลักษณะอาคารรูปแบบเดิม โดยมีมูลเหตุจูงใจด้านความสวยงามภายนอกเป็นหลัก จึงลืมนำถึงความรู้สึกสบายในการอยู่อาศัย ลักษณะของอาคารรูปแบบใหม่ในปัจจุบันส่วนใหญ่

เป็นบ้านแบบ 1 ชั้น หรือ 2 ชั้น ที่ไม่มีใต้ถุนบ้านดังเช่นในอดีต วัสดุที่ใช้ในการปลูกสร้างส่วนใหญ่ทำจากคอนกรีตซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนได้ดี ทำให้บ้านร้อนขึ้น โดยเฉพาะในตอนกลางคืน ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่มีแสงแดดตกกระทบอาคารแล้ว แต่การปลดปล่อยความร้อนที่ดูดซับไว้ในเวลากลางวันของผนังอาคารทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกร้อนอบอ้าว

แนวทางหนึ่งที่สามารถลดปริมาณความร้อนที่อาคารได้รับจากแสงอาทิตย์โดยหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าคือการใช้ระบบระบายความร้อนแบบพาสซีฟ (passive cooling) เช่น การใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอ่างน้ำบนหลังคา (pond roof) หรือการใช้ปล่องแสงแดด (solar chimney) ซึ่งเป็นการระบายอากาศแบบธรรมชาติ หรือการใช้หลักการของตัวเก็บแสงแดดแบบแผ่นราบ (flat plate solar collector) โดยปกติจะประยุกต์เข้ากับผนังหรือหลังคาของอาคาร ซึ่งบางครั้งก็ถูกเรียกว่าปล่องแสงแดดเช่นเดียวกันเพราะมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับปล่องแสงแดด คือใช้หลักการของอากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้น และอากาศเย็นกว่าเข้ามาแทนที่ตามหลักของการพาอิสระ (free convection) ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านอาคาร งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคารผ่านกระบวนการพาอิสระ โดยใช้พลังงานจากแสงแดดทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (green house effect) ขึ้นภายในห้องหลังคาของอาคารต้นแบบที่มีหลังคาทำจากวัสดุโปร่งใส (เช่น กระจกหรือพลาสติก เป็นต้น)

การศึกษาผ่านการทำการทดลองนับเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องลงทุนสร้างอาคารขึ้นจริง อีกทั้งยังยากต่อการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์บางตัว ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงได้ยากและใช้เวลานาน ตลอดจนไม่สามารถควบคุมปัจจัยหรือเงื่อนไขภายนอกเพื่อศึกษาถึงบางสถานการณ์ได้ ส่วนการศึกษาเชิงทฤษฎีนั้น ความยากอยู่ที่การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์และการเลือกใช้สมมุติฐานที่เหมาะสม การศึกษาเชิงตัวเลข คือ การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณหาคำตอบของปัญหา ซึ่งในปัจจุบันได้เข้ามามีบทบาทและก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมาก ในแขนงวิชากลศาสตร์ของไหล คอมพิวเตอร์สามารถช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน ตลอดจนตัวแปรทางเทอร์โมฟิสิกส์อื่น ๆ เรียกว่า พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) วิธีนี้เป็นวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลผสมผสานกับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) โดยทำการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ (partial differential equations) ซึ่งเป็นสมการที่ควบคุมการไหล ก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ ทำให้นักวิจัยสามารถเข้าใจถึงปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถปรับปรุง คัดแปลงรูปแบบของการออกแบบในคอมพิวเตอร์จนกระทั่งได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจก่อนที่จะนำไปสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ หรือทำการทดลองเพื่อย้ำความมั่นใจต่อไป นอกจากนี้ กระบวนการออกแบบด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลดังกล่าว ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาลงไปเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการทดลองแต่เพียงอย่างเดียว เพราะช่วยในการวิเคราะห์และลดขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองหรือในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดลองได้ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ลงไปรายละเอียดของการไหลในบางบริเวณเพื่อหาผลลัพธ์และข้อมูลที่ต้องการความสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป ANSYS CFX เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการระบายอากาศภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อ เช่น ความเข้มของแสงแดด ความกว้างของช่องอากาศ มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง และที่สำคัญคือ การบานตัวของช่องอากาศ โดยการทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางออกของห้องหลังคามากกว่าพื้นที่หน้าตัดทางเข้า ซึ่งเป็นประเด็นใหม่ที่ยังไม่พบเห็นจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 1 มิติ เพื่อประเมินหาค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอาคาร เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงอัตราการระบายอากาศในอาคารต่อไป นอกจากนี้ เนื่องจากปัญหาการระบายอากาศด้วยระบบปล่องแดดเป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรมาก ไม่ว่าจะเป็น ความเข้มของแสงแดด และตัวแปรเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบปล่องแดด เช่น ความยาวของปล่องแดด มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง ความกว้างของช่องอากาศ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์มิติและความเสมือนของปัญหา เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้เหลือเป็นกลุ่มตัวแปร ช่วยลดกรณีศึกษาให้น้อยลงได้

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาผลอิทธิพลของปัจจัยโครงสร้าง (geometry parameters) ของอาคาร ต่อการถ่ายเทอากาศโดยการไหลแบบการพาอิสระด้วยระบบห้องหลังคาและปล่อง

1.3.2 เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางทำให้เกิดการระบายอากาศและการทำความเย็นในอาคารที่ดีที่สุด และใช้เป็นแนวทางในการสร้างอาคารต้นแบบต่อไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยการจำลองปัญหาการไหลผ่านอาคารด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1.4.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองการไหล

- เป็นการไหลในช่วงราบเรียบ (laminar flow) เพราะการไหลภายในอาคารเป็นการไหลที่ถูกขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัว ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และมีค่าเลขเรโนลด์ในการไหลต่ำ จึงสามารถอนุมานให้เป็นการไหลในช่วงราบเรียบได้

- เป็นการไหลแบบมีความหนืด (frictional flow)

- เป็นการไหลภายใต้สภาวะคงตัว (steady state flow) โดยมีเหตุผลคือ ได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นเวลานานพอสมควร จึงสามารถอนุมานว่าการไหลเข้าสู่สภาวะคงตัวได้

- เมช (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณเป็นระบบเมชแบบไร้โครงสร้าง (unstructured-mesh) ที่มีการปรับขนาดของเมชตามค่าความเข้มของการไหล

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

- สมมุติให้ผนังและพื้นเป็นฉนวนสมบูรณ์ (adiabatic) ในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหลในภาพรวม เช่น เส้นทางการไหล และการกระจายความเร็ว การจำลองการไหลในเบื้องต้น จึงสมมุติให้ผนังและพื้นเป็นฉนวนสมบูรณ์ ซึ่งจะมีความผิดพลาดเล็กน้อยที่ยอมรับได้

- ไม่พิจารณาการสูญเสียจากผนังหรือกรอบอาคาร

- ไม่พิจารณาการไหลเนื่องจากลม

- ใช้ Boussinesq approximation โดยวิเคราะห์จากการทดสอบโปรแกรมว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้การประมาณการนี้เหมาะสมแล้ว ซึ่งจะกล่าวเหตุผลโดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 3

1.4.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ศึกษาผลกระทบต่อค่าอัตราการไหลของอากาศผ่านอาคารจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ความเข้มของแสงแดด : $500 - 1000 \text{ W/m}^2$ (เพิ่มครั้งละ 100 W/m^2)

- มุมเอียงของหลังคา : $15^\circ - 60^\circ$ (เพิ่มครั้งละ 15°)

- ความกว้างของช่องอากาศ : $4 - 20 \text{ cm}$ (เพิ่มครั้งละ 2 cm) และ $30 - 60 \text{ cm}$ (เพิ่มครั้งละ 10 cm)

- ความสูงของปล่อง : $0 - 1.5 \text{ m}$ (เพิ่มครั้งละ 0.25 m)

- มุมบานของช่องอากาศ (β) : $1^\circ - 12^\circ$ (เพิ่มครั้งละ 1°)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

1.5.1 เป็นประโยชน์ต่อประชาชนในกลุ่มเป้าหมาย (เช่น ประชาชนทั่วไป พนักงานในอาคารเกษตรกรที่เพาะเห็ด หรือเลี้ยงสัตว์เศรษฐกิจในอาคาร)

1.5.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต (เพราะทำให้พนักงาน พืช สัตว์ มีสุขภาพดี และมีความสุขในการดำรงชีวิต หรือ ทำงาน)

1.5.3 นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ (สามารถผลิตอุปกรณ์หรือแนวคิดในรูปแบบสิทธิบัตรได้ทั้งในและต่างประเทศ)

1.5.4 เป็นองค์ความรู้ในการดำเนินการวิจัยต่อไป (จะใช้เป็นข้อมูลในการสร้างอาคารต้นแบบต่อไป)

1.5.5 อื่น ๆ ดังนี้

- ช่วยลดการขาดดุลการค้ากับต่างประเทศ
- ลดการใช้พลังงานของประเทศ
- ลดมลภาวะที่เกิดจากการใช้พลังงาน
- ลดมลภาวะจากเสียงของเครื่องจักร (เนื่องจากอุปกรณ์นี้ไม่มีเครื่องจักร)

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ บ้านเรือน อาคารที่พักอาศัย และอาคารสำนักงานทั่วไป อาคารที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น โรงเครื่องมือกล เป็นต้น อุตสาหกรรมการเกษตร เช่น โรงบ่มเพาะเห็ด โรงเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

การระบายอากาศด้วยระบบปล่องแสงแดดนี้ การไหลของอากาศภายในระบบและอาคารเป็นการไหลที่เกิดจากแรงลอยตัวเป็นสำคัญ ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกันกับการพาอิสระ (free convection) เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า หรือเรียกว่า ระบบแบบพาชีฟ ในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาเพียงการไหลที่เกิดจากแรงลอยตัว (buoyancy driven flow) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่พิจารณาการไหลที่เกิดจากลม (wind driven flow) เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลที่เกิดจากแรงลอยตัวเพียงอย่างเดียวได้อย่างชัดเจน ซึ่งหากอัตราการไหล หรืออัตราการระบายอากาศที่ได้มีค่าเพียงพอต่อความรู้สึกสบายของผู้อาศัยแล้ว เมื่อนำไปประยุกต์ใช้จริง มีการระบายอากาศที่เกิดจากการไหลของลม (cross ventilation) ด้วยการเปิดหน้าต่างของบ้านหรืออาคาร เข้ามาร่วมด้วยนั้น ก็จะยิ่งช่วยส่งเสริมการระบายอากาศได้มากขึ้น

สำหรับบทนี้ เนื้อหาในส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบายอากาศแบบธรรมชาติที่เกิดจากแรงลอยตัวนี้ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มายังโลก การไหลในชั้นผิวบาง นิยามของค่าเลขไร้มิติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีของการพาความร้อนอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการประยุกต์ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นราบ เพียงแต่อาจจะมีการเรียกชื่อแตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่การเรียกชื่อของระบบจะเรียกตามลักษณะของอุปกรณ์เก็บรังสีซึ่งคล้ายปล่อง และตามส่วนของอาคารที่นำอุปกรณ์เก็บรังสีไปติดตั้ง เช่น หลังคา หรือผนังอาคาร จึงมักถูกเรียกว่า ระบบห้องหลังคาแสงอาทิตย์ ระบบห้องหลังคาและปล่องแดด หรือระบบปล่องแสงแดด เป็นต้น ทฤษฎีที่เกี่ยวกับงานวิจัยมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2 การระบายอากาศ

สภาวะอากาศที่เหมาะสมกับความรู้สึกสบายของคนไทยจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 23-24°C ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 55% (เกชา ชีระ โกเมน, www, 2000) ซึ่งทั้งอุณหภูมิและความชื้นต่างเป็นเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกัน หากอุณหภูมิภายในห้องที่พิจารณามีค่าสูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ก็จะมีค่าลดลง

หรือถ้าห้องนั้นมีอุณหภูมิลดลง ความชื้นสัมพัทธ์ก็จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากนิยามของความชื้นสัมพัทธ์คือ สัดส่วนปริมาณไอน้ำในอากาศต่อปริมาณไอน้ำอิ่มตัว (ณ ความดันอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น ๆ) ดังนั้น ในการกำหนดสภาวะอากาศจึงต้องระบุทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ควบคู่ไปด้วยกันเสมอ นอกจากนี้ ยังพบว่า นอกจากสภาวะอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นเป็นอย่างมากแล้ว ยังขึ้นกับความเร็วลมที่พัดผ่านร่างกายอีกด้วย ตัวอย่างเช่น หากลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้ต่ำลงจากปกติ 55% เป็น 45% แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจาก 24°C เป็น 27°C คนก็อาจจะยังรู้สึกสบายได้ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงรู้สึกเย็นสบายเมื่อยืนอยู่กลางแจ้งที่มีแสงอาทิตย์จ้าที่อุณหภูมิ 35-40°C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% แต่มีลมพัดโกรก ยิ่งถ้าอยู่ใต้ร่มไม้ก็ยังสบายเพราะไม่ต้องรับแสงแดดโดยตรง จึงสรุปได้ว่า ความรู้สึกสบายเกิดจากปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากร่างกายออกสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณที่เหมาะสมกับความรู้สึกสบายของคน

สภาวะสบาย (thermal comfort) ของผู้อาศัยยังขึ้นอยู่กับปริมาณการระบายอากาศ (Air Change per Hour, ACH) ซึ่งนิยามด้วยปริมาตรของอากาศจากด้านนอกที่ไหลเข้าสู่ตัวอาคารคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง เช่น ปัจจุบันเทศบัญญัติมีกระบู่ให้อาคารจ่อครดที่ดินต้องมีปริมาณการระบายอากาศไม่น้อยกว่า 4 ACH อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบมักจะออกแบบที่ประมาณ 6 ach เนื่องจากพฤติกรรมการใช้รถที่ไม่เหมาะสม เช่น การติดเครื่องยนต์ทิ้งไว้ เป็นต้น โดยทั่วไปมักจะกำหนดค่าให้ปริมาณการระบายอากาศของห้องต่าง ๆ เป็นดังนี้

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

2.3 ดวงอาทิตย์และแสงแดด

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 $W/(m^2 \cdot K)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุเป็นสำคัญ กล่าวคือ หากของไหลไหลด้วยความเร็วสูง ย่อมหมายถึงว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงด้วย (เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลได้มากกว่า) แต่ความเร็วที่เกิดขึ้นของของไหลในการพาอิสระมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการพาโดยบังคับ (โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าน้อยกว่า 1 m/s) จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการพาอิสระส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าการพาโดยบังคับ

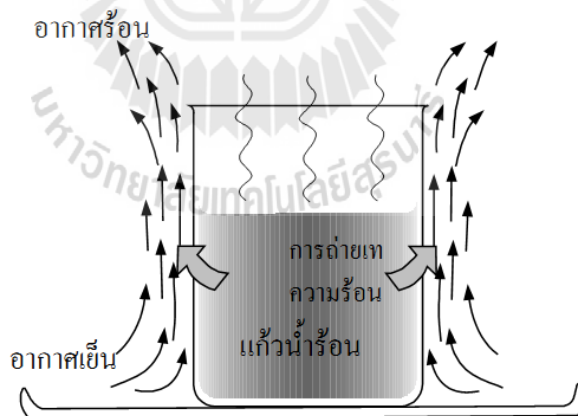
อุปกรณ์หลายอย่างมีการออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาอิสระ เพราะในการพาอิสระไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์กลใด ๆ ในการทำให้เกิดการไหลของของไหล จึงง่ายและประหยัดกว่าการพาโดยบังคับ การถ่ายเทความร้อนโดยการพาอิสระเป็นกลไกพื้นฐานที่เกิดขึ้นของกระบวนการการถ่ายเทความร้อน

ที่พบเห็นได้ทั่วไป ตัวอย่างเช่น การทำความเย็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการถ่ายเทความร้อนออกจากร่างกายของมนุษย์และสัตว์

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

2.3.1 กลไกทางฟิสิกส์ของการพาอิสระ

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

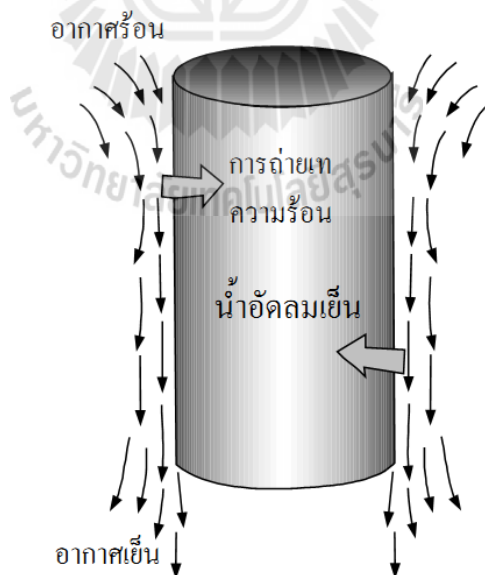


รูปที่ 2.1 การพาอิสระของแก๊วน้ำร้อน

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

อุณหภูมิของอากาศที่ล้อมรอบแก้วน้ำที่ร้อนขึ้น ทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง (หากพิจารณาที่ความดันคงที่ ความหนาแน่นของแก๊สจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ) และถูกล้อมรอบด้วยชั้นของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า ความแตกต่างของความหนาแน่นทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงดันสถิตย (hydrostatic pressure) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนให้อากาศร้อนที่ชั้นซิดผิวของแก้วน้ำลอยตัวสูงขึ้น และอากาศซึ่งเย็นกว่าด้านนอกออกไปก็จะไหลเข้ามาแทนที่ การลอยตัวขึ้นของอากาศร้อนและการไหลของอากาศเย็นเข้ามาแทนที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิของแก้วน้ำเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่แวดล้อม เรียกการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากการแทนที่อากาศร้อนด้วยอากาศเย็นบริเวณใกล้เคียงซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องนี้ว่า “กระแสการพาอิสระ (free convection current)” และเรียกการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกิดจากกระแสการพาอิสระนี้ว่า “การถ่ายเทความร้อน โดยการพาอิสระ (free convection heat transfer)”

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



รูปที่ 2.2 การพาอิสระของวัตถุเย็น

พิจารณาสนามแรงโน้มถ่วง จะเกิดแรงลัพธ์สุทธิที่ดันของไหลที่มีความหนาแน่นต่ำให้ลอยตัวขึ้น เพื่อให้ของไหลที่มีความหนาแน่นสูงกว่าเข้ามาแทนที่ แรงที่กระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ใน

ของไหลในทิศขึ้นนี้ 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 เทอมนี้จะมีค่าเท่ากับปริมาตรทั้งหมดของวัตถุนั้น)

หากยังไม่พิจารณาถึงแรงอื่น ๆ ที่กระทำต่อวัตถุแล้ว แรงสุทธิที่กระทำต่อวัตถุในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับส่วนต่างระหว่างน้ำหนักของวัตถุและแรงลอยตัว 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 แรงสุทธิแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลกับวัตถุที่จมอยู่ในของไหลนั้น 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

ตัวแปรหลักที่สำคัญสำหรับการศึกษากายความร้อน คือ อุณหภูมิ จากสมการของแรงสุทธิซึ่งเป็นฟังก์ชันของผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของไหลบริเวณใกล้กับผิววัตถุและของไหลบริเวณไกลออกไปนั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิได้ โดยใช้สมการของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (volumetric thermal expansion coefficient, β) นิยามโดย

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

และสามารถประมาณให้เทอมของอนุพันธ์พาเซียลให้เป็นเทอมผลต่างเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ได้ดังนี้

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

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 หมายถึงความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อให้อุณหภูมิเปลี่ยนไป ส่วนเทอม $\beta \Delta T$ แสดงถึงสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของไหลซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ ซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่าแรงลอยตัวแปรผันตรงกับผลต่างของความหนาแน่น ย่อมหมายถึงแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิด้วย ดังนั้น หากผลต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลบริเวณใกล้กับวัตถุกับของไหลที่บริเวณไกลออกไปมีค่ามาก ก็จะเกิดแรงลอยตัวได้มาก ทำให้เกิดการกระแสปาอิสระมากขึ้นเป็นสัดส่วนกัน 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

2.3.2 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 = ความยาวคุณลักษณะของโครงสร้าง, m
 ν = ความหนืดจลนศาสตร์ของของไหล, m^2/s

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

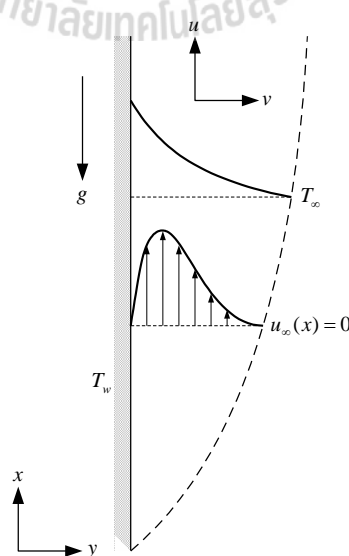
อัตราการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของของแข็งสู่ของไหลที่อยู่โดยรอบในการไหลแบบการพาอิสระสามารถคำนวณได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการ

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

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายเท และ h คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นั้น ๆ

2.3.3 การพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

ปัญหาการไหลพื้นฐานของการไหลแบบการพาอิสระ คือ ปัญหาการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งซึ่งมีอุณหภูมิของแผ่นร้อนคงที่ การไหลในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นผิวบาง (boundary layer) ของการไหลขึ้น โดยมีจุดเริ่มต้นที่ขอบนำ (leading edge) ของแผ่นร้อน พิจารณาให้อากาศโดยรอบของแผ่นร้อนเป็นอากาศนิ่ง (ความเร็วเท่ากับศูนย์) และมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ระยะไกล (T_∞) ที่พื้นผิวของผนังมีเงื่อนไขการไหลเป็นแบบไม่ลื่นไถล (no-slip condition) ดังนั้น ความเร็วของอากาศตำแหน่งนี้จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ (พิจารณาให้แผ่นร้อนหยุดนิ่ง) ความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างแผ่นร้อนกับอากาศที่ระยะไกลทำให้เกิดแรงลอยตัว ส่งผลให้อากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้น ความเร็วสูงสุดของอากาศร้อนเกิดในช่วงของชั้นผิวบาง และเข้าสู่ศูนย์อีกครั้งที่ความหนาของชั้นผิวบาง (boundary layer thickness) พอดี ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนอุณหภูมิของอากาศจะมีค่าสูงสุดที่ผิวของแผ่นร้อนซึ่งเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นร้อน (T_s) พอดี และลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่แวดล้อมที่ความหนาของชั้นผิวบางเช่นกัน การเกิดชั้นผิวบางนี้ในช่วงแรกจะเป็นแบบราบเรียบ และหากความยาวของแผ่นร้อนมีค่ามากพอก็อาจจะก่อให้เกิดชั้นผิวบางในช่วง transition และ turbulent ได้ ขึ้นอยู่กับค่าเลขกราชอฟของการไหล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวของแผ่นร้อนและผลต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างแผ่นร้อนกับของไหลที่ระยะไกล



รูปที่ 2.3 การไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

2.3.4 สมการชั้นผิวบาง (The Boundary-Layer Equations)

สมการของปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งมีรูปแบบเช่นเดียวกับสมการแม่บทของการไหลในชั้นผิวบาง (the governing boundary-layer equations) ของแผ่นในแนวนอน ยกเว้นแต่ว่าในสมการของปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้งจะมีเทอมของแรงลอยตัวเพิ่มเข้ามาในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

หากพิจารณาให้ของไหลเป็นของไหลที่ไม่อัดตัว สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน 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, X) ของของไหล

สมการชั้นผิวบางดังแสดงในสมการ (2.9) นั้นเป็นสมการที่ได้จากการพิจารณาให้ของไหลเป็นของไหลที่ไม่มีการอัดตัว ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าของไหลที่ไม่อัดตัวคือของไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่น ข้อมหมายถึงจะไม่เกิดแรงลอยตัวของของไหลส่งผลให้ไม่มีการพาอิสระเกิดขึ้น 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) ความดันภายในช่วงของชั้นผิวบางจะเหมือนกับความดันของของไหลนิ่งที่อยู่ห่างออกไปจากชั้นผิวบาง 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 สมการอนุพันธ์โมเมนตัมภายในชั้นผิวบางจะกลายเป็น

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

หากเราลดสมการด้วยค่าความหนาแน่นที่สมมติให้เป็นค่าคงที่ (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

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

โดยอุณหภูมิที่แทนค่าต้องเป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

เทอมของแรงลอยตัวจะปรากฏในสมการโมเมนต์ที่นั่น 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 จะเห็นว่าสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทางกรไหลจะเกี่ยวพัน (couple) กับสมการอนุรักษ์พลังงาน เพราะมีตัวแปรอุณหภูมิที่ติดอยู่กับเทอมของแรงลอยตัว นอกจากนี้สมการอนุรักษ์พลังงานยังเกี่ยวพันอยู่กับสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลด้วยตัวแปรความเร็ว u และ v ที่ปรากฏในเทอม การพา (convection term)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการระบายอากาศแบบธรรมชาติอย่างเป็นระบบมีตั้งแต่ทศวรรษที่ 20 เป็นต้นมา ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านจากหลายประเทศทำการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อการอยู่อาศัยที่รู้สึกสบาย และส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัย ทั้งยังช่วยประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติส่วนใหญ่จะศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากการทำให้เกิด stack effect โดยการทำให้มีช่องทางเข้าและทางออกของอากาศที่อยู่ต่างระดับกัน ดังได้กล่าวไว้ในส่วนต้นของบทนี้ การใส่ปล่องหรือช่องอากาศเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเกิด stack effect ที่นักวิจัยให้ความสนใจและทำการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ความแตกต่างของงานวิจัยส่วนใหญ่อยู่ที่การออกแบบลักษณะของปล่อง หรือลักษณะของอาคาร เช่น ความสูงหรือขนาดของปล่อง ความเอียงของหลังคา ขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดต่าง ๆ เป็นต้น โดยมีทั้งการศึกษาเชิงตัวเลข และเชิงทฤษฎี ตลอดจนการทำทดลอง ดังตัวอย่างงานวิจัยที่จะทำการนำเสนอต่อไปนี้

พบบงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ 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 หลังคาเรียบแดด (transparent roof) ซึ่งยกตัวสูงอยู่เหนือระดับพื้นดิน, กังหันเทอร์ไบน์ (turbine) ติดตั้งไว้ภายในปล่องบริเวณที่มีความเร็วของอากาศสูงที่สุด และปล่อง (chimney) ที่มีลักษณะเป็นปล่องทรงกระบอกวางตัวอยู่ตรงกลางของหลังคาเรียบแดดพอดี หลักการทำงานของระบบปล่องลมแดดอย่างกว้าง ๆ คือ การใช้พลังงานแสงแดดเพื่ออุ่นอากาศใต้หลังคาเรียบแดดให้ร้อนขึ้นโดยปรากฏการณ์เรือนกระจก จากนั้นอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นเข้าไปในปล่องลมตามหลักการของการพาอิสระ อากาศที่ลอยตัวสูงขึ้นด้วยความเร็วนี้จะถ่ายเทพลังงานจลน์ให้กับกังหันเทอร์ไบน์ซึ่งสามารถนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อไป จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการแสวงหาแหล่ง

พลังงานทดแทนแหล่งใหม่ที่ราคาถูก ประหยัด และสะอาดปราศจากมลพิษ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นประโยชน์ของการใช้ปล่องลมแดดในด้านอื่นนอกเหนือจากการใช้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศภายในอาคาร

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) (เป็นแบบจำลองที่สมมุติให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง 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) กำหนดให้ระยะห่างในแนวตั้งระหว่างช่องเปิดทั้งสองของแบบจำลองที่ทำการศึกษาเท่ากับ 6 m และสมมุติให้ผนังทุกด้านเป็นผนังฉนวนสมบูรณ์ 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 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เกิดความขัดแย้งกัน นั่นคือ จาก ‘fully mixed’ model จะให้ค่า neutral level height คงที่และมีค่าน้อยที่สุดไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงพื้นที่ช่องเปิดเป็นเท่าใดก็ตาม ส่วนจากแบบจำลองอื่น ๆ ที่เหลือ พบว่าค่านี้เพิ่มขึ้นเมื่อให้พื้นที่ช่องเปิดเพิ่มขึ้น และ ‘emptying water-filling box’ model จะให้ค่านี้ออกมาสูงที่สุด

สำหรับงานวิจัยนี้จะเห็นว่าไม่มีการกล่าวถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้อง และที่น่าแปลกคือ การจำลองให้แหล่งความร้อนหรือแหล่งกำเนิดแรงลอยตัวไว้ที่พื้นด้านล่าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว งานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการกำหนดให้แหล่งความร้อนอยู่ส่วนบนของอาคาร เช่น หลังคา หรือปล่อง เพราะเป็นส่วนที่จะได้รับความร้อนจากแสงแดดได้มากที่สุด

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

Chen and Li (2002) ศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อหาสมการในการหาค่า SIL และอัตราการไหลของอากาศของระบบการถ่ายเทอากาศด้วยการไหลจากแรงลอยตัว ลักษณะของอาคารที่ทำการศึกษาคืออาคารห้องเดี่ยวที่มีช่องเปิดทั้งหมด 3 ระดับด้วยกัน โดยมีอากาศไหลเข้าผ่านช่องเปิดด้านล่างของผนังด้านซ้าย และไหลออกที่ช่องเปิดด้านบนที่อยู่บนเพดานเสมอ ส่วนช่องเปิดกลางที่อยู่ผนังด้านเดียวกับทางเข้านั้นอากาศอาจจะไหลเข้าหรือไหลออกก็ได้ขึ้นอยู่กับความสูงจากพื้นของตำแหน่งช่องเปิดกลางและตำแหน่งของการเกิด neutral pressure level ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกับกรณีทดสอบ 3 กรณี คือ 1) ให้ตำแหน่งของ

ช่องเปิดกลางอยู่ใต้ SIL ในกรณีนี้อากาศจะไหลเข้าผ่านช่องเปิดกลาง 2) ให้ตำแหน่งของช่องเปิดกลางอยู่เหนือ SIL แต่อยู่ใต้ the neutral pressure level ซึ่งในกรณีนี้อากาศจะไหลเข้าผ่านช่องเปิดกลาง และ 3) ให้ตำแหน่งของช่องเปิดกลางอยู่เหนือ SIL และ the neutral pressure level กรณีนี้อากาศจะไหลออกผ่านช่องเปิดกลาง โดยศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่า SIL พบว่า ค่า SIL จะเป็นฟังก์ชันของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับ โครงสร้าง (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) คณะวิจัยกล่าวว่าความยากของการออกแบบระบบอยู่ที่การควบคุมปริมาณการไหลของอากาศ และการเคลื่อนที่ของอากาศภายในอาคาร จากผลลัพธ์พบว่าหากไม่พิจารณาการถ่ายเทที่เกิดจากแรงลมแล้ว การไหลเนื่องจากแรงลอยตัวสามารถถ่ายเทอากาศผ่านช่องเปิดได้อย่างพอเพียง และสามารถลดระดับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

Bender and Stowell (1998) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในโรงนา โดยการสร้างปล่องไวนบนหลังคา โรงนาที่ทำการศึกษามี 2 ชั้น ชั้นล่างของโรงนาใช้เป็นคอกของสัตว์เลี้ยง เช่น หมู วัว เป็นต้น ส่วนชั้น 2 ที่ติดกับหลังคาใช้เพื่อเก็บผลผลิตและอาหารสัตว์ เช่น หญ้า เป็นต้น ในงานวิจัยกล่าวถึงการวิเคราะห์หาจำนวนปล่องที่เหมาะสมต่อการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติอย่างเพียงพอต่อขนาดของโรงนา โดยไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างปล่อง เช่น ความสูง และขนาดของปล่อง นอกจากนี้ยังไม่พิจารณาถึงความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านช่องเปิดในส่วนล่างของโรงนา จนกระทั่งไหลออกที่ปล่อง และไม่กล่าวถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโรงนาแต่อย่างใด ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเพิ่มหรือลดจำนวนของปล่อง หรือช่องเปิดทั้งสิ้น

Afonso and Olivera (2000) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการใช้ปล่องลมแคบ ในการช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ และปรับปรุงคุณภาพของอากาศภายในอาคาร ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดที่ได้จากการทดลอง โดยได้สร้างเซลล์ทดสอบขึ้นที่เมือง Porto ประเทศโปรตุเกส แบ่งเซลล์ทดสอบเป็น 2 ห้อง แต่ละห้องทดสอบประกอบด้วยปล่องทางเข้าและปล่องทางออกของอากาศซึ่งอยู่ด้านบนของหลังคา ปล่องทางออกของแต่ละห้องทดสอบมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ยกเว้นที่ผนังด้านทิศใต้ของปล่องทางออกอันหนึ่งจะทำจากกระจก เรียกปล่องที่มีผนังด้านทิศใต้ทำจาก

กระจกนี้ว่า ปล่องลมแดด ส่วนปล่องทางออกของห้องทดสอบที่เหลือนี้อีกมีลักษณะเหมือนปล่องธรรมดาทั่วไป (conventional chimney) พื้นของเซลล์ทดสอบมีขนาดเท่ากับ 12 m^2 ($4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$) ผนัง เพดาน และพื้นทำจากคอนกรีต และด้านนอกหุ้มด้วยฉนวน 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 และสองคือมีการพิจารณาการสะสมพลังงานความร้อนภายในผนังของปล่องต่อระบบในขั้นตอนของการวิเคราะห์ได้กำหนดให้ความดันลอยตัว (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 (จะเห็นว่าในความเป็นจริงการแยกใช้ผนังในตอนกลางวันและตอนกลางคืนออกจากกันกระทำไม่ได้ยาก โดยหากต้องการให้เกิดการถ่ายเทในตอนกลางคืนได้มากขึ้นก็ต้องใช้ผนังที่หนาตั้งแต่ในตอนกลางวันเพื่อทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนไว้เพื่อปลดปล่อยออกในตอนกลางคืน แต่ก็ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทในตอนกลางวันลดลง และหากใช้ผนังบางในตอนกลางวันก็จะส่งผลตรงกันข้าม)
- ความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่าน้อยมาก ทั้งในวันที่มีความเข้มข้นของแสงแดดน้อยและวันที่มีความเข้มข้นของแสงแดดมาก ดังนั้น แบบจำลองจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้

เป็นที่น่าสังเกตว่า สมการสำหรับหาค่าความดันเนื่องจากแรงลอยตัวที่เพิ่มขึ้นนี้ค่อนข้างแตกต่างจากงานวิจัยของท่านอื่น ๆ ในแง่ของการพิจารณาเทอมเกี่ยวกับการสูญเสียที่มีต่อระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่

แล้ว หากเป็นงานวิจัยทั่วไปการศึกษาในเบื้องต้นซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงปริมาณของความสามารถของระบบ จะยังไม่พิจารณาเทอมเกี่ยวกับการสูญเสียนี้ โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก โดยเฉพาะเมื่อค่าอัตราส่วนของความสูงของปล่องต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปล่อง (L/D) มีค่าน้อยมากเช่นนี้ (น้อยกว่า 50) ดังนั้นสมมติฐานในการสร้างสมการนี้ค่อนข้างล่อแหลมต่อการเกิดความผิดพลาดของผลลัพธ์ที่ได้ แต่สุดท้ายกลับกลายเป็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองนี้มีความสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นที่น่าวิเคราะห์ต่อไปว่าเป็นเพราะเหตุใด

Delgado, Borges, and Conde (1996) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทอากาศ ตลอดจนความดันและอุณหภูมิภายในอาคารที่มีหลายชั้น โดยศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางลมและการใช้ปล่อง ลักษณะของอาคารที่ทำการศึกษาในงานวิจัยเป็นอาคาร 2 ชั้น แต่ละชั้นจะเชื่อมต่อกับสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านช่องเปิดซึ่งอยู่ด้านซ้ายของผนัง ส่วนปล่องจะวางอยู่ด้านข้างขวาของอาคารโดยปลายปล่องจะสูงกว่าอาคารเสมอ และมีช่องเปิดเชื่อมต่อกับแต่ละชั้นของอาคาร ในการจำลองกำหนดให้ชั้นล่างเป็นโรงงาน (workshop) จึงมีความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการทำงาน ส่วนชั้น 2 ของอาคารมีไว้เพื่อใช้ประโยชน์อื่น ๆ ซึ่งไม่มีความร้อนเกิดขึ้น สมมติฐานที่ใช้คือกำหนดให้อุณหภูมิภายในอาคารแต่ละชั้นมีค่าเป็นเอกลักษณะ (uniform) และเป็นการพิจารณาที่สภาวะคงตัว ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางลมโดยกำหนดให้ลมไหลจากซ้ายไปขวา (upwind) และไหลจากขวามาซ้าย (downwind) เมื่อพิจารณาที่ปลายปล่องเปิดและปิด ตามลำดับ ค่าความร้อนที่ใช้ในการจำลองมีสองระดับเพื่อศึกษาผลกระทบจากค่าความร้อดังกล่าว จากผลการจำลองพบว่า หากพิจารณาที่ค่าความร้อนสูง จะได้ว่าอัตราการถ่ายเทอากาศจะมากกว่าการถ่ายเทที่ความร้อนต่ำ 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 ที่ทำการศึกษามีสามรูปแบบ แต่ละรูปแบบได้เลือกใช้วัสดุสามารถหาได้จากท้องถิ่นและนิยมใช้กันอยู่ทั่วไปสำหรับบ้านพักอาศัยหรืออาคารในประเทศไทยในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วัสดุที่ใช้สำหรับ RSC แต่ละรูปแบบ

รูปแบบ	วัสดุที่ใช้ทำส่วนด้านบน	วัสดุที่ใช้ทำส่วนด้านล่าง
RSC – M1	กระเบื้องคอนกรีตซีแพคโมเนียร์	ไม้อัดและหุ้มด้วยอลูมิเนียมพอลิ
RSC – M2	กระเบื้องคอนกรีตซีแพคโมเนียร์	ยิปซัมบอร์ด
RSC – M3	กระเบื้องคอนกรีตซีแพคโมเนียร์	ยิปซัมบอร์ดและหุ้มด้วยอลูมิเนียมพอลิ

ทำการทดลองเพื่อเลือกรูปแบบของ RSC ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้น จากนั้นศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากปัจจัยของโครงสร้าง เช่น ความยาวและมุมเอียงของ RSC ที่มีต่ออัตราการเกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติ เมื่อกำหนดให้ความหนาของช่องว่างอากาศ (air gap) (ระยะห่างระหว่างส่วนด้านบนและส่วนด้านล่าง) เท่ากับ 14 cm พื้นที่ของ RSC เท่ากับ 2 m² (1m×2 m) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่ารูปแบบของ RSC ที่เหมาะสมที่สุดคือ RSC – M2 จากนั้นศึกษาผลกระทบจากความยาวและมุมเอียงของ RSC – M2 หากพิจารณาให้ความเข้มของแสงแดดที่ตกกระทบหลังคาซึ่งเพิ่มขนาดมุมเอียงของ 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 จึงจะก่อให้เกิดอัตราการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่มากที่สุด ค่าอัตราการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.08 m³/s·m² – 0.15 m³/s·m² และจากการคำนวณพลังงานที่ถูกสะสมโดย RSC มีค่าอยู่ระหว่าง 150 W/m² – 350 W/m² คณะวิจัยคาดว่าระบบ RSC นี้จะสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติได้ อีกทั้งยังประหยัด เพราะสามารถใช้วัสดุที่มีใช้ในท้องถิ่นอยู่แล้วในการทำโครงสร้างของระบบ

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

ชิปซัมบอร์ด์ เพื่อนำไปพิจารณาหาค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้สมมติฐานหลักดังต่อไปนี้

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

ทำการทดลองเพื่อนำผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากแบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งเป็นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่ต้องการได้อย่างมั่นใจ โดยเฉพาะสมมติฐานที่ใช้ในข้อแรกนั้นพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ยกเว้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับปลายทั้งสองด้านของ RSC (end effect) อีกทั้งพบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจากการทดลองและที่ได้จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นมีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นที่บางช่วงเวลาของวันซึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากเงื่อนไขทางภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั่วโมงของวัน เช่น อากาศมีฝนตก มีเมฆ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้ไม่สามารถนำไปร่วมพิจารณาในแบบจำลองเชิงตัวเลขได้ ภายหลังจากการเปรียบเทียบแบบจำลองเรียบร้อยแล้วจึงนำแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ของ RSC โดยพิจารณาที่ RSC ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 100 cm ขนาดของช่องว่างอากาศเท่ากับ 14 cm และกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศที่ทางเข้าและทางออกมีขนาดเท่ากัน จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าความจุความร้อนของหลังคากระเบื้องไม่มีผลต่อค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศมากนัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถจำลองปัญหาที่สภาวะคงตัว (steady state condition) ได้ และยังพบว่าค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศเป็นฟังก์ชันของมุมเอียงของ RSC และความเข้มในการแผ่รังสีของแสงแดด อย่างไรก็ตามความเอียงของ RSC ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง $20^\circ - 60^\circ$ 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 ลักษณะ โดยใช้ข้อมูลที่ได้รับการวิจัยและทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่ารูปแบบของบ้านที่มีลักษณะคล้ายบ้านทรงไทยจะก่อให้เกิดปริมาณอัตราการไหลของอากาศได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม

ตาม 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 และหน่วยควบคุม จำนวนขนาดของพัดลมและ PV module โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยของ Hirunlabh, Wachirapuwadon, Pratinthong, and Khedari (2001) โดยทำนายค่าอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 อุณหภูมิพื้นผิวของกระเบื้องซีแพค โมนาเนียร์ อุณหภูมิพื้นผิวของยิปซัมบอร์ด อุณหภูมิภายในช่องอากาศ อุณหภูมิภายในห้องเริ่มทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 06.00 น. จนถึง 18.00 น. บันทึกค่าทุก ๆ 15 นาที ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่า 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 ach ซึ่งมากกว่าการใช้ระบบระบายอากาศด้วย RSC เพียงอย่างเดียว 2 – 4 เท่า

นอกจากงานวิจัยทั้ง 3 ฉบับของ Khedari ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อขยายผลอีกจำนวนหลายฉบับ โดยได้ทำการศึกษาครอบคลุมทั้งการศึกษาถึงผลกระทบของ stack effect ในรูปแบบต่าง ๆ (Hirunlabh, Kongduang, Namprakai, and Khedary, 1999, Khedary, Mansirisub, Chaima, Pratinthong, and Hirunlabh, 2000, Khedary, Yimsamerjit, and Hirunlabh, 2002) ตลอดจนการศึกษาดังกล่าวถึงผลของการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้เป็นส่วนผสมของผนัง เช่น ใยมะพร้าว 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) การพิจารณาการเกิดความปั่นป่วนจากการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติที่การไหลเกิดจากแรงลอยตัวภายในห้องปิด (Khalifa and Sahib, 2002) การศึกษาถึงกรรมวิธีในการทำให้เกิดถ่ายเทอากาศรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน (Haves, n.d.) เป็นต้น

2.5 อ้างอิง

- เกชา ธีระโกเมน. (2000). ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมปรับอากาศ [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.thaihvac.com/knowledge/fundamental/fundamental.html>.
- Afonso, 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 barns** (Online): <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 Khedari, 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 Khedari, J. (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. **Building and Environment** 36(3): 383-391.
- Janni, K.A., and Jacobson, L.D. (1995). **Natural ventilation for poultry** [On-line]. Available: <http://www.bae.umn.edu/extens/arc/natvent.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.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.

- Khedari, J., Rawangkul, 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.
- Venkatakrisnan (1993). **Implicit Solvers for Unstructured Meshes.** Journal of Computational, 105: 83-91.

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาการระบายอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องแควนานวิจันเป็นการศึกษาเชิงตัวเลขเป็นหลัก โดยใช้โปรแกรม ANSYS CFX ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาได้หลากหลาย รวมถึงปัญหาการไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนร่วมด้วย อย่างเช่นปัญหาการระบายอากาศและทำความเย็นภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 1 มิติ เพื่อประเมินค่าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอาคาร เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงอัตราการระบายอากาศในอาคารต่อไป นอกจากนี้ เนื่องจากปัญหาการระบายอากาศด้วยระบบปล่องแควนเป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรมาก ไม่ว่าจะเป็น ความเข้มของแสงแดด และตัวแปรเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบปล่องแควน เช่น ความยาวของปล่องแควน มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง ความกว้างของช่องอากาศ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์มิติและความเสมือนของปัญหา เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องให้เหลือเป็นกลุ่มตัวแปร ช่วยลดกรณีศึกษาให้น้อยลงได้ อย่างไรก็ตาม ทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกลุ่มตัวแปร 1 มิติที่พัฒนาขึ้น ยังไม่ได้ทำการทดสอบความถูกต้อง ซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไปในอนาคต ผู้วิจัยขอสรุปงานที่ทำการวิจัยทั้งหมดเป็นลำดับได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ANSYS CFX

ถึงแม้โปรแกรมจะถูกยอมรับในความแม่นยำของการคำนวณ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำโปรแกรมไปใช้จำลองการไหลของปัญหาการไหลที่สนใจ จำเป็นต้องทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมเสียก่อน อันที่จริงขั้นตอนนี้ถือเป็นการเรียนรู้การใช้งานโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้เข้าใจในกระบวนการกำหนดค่าที่จำเป็นต่าง ๆ ในการคำนวณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คำตอบที่น่าเชื่อถือและการคำนวณที่รวดเร็วของโปรแกรมที่มากที่สุด

3.3 การศึกษาใน 2 มิติ

จากผลลัพธ์งานวิจัยเกี่ยวกับการระบายอากาศแบบธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลของอากาศขึ้นอยู่กับ ความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้าง (geometric parameters) ของระบบปล่องแควนที่นำมาใช้ เช่น ความยาวและมุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง ความกว้างของช่องว่างอากาศ เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้พลังงานแสงแดดเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติจึงควรมีการศึกษา

ที่ชัดเจนเพื่อหาแนวทางในการออกแบบระบบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดก่อนนำไปประยุกต์ใช้จริง แต่เนื่องจากตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณอัตราการไหลมีหลายตัวแปร จึงไม่เหมาะที่จะศึกษาโดยการทำการทดลอง เพราะเสียค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาด้วยกรรมวิธีเชิงตัวเลขใน 2 มิติ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป ANSYS CFX เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการระบายอากาศภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลกระทบ เช่น ความเข้มของแสงแดด ความกว้างของช่องอากาศ มุมเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง และที่สำคัญคือ การบานตัวของช่องอากาศ (β) โดยการทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางออกของห้องหลังคามากกว่าพื้นที่หน้าตัดทางเข้า ซึ่งเป็นประเด็นใหม่ที่ยังไม่พบเห็นจากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา ตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาจะมีดังต่อไปนี้

ความมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมฯ พิจารณาจาก 2 ปัจจัยหนึ่งคือ ค่าเศษตกค้าง (residual) ของสมการนาเวียร์-สโตค ตรวจสอบได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่โปรแกรมแสดงผล ซึ่งต้องลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง และมีค่าต่ำเพียงพอต่อการยอมรับ และสองคือ อัตราการไหลเชิงมวลที่แต่ละหน้าตัดต้องมีค่าเท่ากันตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) เนื่องจากเป็นการไหลในช่องทาง ดังนั้นจึงตรวจสอบโดยการคำนวณค่าอัตราการไหลบริเวณทางเข้ากับทางออกซึ่งต้องได้ค่าเท่ากัน

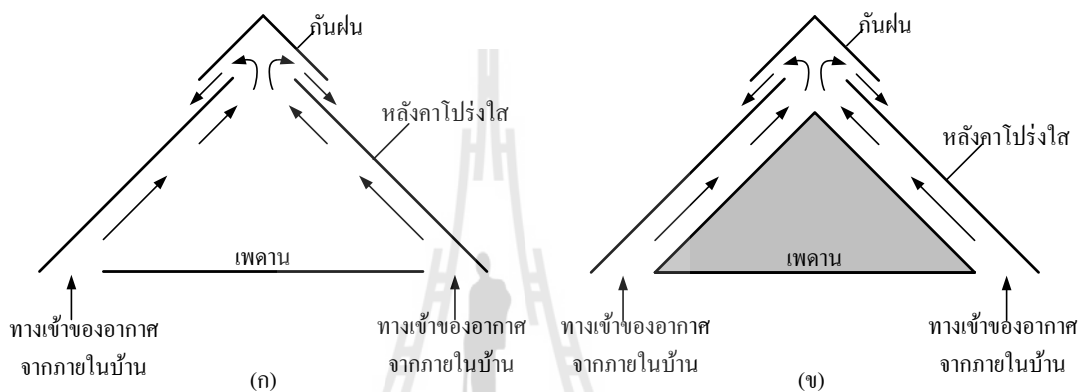
3.3.1 รูปแบบของห้องหลังคาที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติ

จากการศึกษาวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคาร พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ประยุกต์หลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บแสงแดด (solar collector) เพื่อการระบายอากาศ โดยออกแบบให้เข้ากับโครงสร้างของอาคาร เช่น หลังคา หรือผนัง เป็นต้น อุปกรณ์เก็บแสงแดดมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. วัสดุคลุมด้านนอกแบบ โปร่งใส (transparent cover): อยู่ด้านบนนอกสุด มีคุณสมบัติยอมให้แสงแดดทะลุผ่านได้มาก และป้องกันไม่ให้ความร้อนที่ดูดกลืนไว้ทะลุผ่าน
2. ช่องอากาศ (air gap): อยู่ถัดจากวัสดุโปร่งใส เป็นช่องทางเพื่อให้อากาศร้อนไหลผ่าน
3. แผ่นดูดกลืนแสงแดด (absorber plate): เป็นองค์ประกอบด้านในสุดของอุปกรณ์เก็บแสงแดด ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุที่มีค่าคุณสมบัติการดูดกลืนความร้อนสูง เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนความร้อนจากแสงแดดที่ทะลุผ่านวัสดุโปร่งใสไว้ให้มากที่สุด ก่อนที่จะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศภายในช่องอากาศต่อไป

การออกแบบลักษณะของอุปกรณ์เก็บแสงแดดเพื่อการระบายอากาศของงานวิจัยนี้จะประยุกต์เข้ากับหลังคาของอาคาร และมีปล่องต่อเข้ากับด้านบนของหลังคาเพื่อเพิ่ม stack height (เรียกขานกันว่า ระบบห้องหลังคาและปล่องแดด) โดยมีกลุ่มเป้าหมายหลักคือใช้กับบ้านพักอาศัย (อย่างไรก็ตาม สามารถประยุกต์ใช้กับอาคารอื่น ๆ ได้ เช่น โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ หรือโรงบ่มเพาะเห็ด เป็นต้น) ซึ่งส่วนใหญ่หลังคาบ้านของคนไทยจะเป็นหลังคาเอียง หากเปลี่ยนวัสดุผนังหลังคาเป็นวัสดุโปร่งใสเพื่อยอมให้แสงแดดผ่านได้มาก และเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำเพดานเป็นวัสดุที่มีค่าการดูดกลืนความร้อนสูง เช่น แผ่นโลหะทาสีดำ เป็นต้น เพดานก็จะทำหน้าที่เป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนจากแสงแดด และถ่ายเทให้กับ

อากาศที่อยู่ในห้องหลังคาต่อไป ลักษณะของหลังคาแสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบงานวิจัยใช้หลังคาปรับแสงแดดแบบหลังคาสองชั้น กล่าวคือ แผ่นดักคลื่นความร้อน วางตัวขนานกับหลังคาเอียง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งหากพิจารณาที่ขนาดโครงสร้างของหลังคาเท่ากัน แล้ว ปริมาตรของอากาศใต้ห้องหลังคาแบบสองชั้นย่อมน้อยกว่า เพื่อศึกษาว่าหลังคาแบบใดในสอง รูปแบบนี้สามารถระบายอากาศได้มากกว่า จึงจำลองการไหลผ่านหลังคาทั้งสองรูปแบบและวิเคราะห์ค่า อัตราการไหล เพื่อนำหลังคารูปแบบที่ดีที่สุดไปใช้เพื่อการวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.1 รูปแบบของหลังคา (ก) หลังคาเอียงแบบดั้งเดิม และ (ข) หลังคาเอียงสองชั้น

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าหลังคาสองชั้นสามารถระบายอากาศได้ดีกว่า ดังนั้น จากขั้นตอนนี้ไปรูปแบบของ หลังคาที่ผู้วิจัยนำไปจำลอง คือ หลังคาแบบสองชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)

3.3.2 ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการระบายอากาศ

1. ความเข้มของแสงแดด (solar insulation)
2. ความกว้างของช่องว่างอากาศ (air gap width)
3. มุมเอียงของหลังคา (tilt angle)
4. ความสูงของปล่องที่ต่อบนหลังคาเอียง (chimney height)
5. มุมบานตัวของหลังคาปรับแสงแดด (expansion angle of RSC)

3.4 การศึกษาการระบายอากาศใน 3 มิติ

สำหรับการจำลองปัญหาการไหลใน 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบ (แบบสมจริงมากขึ้น) สำหรับ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบบ้านต้นแบบ อย่างง่ายขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น มุมเอียงของ หลังคา ขนาดและความสูง ตลอดจนตำแหน่งของปล่อง ขนาดของช่องเปิดบริเวณต่าง ๆ ของอาคาร เป็นต้น และจะขยายผลการศึกษาเพื่อบ้านหรืออาคารเพื่อการอยู่อาศัยจริงต่อไป ได้เปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยต่าง ๆ เพื่อจำลองการไหลดังนี้

1. ความเข้มของแสงแดด: 500, 650 และ 800 W/m²
2. มุมเอียงหลังคา: 15, 30, 45 และ 60°
3. ความสูงปล่อง: 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 m
4. ตำแหน่งของปล่อง: ด้านเดียวกับช่องเปิดที่เพดาน, ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน, ตรงกลางของหลังคา

3.5 การวิเคราะห์หิมิตของห้องหลังคาและปล่องแดด

เป็นการสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องทำให้ลดเวลาในการทำการทดลองหรือการศึกษาเชิงตัวเลข ตัวแปรที่สนใจในที่นี้คืออัตราการไหลของอากาศ (air mass flow rate) ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงปริมาณการระบายอากาศที่เกิดขึ้น ทำการวิเคราะห์ตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหล จากนั้นจัดกลุ่มสร้างตัวแปรไร้มิติ ยืนยันผลด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS CFX รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ค

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องหลังคาและปล่องแดด

พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประเมินหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านอาคารภายใต้สมมุติฐานต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้น นั่นคือ เป็นการวิเคราะห์ใน 1 มิติ ที่สภาวะคงตัว และเป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด จัดรูปสมการที่ได้ให้อยู่ในรูปที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยง่าย รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ง

บทที่ 4

การใช้ห้องหลังคาและปล่องช่วยในการถ่ายเทอากาศ : การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.1 บทคัดย่อ

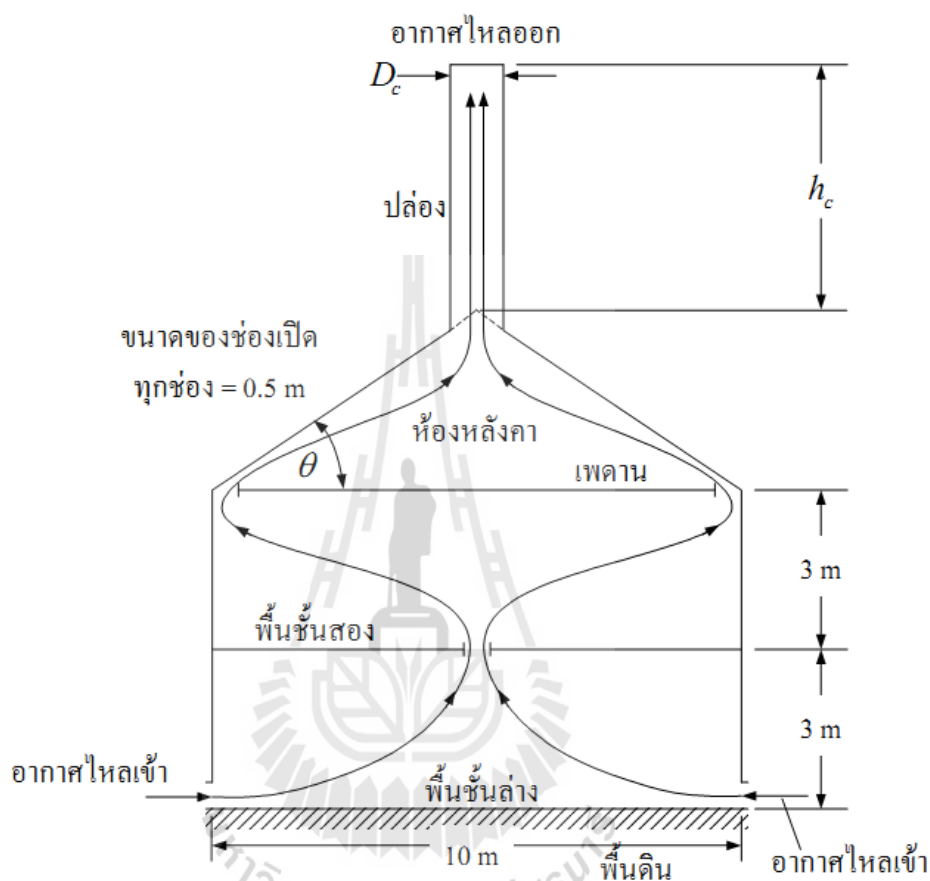
ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล CFX เพื่อประเมินศักยภาพของหลังคาที่ทำจากกระจกใสและปล่องในการช่วยให้เกิดการถ่ายเทอากาศภายในอาคารสองชั้นที่ออกแบบให้มีช่องเปิดบริเวณต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการไหลของอากาศผ่านอาคารได้อย่างทั่วถึง โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่ออัตราการไหลของอากาศ ได้แก่ มุมเอียงของหลังคา ความสูงและความกว้างของปล่อง ความเข้มของแสงแดด ตลอดจนศึกษาผลกระทบจากการออกแบบอาคารให้มีความสมมาตรและไม่สมมาตรเพื่อเปรียบเทียบผล ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้เกิดแนวทางในการเพิ่มความรู้สึกสบายในการอยู่อาศัยที่สามารถประหยัดพลังงานและไม่ทำให้เกิดมลภาวะ ทั้งนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดีกับภาคเกษตรกรรม เช่น โรงบ่มเพาะเห็ด หรือ โรงเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น

4.2 บทนำ

งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทอากาศโดยธรรมชาติได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นทางเลือกในการอยู่อาศัยภายใต้สภาวะสบายที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ ก่อนทำการทดลองควรมีการศึกษาวิจัยในเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลขเพื่อเป็นการยืนยันความมั่นใจในผลลัพธ์ นอกจากนี้กรรมวิธีเชิงตัวเลขยังทำให้มีความประหยัดและสะดวกในการศึกษา เพราะสามารถกำหนดเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมในการศึกษาได้โดยง่าย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล CFX ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก

การใช้ปล่องมาช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศโดยอาศัยหลักของการพาอิสระ ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) หรือ เพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทอากาศ (Hirunlabh, Washirapuwadon, Pratinthong and Khedari (2001), Khedari, Hirunlabh, and Bunnag (1997), Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratinthong and Hirunlabh (2000), Khedari, Ingkawanich, Waewsak and Hirunlabh (2002), Khedari, Yimsamerjit and Hirunlabh (2002)) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ศึกษาในครั้งนี้มี ความแตกต่างจากงานวิจัยที่กล่าวมาตรงที่ได้ออกแบบให้ห้องหลังคาทำขึ้นจากกระจกใส ซึ่งจะช่วยให้แสงแดดสามารถทะลุผ่านได้มากกว่าการใช้วัสดุผนังหลังคาโดยทั่วไป โดยใช้หลักการที่ว่าอากาศใต้หลังคายังร้อนยิ่งช่วยเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศ

อาคารที่ทำการศึกษานี้ในเบื้องต้นเป็นอาคารที่ออกแบบให้มีความสมมาตร มีลักษณะเป็นอาคาร 2 ชั้น ที่มีช่องเปิดให้อากาศไหลเข้าและผ่านอาคารอย่างทั่วถึง และไหลออกสู่บรรยากาศผ่านปล่องลมที่ปลายยอดของหลังคากระจกใส ลักษณะและขนาดของอาคารเป็นดังรูปที่ 4.1



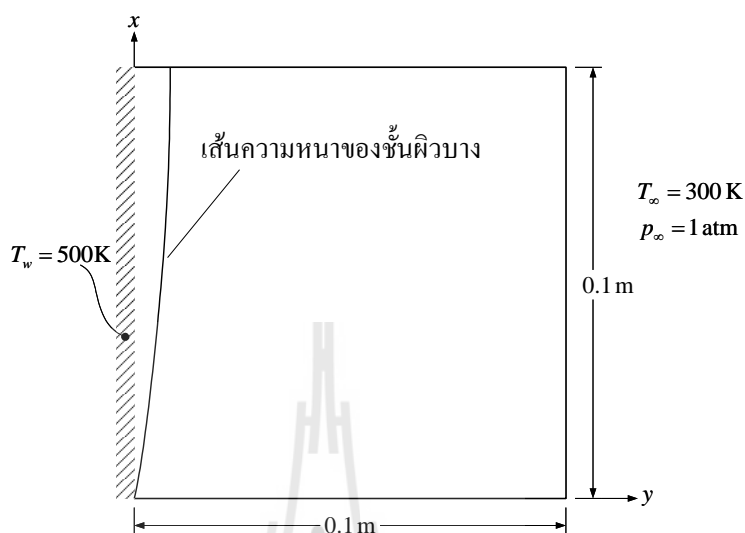
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบสมมาตร

ลักษณะการทำงาน โดยรวมของระบบการถ่ายเทอากาศผ่านห้องหลังคาและปล่อง คือ แสงแดดที่กระทบหลังคากระจกใสจะผ่านเข้าสู่ห้องหลังคาทำให้อากาศในห้องหลังคาร้อนขึ้นด้วยปรากฏการณ์เรือนกระจก อากาศร้อนที่มีความหนาแน่นต่ำนี้ก็จะลอยตัวสูงขึ้นไปผ่านปล่องลม และออกสู่บรรยากาศ อากาศจากด้านนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะไหลเข้ามาแทนที่อากาศในส่วนที่หายไป ในระหว่างที่อากาศไหลผ่านอาคารก็จะถ่ายเทความร้อนจากผู้พักอาศัยและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ภายในอาคารโดยระบบการพาความร้อนอิสระ ทำให้ผู้พักอาศัยรู้สึกสบายได้โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องปรับอากาศ

4.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เพื่อสร้างความมั่นใจในความถูกต้องแม่นยำในการคำนวณ และความมีเสถียรภาพของโปรแกรม ตลอดจนสร้างความคุ้นเคยกับ โปรแกรมก่อนที่จะนำโปรแกรมไปใช้ในการจำลองปัญหาการไหลที่

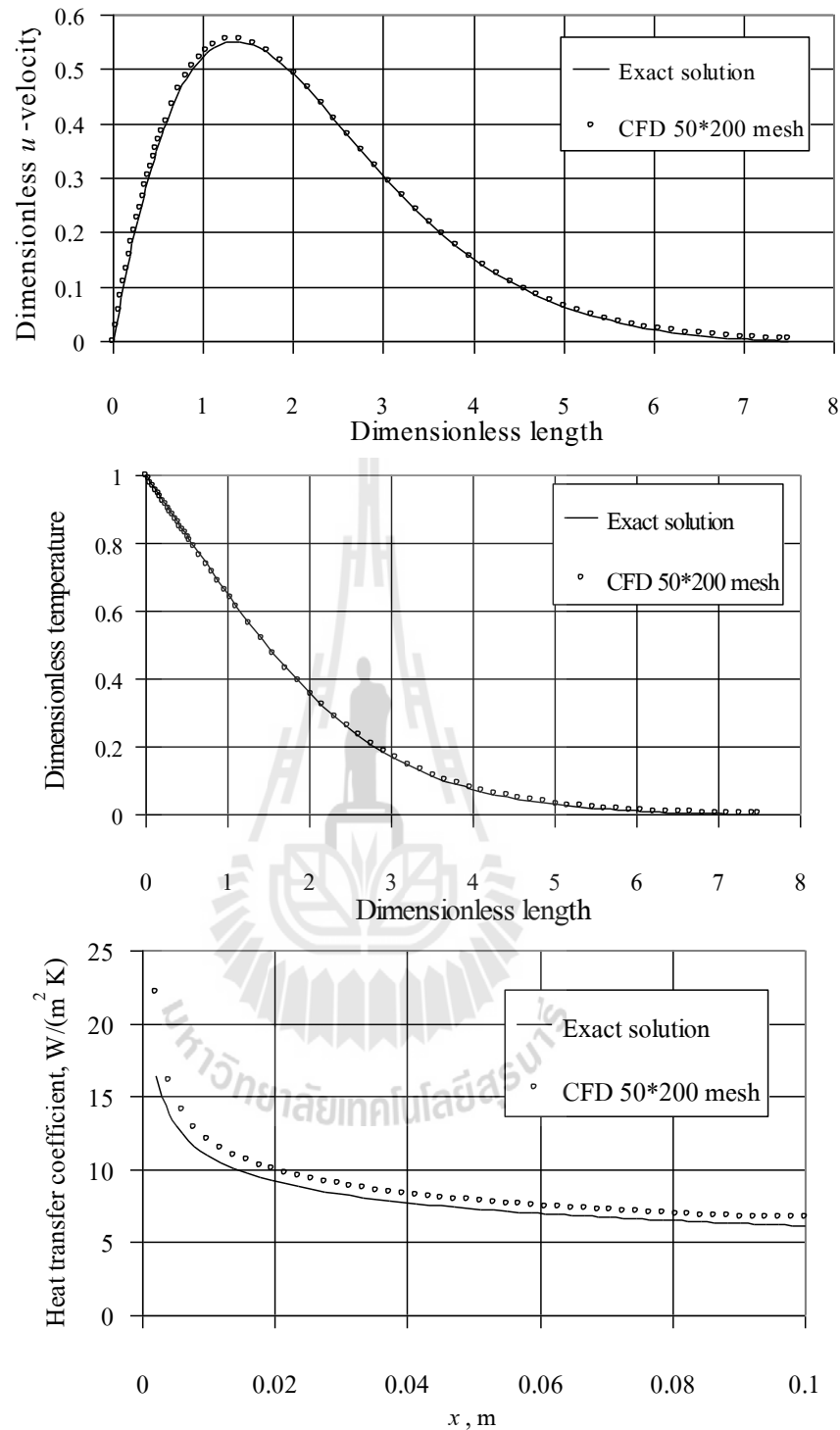
ต้องการศึกษา ได้ทดสอบ โปรแกรมกับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ซึ่งเป็น ปัญหาการไหลพื้นฐานของการไหลแบบการพาอิสระ สถานะของปัญหาการไหลที่จำลองเป็นดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สถานะเริ่มต้นของการไหลแบบการพาความร้อนอิสระ

การจำลองใช้กริดแบบขยายตัวในแนวแกน y สัดส่วนการขยายตัวของกริดที่ใหญ่ที่สุดกับ กริดที่เล็กที่สุดเป็น 1,250 เท่า จำนวนกริดที่ใช้คือ 50×200

ผลลัพธ์แสดงเป็นรูปด้านข้างของความเร็วและอุณหภูมิในรูปตัวแปรไร้มิติ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่หาจากกรรมวิธีความเสมือน (Kays and Crawford (1993)) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์จากการทดสอบโปรแกรม

ผลลัพธ์จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการคำนวณของโปรแกรม และสร้างความมั่นใจต่อการนำโปรแกรมไปใช้ในการจำลองปัญหาการไหลผ่านอาคารต่อไป

ทำการจำลองการไหลผ่านอาคารที่มีลักษณะสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4.1 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์การไหล CFX โดยใช้สมมุติฐานที่สำคัญดังนี้

1. สมมุติให้อากาศใต้หลังคาได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรแบบเอกลักษณะ (uniform heat source) เนื่องจากในห้องหลังคามีรูปแบบการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลัก ดังนั้น การดูดซับความร้อนของหลังคาจึงมีค่าน้อยมาก ความร้อนส่วนใหญ่จะทะลุผ่านหลังคากระจกใสเข้ามาภายในห้องหลังคาและถ่ายเทความร้อนสู่อากาศจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมด

2. เป็นการไหลในสองมิติ เพราะเป็นการศึกษาในเบื้องต้น ซึ่งสามารถประหยัดเวลาในการคำนวณ และยังสามารถใช้ได้กับโรงเรือนที่มีขนาดใหญ่มากในมิติที่ 3 เช่น โรงเลี้ยงไก่

3. เป็นการไหลแบบราบเรียบ เพราะพิจารณาการไหลภายในอาคารที่ถูกขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัว จึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และมีค่าเลขเรโนลด์ต่ำ

4. เป็นการไหลในสภาวะคงตัว โดยคิดว่าหลังคาได้รับความร้อนจากพลังงานแสงแดดเป็นเวลานานเพียงพอที่จะอนุमानให้เข้าสู่สภาวะคงตัวได้

5. ผนัง พื้น และเพดาน เป็นผนังฉนวนสมบูรณ์ (adiabatic wall) เพราะงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ในภาพรวม เช่น เส้นการไหล ความเร็ว จึงสมมุติเช่นนี้เพื่อความสะดวก ซึ่งคาดว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยและยอมรับได้

6. ใช้ Boussinesq Model เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น โดยได้ผ่านพิสูจน์ในขั้นตอนการทดสอบโปรแกรมแล้วว่า ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจและใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการใช้ Full Buoyancy Model

ทำการจำลองด้วยสมมุติฐานดังกล่าวโดยเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลต่อปริมาณการถ่ายเทอากาศ (ในที่นี้วัดด้วยปริมาณอัตราการไหลของอากาศ (mass flow rate)) ได้แก่

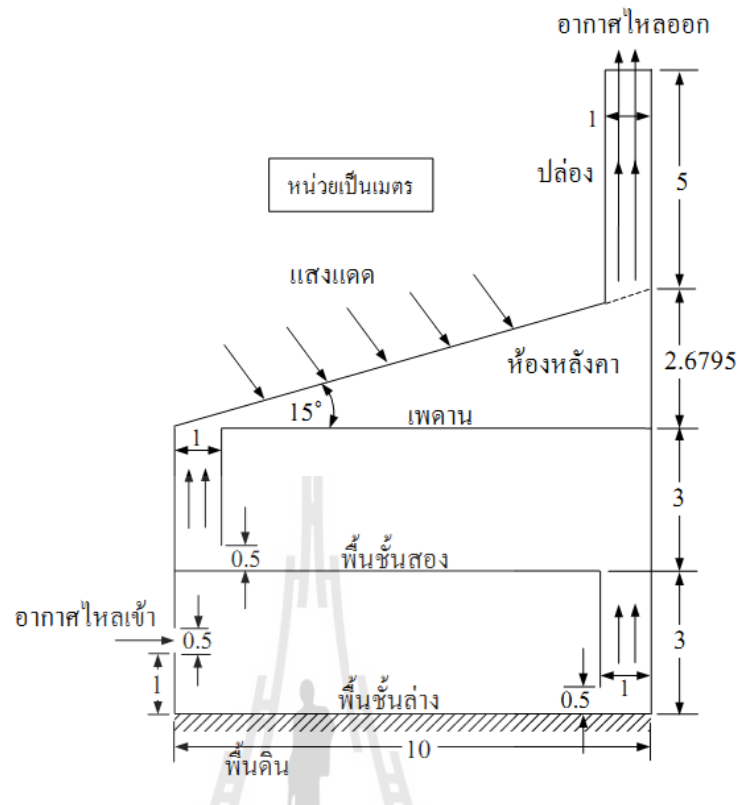
1. ความเข้มของแสงแดด 300, 550, 800 W/m²
2. ความสูงของปล่อง 3, 5, 7 m (วัดจากมุมยอดของหลังคาที่เอียง 45°)
3. ความเอียงของหลังคา 15, 30, 45, 60°

โดยในข้อ 1 – 3 กำหนดให้ความกว้างของปล่องคงที่เท่ากับ 1.0 m

4. ความกว้างของปล่อง 0.5, 1.5 m (เลือกเพียง 1 กรณีข้างต้น)
5. ความสมมาตรและไม่สมมาตรของอาคาร (1 กรณี)

รวมทั้งสิ้น 39 กรณี

ลักษณะของอาคารแบบไม่สมมาตรเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพและขนาดของอาคารแบบไม่สมมาตร

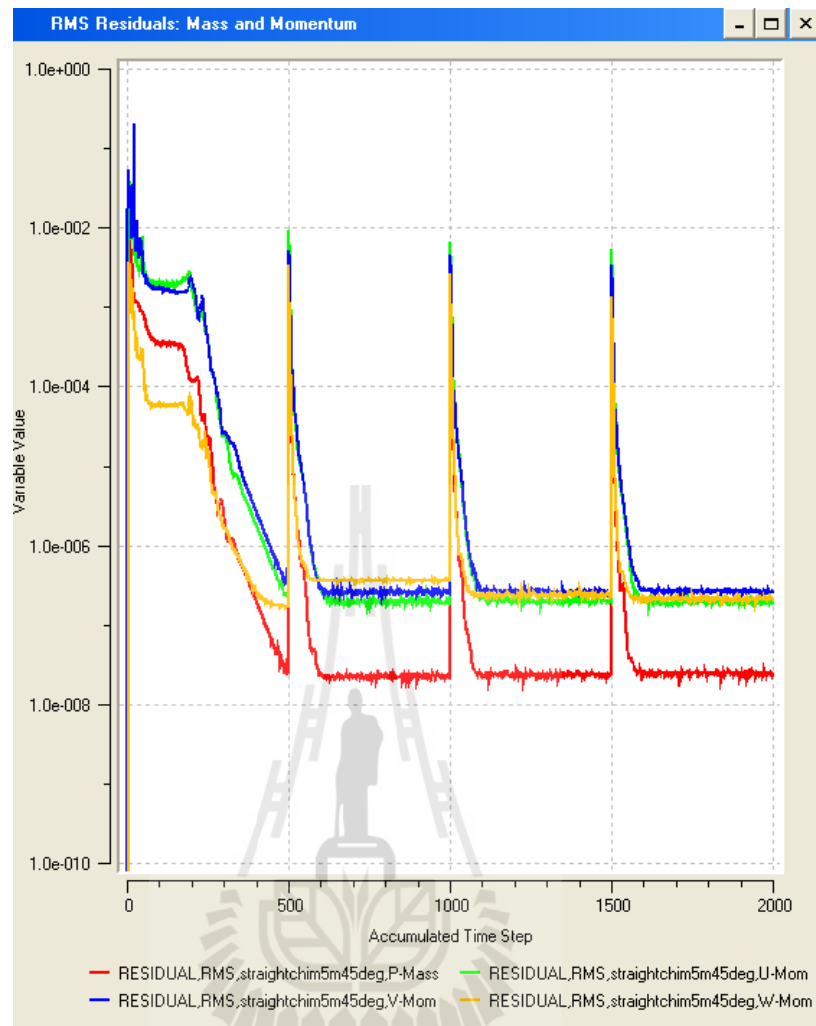
4.4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

ความมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของโปรแกรม ได้วิเคราะห์จาก 2 ปัจจัย คือ

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

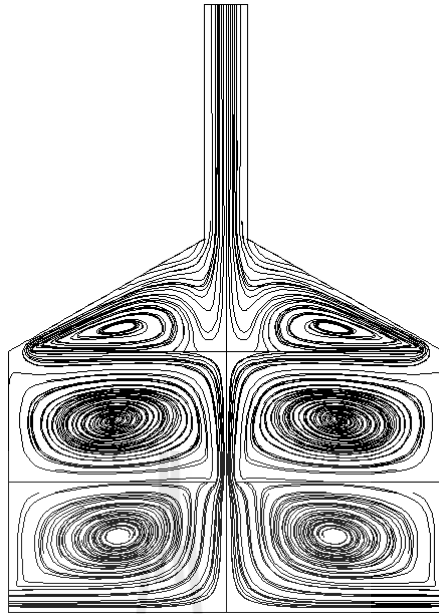
คำตอบที่ถูกต้อง ควรมีค่าส่วนตกค้างสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าที่เล็ก ๆ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และเป็นค่าที่สภาวะคงตัวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว นอกจากนี้ ต้องมั่นใจว่าการไหลสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวล นั่นคือ มวลของอากาศที่ไหลเข้าอาคารต้องเท่ากับมวลของอากาศที่ไหลออกจากอาคาร

รูปที่ 4.5 เป็นตัวอย่างของค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม การกระโดดของเส้นกราฟเกิดจากการที่โปรแกรมทำการปรับขนาดของกริดให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกิดจากการปรับขนาดกริดด้วยกรรมวิธี mesh adaption เพื่อให้เกิดการลู่เข้าที่รวดเร็วยิ่งขึ้น และจากการตรวจสอบค่าอัตราการไหลของอากาศแต่ละกรณีพบว่า อัตราการไหลเข้าของอากาศเท่ากับอัตราการไหลออกของอากาศเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวล จึงสร้างความมั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CFX ในงานวิจัยนี้

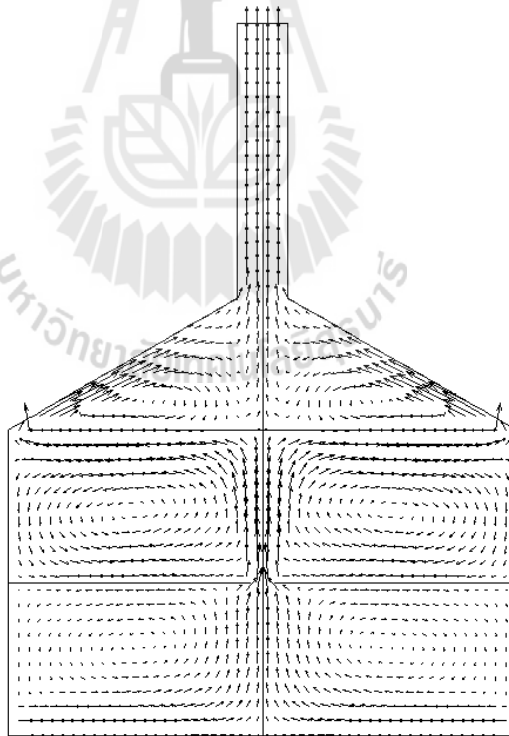


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างของกราฟแสดงค่าส่วนตกค้าง

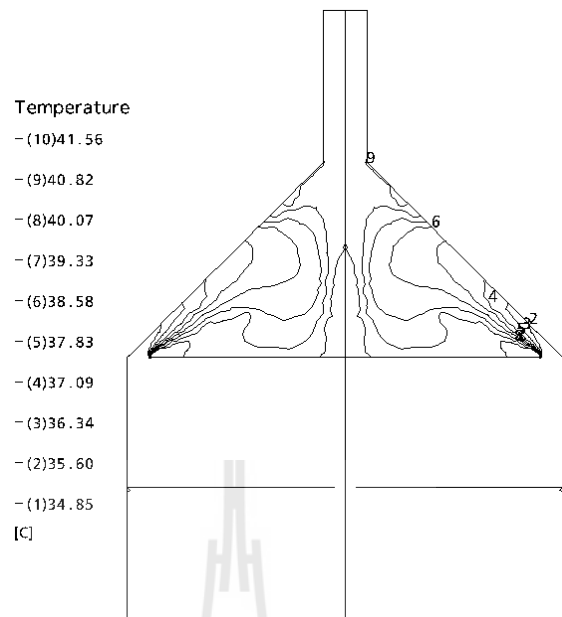
ลักษณะที่เกิดขึ้นของเส้นการไหล การกระจายเวกเตอร์ความเร็ว และเส้นคอนทัวร์ของอุณหภูมิของแต่ละกรณีมีความคล้ายคลึงกัน จึงขอแสดงตัวอย่างผลลัพธ์เพียง 1 กรณีเท่านั้น และพบว่า การหมุนวนของเส้นการไหลภายใต้ห้องหลังคาจะเริ่มเกิดขึ้นที่มุมเอียงของหลังคาเป็น 15° เป็นต้นไป ดังแสดงในรูปที่ 4.6



(a) เส้นการไหล (stream line)



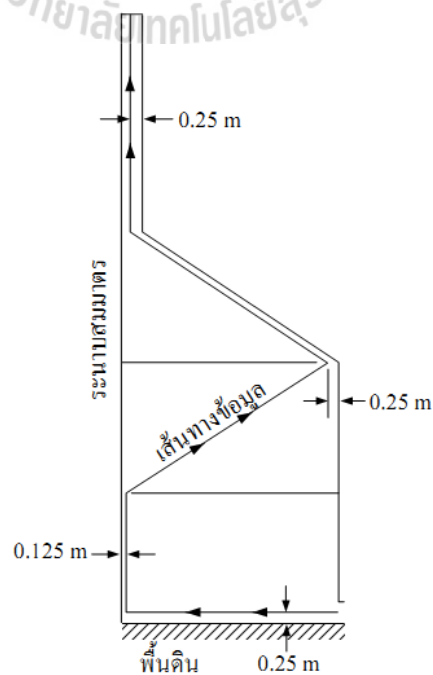
(b) เวกเตอร์ความเร็ว



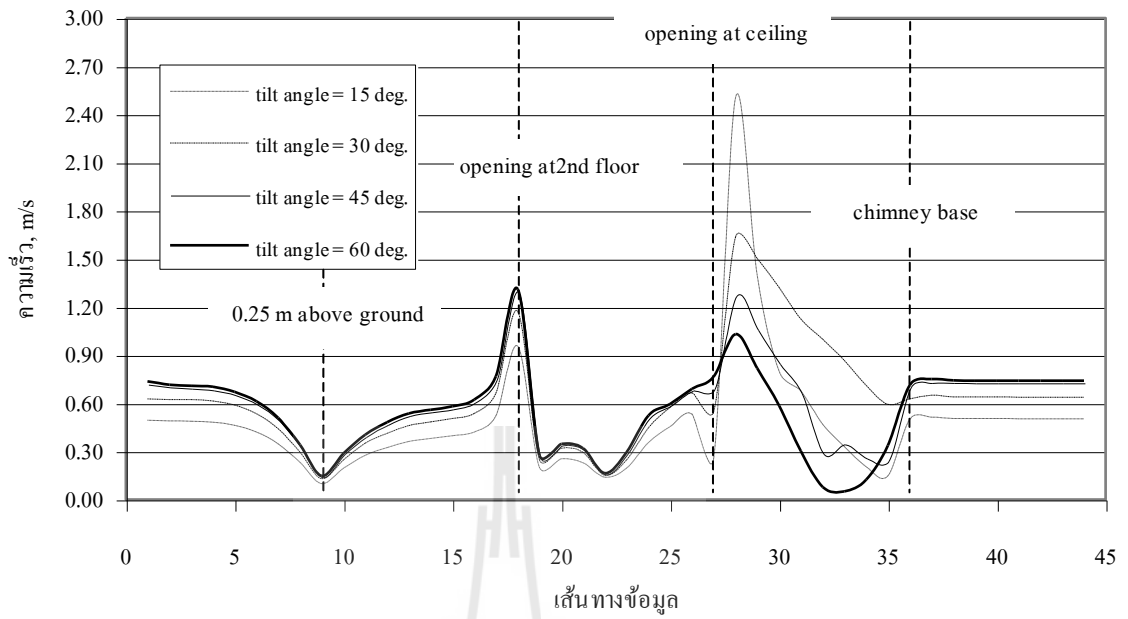
(c) คอนทัวร์ของอุณหภูมิ (temperature contour)

รูปที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่ $\dot{Q} = 300 \text{ W/m}^2$, $h_c = 3 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$

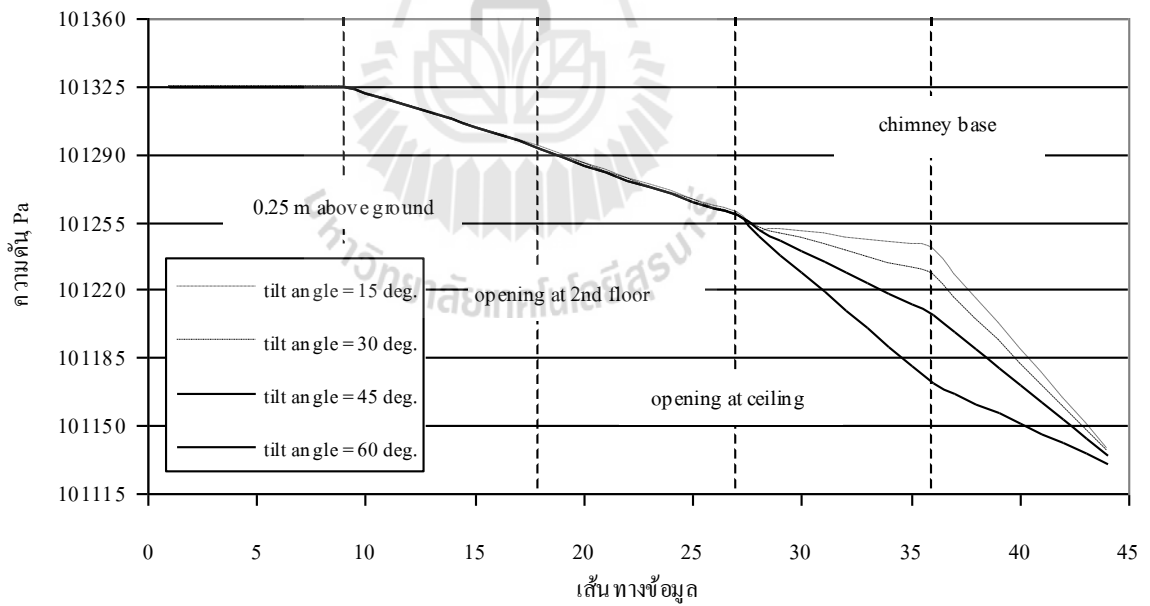
นอกจากนี้ ยังแสดงผลลัพธ์ในรูปของความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น ดังรูปที่ 4.8 -4. 11 เพื่อผลลัพธ์ในภาพรวมของแต่ละกรณี ซึ่งมีเส้นทางข้อมูลที่ถูกเลือกดังแสดงในรูปที่ 4.7



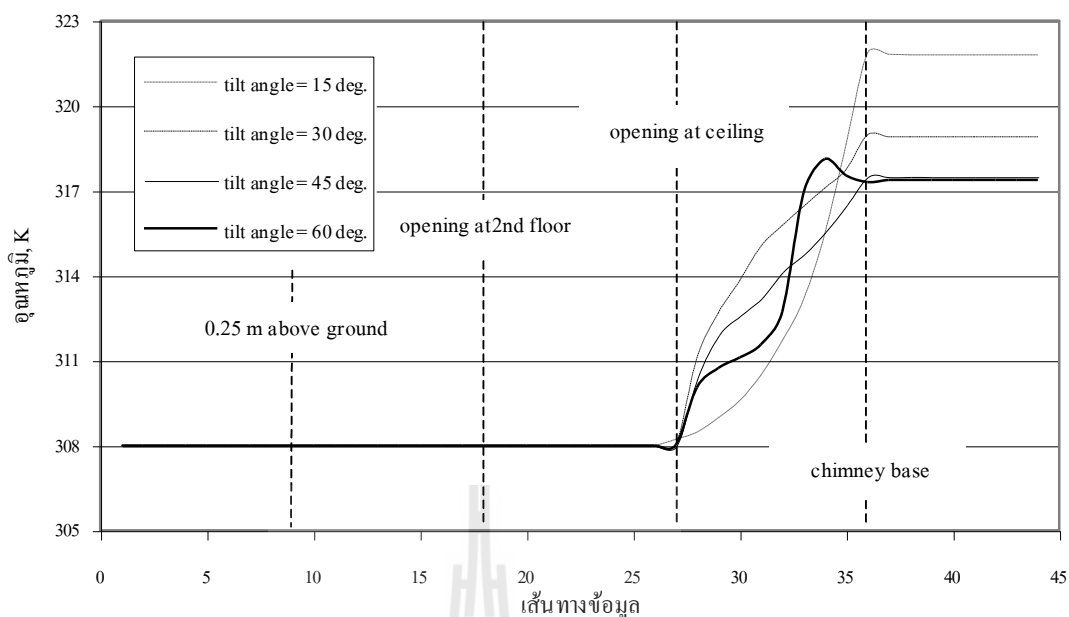
รูปที่ 4.7 เส้นทางข้อมูลสำหรับอาคารแบบสมมาตร (เส้นตามลูกศร)



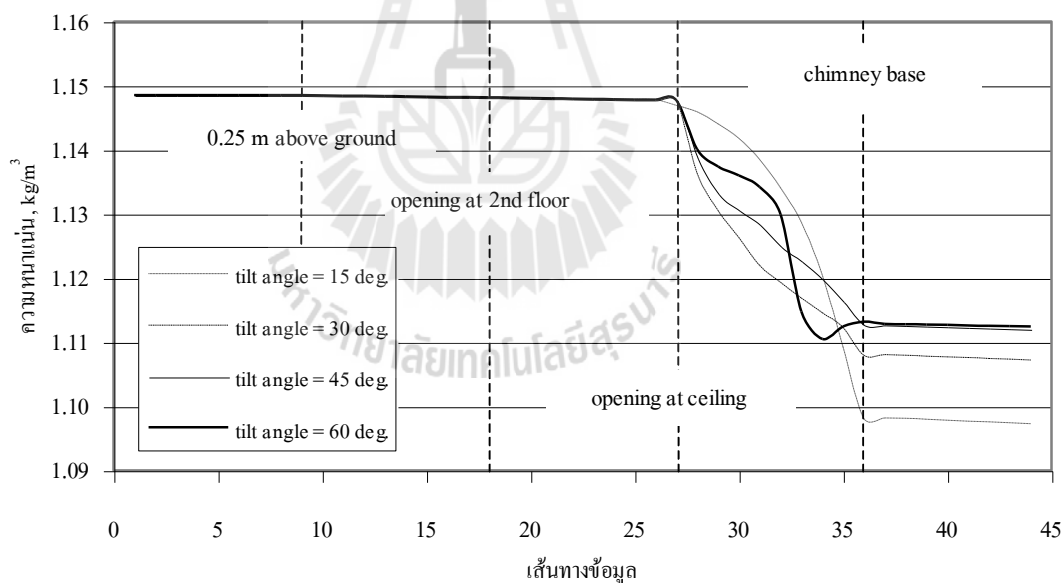
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นทางข้อมูล



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความดันตามเส้นทางข้อมูล



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเส้นทางข้อมูล

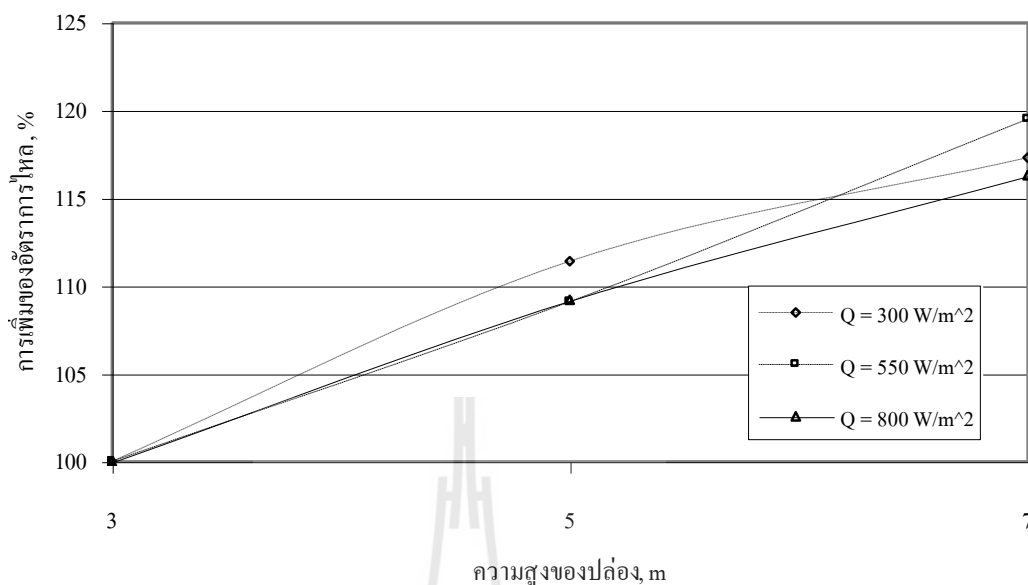


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นตามเส้นทางข้อมูล

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองทั้งหมดสามารถอภิปรายโดยแยกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

4.4.1 ผลกระทบจากความสูงของปล่อง

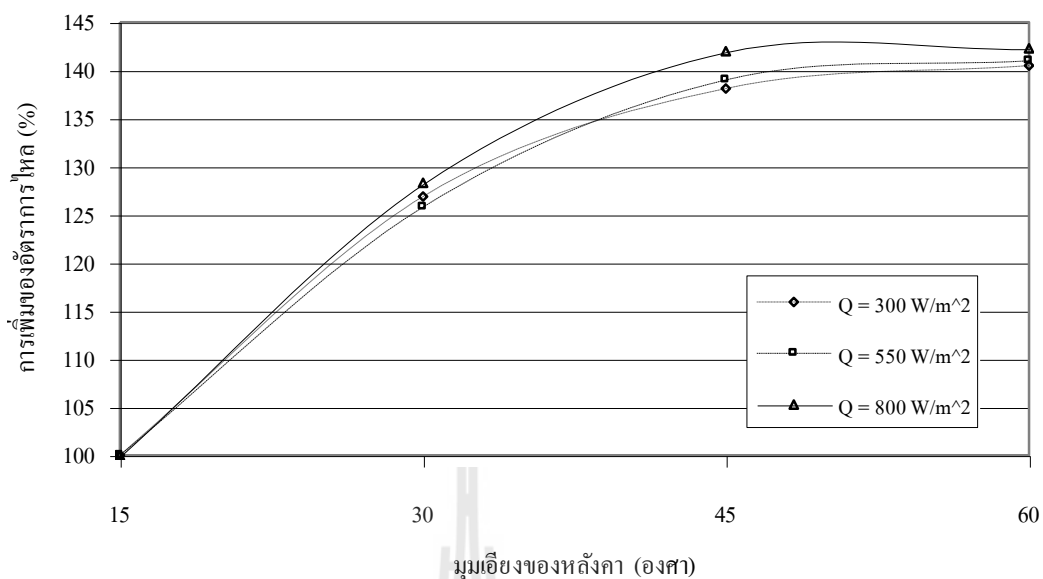
การเพิ่มความสูงของปล่องส่งผลให้อัตราการไหลโดยมวลของอากาศสูงขึ้น รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับอัตราการไหลในกรณีปล่องสูง 3 m โดยกำหนดให้อัตราการไหลที่ปล่องสูง 3 m เป็น 100%



รูปที่ 4.12 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความสูงของปล่อง

4.4.2 ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา

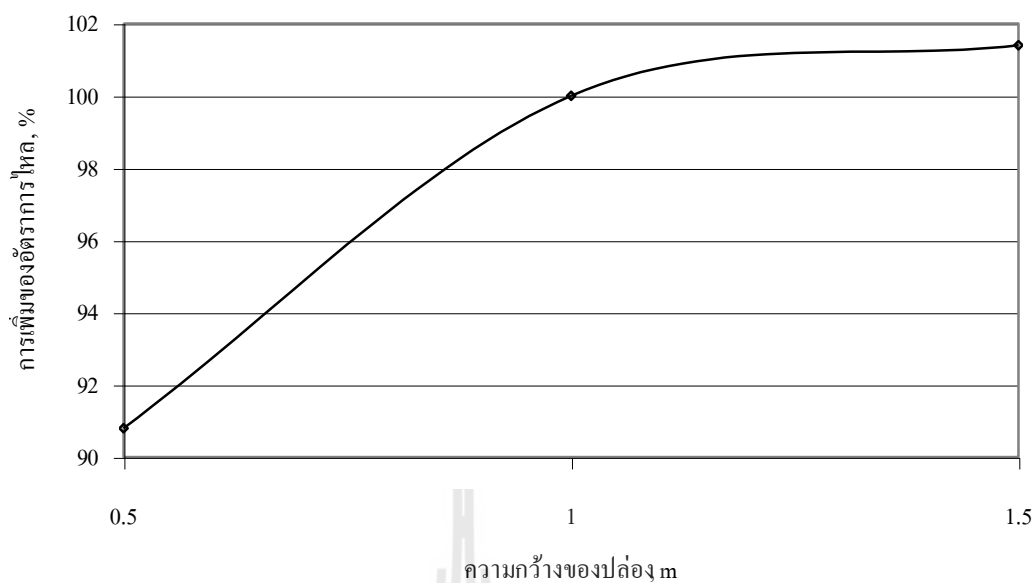
การเพิ่มมุมเอียงของหลังคาส่งผลให้อัตราการไหลสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มความสูงของปล่อง รูปที่ 4.13 แสดงร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยคิดอ้างอิงกับค่าอัตราการไหลกรณีหลังคาเอียง 15° ซึ่งจะเห็นว่า อัตราการไหลมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของหลังคาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มมุมเอียงของหลังคาจาก 45° เป็น 60° อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมาก โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากเส้นกราฟ ซึ่งอาจไม่คุ้มกับพื้นที่ของหลังคาที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปจากผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ได้ว่า มุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 30° ถึง 45° อย่างไรก็ตาม การเพิ่มมุมเอียงของหลังคาทำให้เกิดพื้นที่มากขึ้น จึงเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุเพื่อมุงหลังคามากกว่าในกรณีเพิ่มความสูงของปล่อง การตัดสินใจออกแบบอาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศนั้น ควรมีการวิเคราะห์ถึงราคาวัสดุที่จะนำมาใช้ เพื่อให้เกิดการลงทุนที่ได้ประโยชน์สูงสุด และประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุดด้วย อีกทั้งต้องคำนึงถึงลักษณะทางสถาปัตยกรรมด้วย เพราะปล่องที่สูงมากอาจจะดูไม่สวยงาม



รูปที่ 4.13 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับมุมเอียงของหลังคา

4.4.3 ผลกระทบจากความกว้างของปล่อง

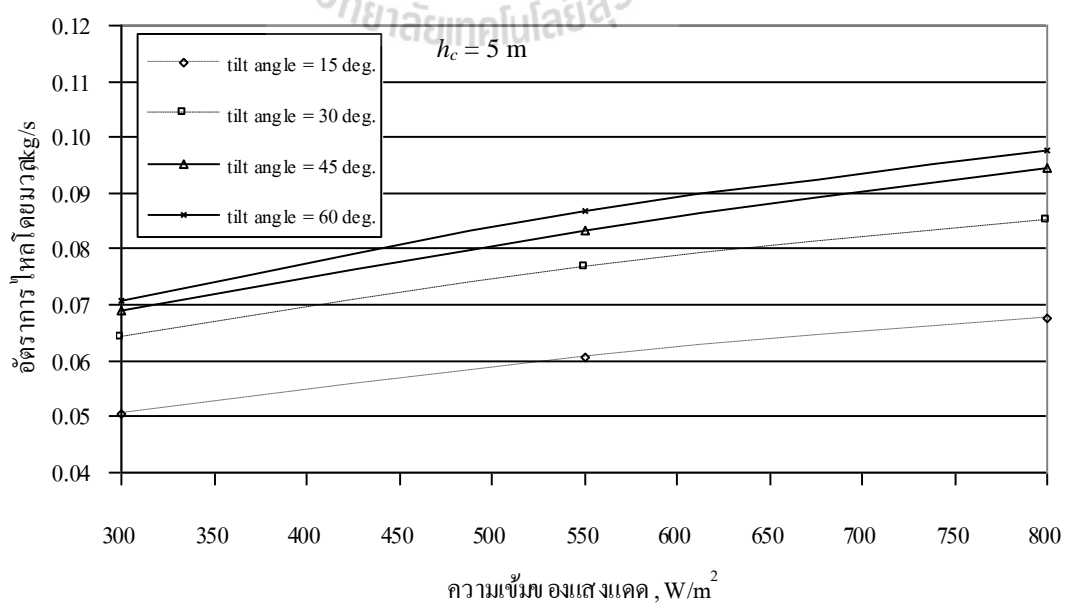
คิดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของปล่อง โดยอ้างอิงกับผลลัพธ์ที่ได้จากปล่องกว้าง 1.0 m จากผลการจำลอง สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความกว้างของปล่องมากขึ้นทำให้ปริมาณอัตราการไหลสูงขึ้น แต่ปริมาณการเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความกว้างนั้นมีค่าน้อยมาก โดยพบว่า เมื่อเพิ่มความกว้างของปล่องจาก 1.0 m เป็น 1.5 m (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า) สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้เพียงประมาณ 1.4% เท่านั้น ส่วนการลดความกว้างของปล่องลงจาก 1.0 m เป็น 0.5 m ส่งผลให้ความเร็วในปล่องสูงขึ้นอย่างมากก็จริง แต่อัตราการไหลมีค่าลดลงถึง 9.2% ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดังนั้น การออกแบบขนาดของปล่องจึงควรกระทำด้วยความระมัดระวังและควรมีการศึกษาด้วยกรรมวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อให้ได้ค่าความกว้างของปล่องที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปเกิดการถ่ายเทโดยธรรมชาติที่เหมาะสมทั้งในแง่ของปริมาณการถ่ายเท และความคุ้มทุนโดยมีการพิจารณาเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วยเสมอ



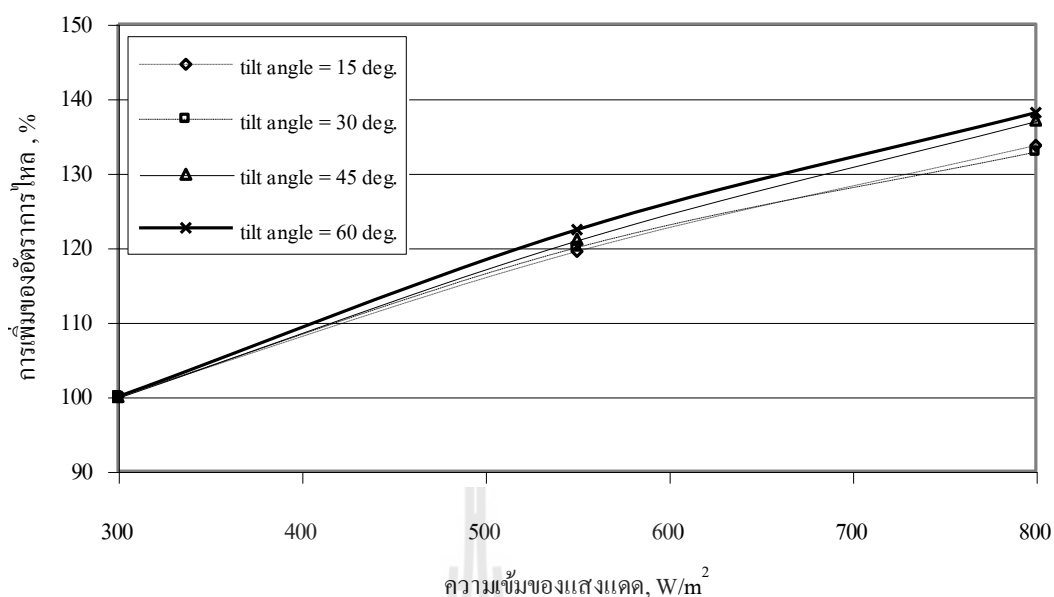
รูปที่ 4.14 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความกว้างของปล่อง

4.4.4 ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด

รูปที่ 4.15 แสดงค่าอัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดดที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ จากผลการจำลอง สรุปได้ว่า ความเข้มของแสงแดดยิ่งสูงยิ่งส่งผลดีต่อการถ่ายเท รูปที่ 4.16 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลคิดเป็นร้อยละของค่าอัตราการไหลที่กรณีความเข้มของแสงแดดเป็น 300 W/m^2



รูปที่ 4.15 อัตราการไหลโดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด



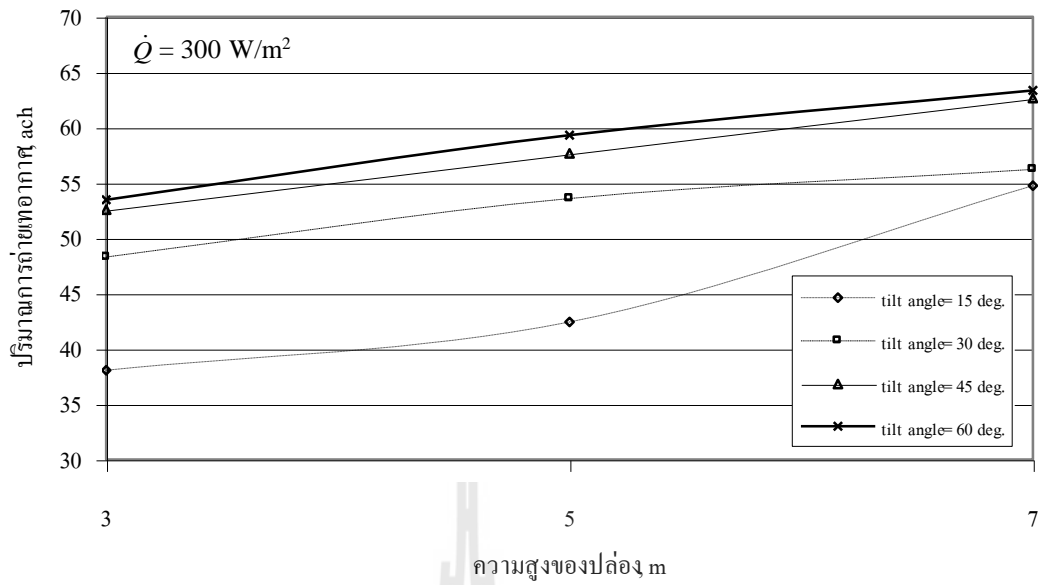
รูปที่ 4.16 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้ โดยมวลเทียบกับความเข้มของแสงแดด

4.5.5 ผลกระทบจากอาคารแบบสมมาตรกับไม่สมมาตร

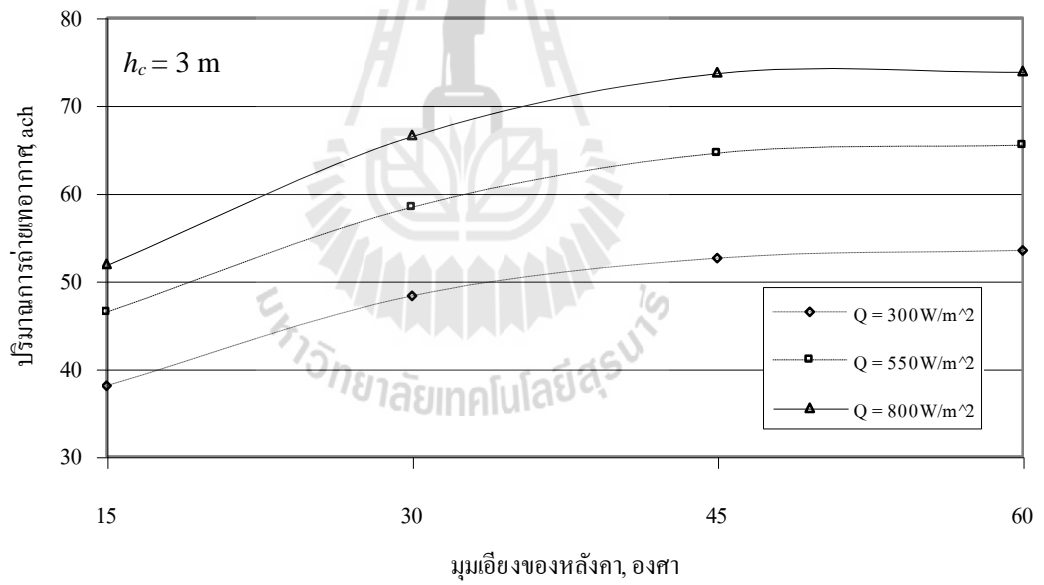
จากผลการจำลอง สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบอาคารแบบไม่สมมาตรนั้น ช่วยให้อากาศไหลเข้าสู่อาคารได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อผู้พักอาศัยที่อยู่บริเวณชั้นที่ 1 แต่ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศมากนัก โดยอัตราการใช้เพิ่มขึ้นคิดเป็นประมาณ 4.9% ของปริมาณอัตราการใช้แบบสมมาตร

4.5.6 ผลกระทบจากตัวแปรต่อปริมาณการถ่ายเทอากาศ

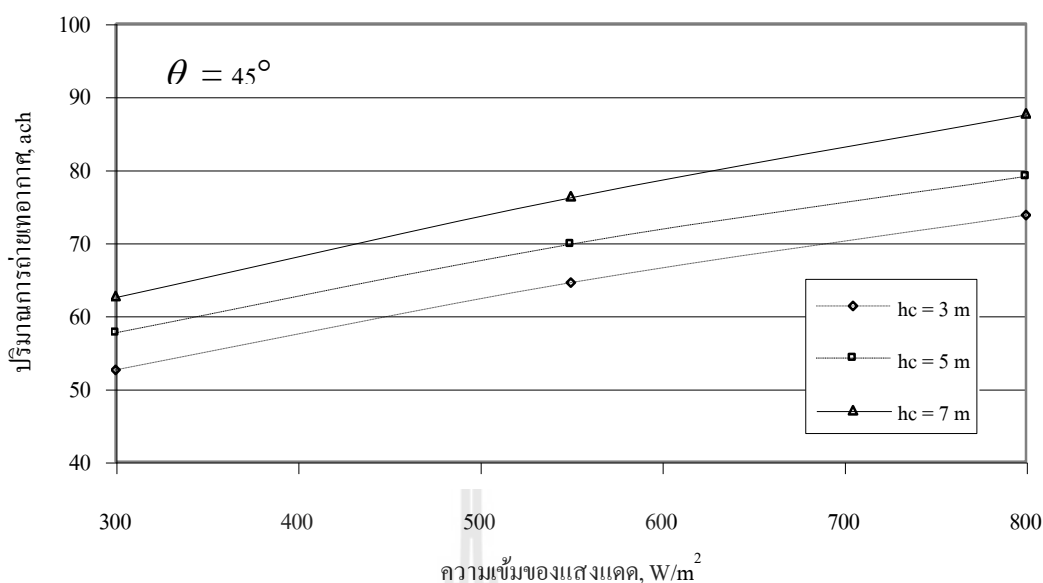
ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศ (Air Change per Hour, ACH) นิยามด้วย ปริมาณการถ่ายเทอากาศคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง และมีหน่วยเป็น ACH ในที่นี้จะแสดงค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศโดยคิดเป็นจำนวนเท่าของปริมาตรห้องพักชั้นที่ 1 ของอาคารเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศของกรณีที่มีน้อยที่สุด ($h_c=3$ m, $\theta=15^\circ$, $\dot{Q}=300$ W/m²) มีค่าประมาณ 38 ACH และกรณีที่ดีที่สุด ($h_c=7$ m, $\theta=60^\circ$, $\dot{Q}=800$ W/m²) มีค่าถึง 90 ACH ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความสบายต่อผู้อยู่อาศัย ซึ่งพบว่า ความสูงของปล่อง มุมเอียงของหลังคา และความเข้มของแสงแดด ต่างเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการถ่ายเทอากาศ (หน่วย ACH) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 – 4.19



รูปที่ 4.17 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความสูงของปล่อง



รูปที่ 4.18 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคา



รูปที่ 4.19 ปริมาณการถ่ายเทอากาศเทียบกับความเข้มของแสงแดด

4.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดจากการจำลองปัญหาการไหลแบบการพาอิสระภายในอาคารผ่านห้องหลังคารับแดดด้วยโปรแกรม CFX สามารถสรุปผลและประมวลข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยเพื่อขยายผลต่อไป ดังนี้

4.5.1 สรุปผล

1. การเพิ่มมุมเอียงของหลังคา ความสูงและความกว้างของปล่อง ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทอากาศแบบธรรมชาติสูงขึ้น
2. มุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง $30 - 45^\circ$
3. ที่ค่าความเข้มของแสงแดดสูง ๆ สามารถทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศได้มากกว่า
4. ข้อดีของอาคารแบบไม่สมมาตรคือทำให้ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าสูงขึ้น แต่ค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 5%)
5. ค่าปริมาณการถ่ายเทอากาศสูงพอที่จะสร้างความรู้สึกสบายให้กับผู้พักอาศัยได้

4.5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขยายขอบเขตของการศึกษาด้วยกรรมวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใน 3 มิติ เพื่อให้ได้พฤติกรรมกรไหลที่สมจริงยิ่งขึ้น
2. ควรทำการจำลองพฤติกรรมกรไหลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เช่น มีการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของปล่อง
3. ควรศึกษาผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทอากาศอันเนื่องมาจากขนาดของช่องเปิด ณ บริเวณต่าง ๆ ของอาคาร

4. ควรศึกษาเพิ่มเติมว่าค่ามุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่องเท่าใดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum values) ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยคำนึงถึงเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย

5. ควรสร้างอาคารและทำการทดลองวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CFX นี้

6. ในการออกแบบควรคำนึงถึงเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเสมอ เพราะการเพิ่มมุมเอียงของหลังคา หรือความสูงปล่อง ต่างทำให้เพิ่มพื้นที่ และปริมาณวัสดุที่ใช้ ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างมากขึ้น

4.6 รายการอ้างอิง

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. (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. (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.

Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong, N., and Khedari, J. (2001). **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation.** Building and Environment 36(3): 383-391.

Kays, W.M. and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer.** (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.

Khedari, 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.

Khedari, J., Yimsamerjit, P., and Hirunlabh, J. (2002). **Experimental investigation of free convection in roof solar collector.** Building and Environment 37(5): 455-459.

Khedari, 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.

Khedari, 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.

บทที่ 5

การเพิ่มประสิทธิภาพปล่องแควเพื่อระบายอากาศในอาคาร

5.1 บทคัดย่อ

ปล่องแควถูกใช้ในการระบายอากาศในอาคารธรรมชาติ โดยปริมาณการระบายอากาศขึ้นอยู่กับปริมาณแสงแดดและปัจจัยโครงสร้าง เช่น ระยะในแนวดิ่งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของระบบ ขนาดของช่องทางเข้าและช่องทางออก ความกว้างของช่องอากาศ และความยาวของปล่องแคว งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการกระจายของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลในปล่องแคว รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความยาวของปล่องแคว ความกว้างของช่องอากาศ และความเข้มของแสงแดด โดยการใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้มากพอสมควร

5.2 บทนำ

ปล่องแคว (solar chimney) ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) หรือเพื่อช่วยเพิ่มการระบายอากาศ หลักการทำงานคือ การใช้พื้นที่หลังคารับแสงแดดเข้ามาทำให้อากาศในช่องหลังคาร้อนขึ้น อากาศร้อนนี้จะลอยตัวสูงขึ้นไปตามช่องหลังคา และถูกปล่อยออกที่ช่องทางออกด้านบน และในขณะเดียวกันก็เหนี่ยวนำ (induce) อากาศเย็นเข้ามาสู่ช่องทางเข้าด้านล่าง (ดูรูปที่ 5.3) เมื่อช่องทางเข้าต่ออยู่กับด้านในของอาคารก็จะสามารถระบายอากาศในอาคารได้ จะเห็นได้ว่าหลักการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่าย แต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้น ไม่่ง่ายนัก

การประยุกต์ใช้และการวิจัยเกี่ยวกับปล่องแควเพื่อช่วยระบายอากาศภายในอาคารได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก เพราะต้องการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า มีการเสนอแนวคิดใหม่ ตลอดจนหาทางเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายอากาศในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี (ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์) การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง Bansal, Methur and Bhandari (1993) และ Bansal, Methur J., Methur S., and Jane (2005) เป็นกลุ่มนักวิจัยกลุ่มแรก เริ่มที่เริ่มทำการศึกษาดังการนำปล่องแควมาช่วยในการระบายอากาศแบบธรรมชาติ โดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขึ้นพบว่าปล่องแควสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลได้ในช่วง $50-165 \text{ m}^3/\text{h}$ ต่อพื้นที่ปล่องแคว 1 m^2 และยังพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขึ้นอยู่กับปัจจัยโครงสร้างของปล่องแคว เช่น พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ และขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการดูดซับความร้อนของปล่องแควซึ่งอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ ต่อมาได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศด้วยปล่องแควขนาดเล็กที่มีความยาว 1 m กว้าง 1 m ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเร็วสูงสุดภายในปล่องได้ถึง 0.24 m/s ซึ่งมีความสอดคล้องกันเป็น

อย่างดีเมื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Afonso and Oliveira (2000) เสนอแนวทางการออกแบบปล่องแดงที่ดีต่อการเกิดการระบายอากาศว่าควรพิจารณา 2 ปัจจัย คือ ความยาวและความกว้างของปล่อง เพราะอัตราการระบายอากาศจะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของปล่อง Gan (1998) เสนอปัจจัยเพิ่มเติมที่ส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนความร้อน ปริมาณความร้อนที่ได้รับ ความสูงและความหนาของผนัง (ติดตั้งปล่องแดงเข้ากับผนังอาคาร) พบว่าความเข้มของแสงแดดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ปล่องแดงประมาณ 10% นอกจากนี้ยังพบว่าความกว้างของช่องอากาศในช่วง 0.55-0.6 m จะทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศสูงสุดเมื่อพิจารณาที่ความสูงปล่อง 6 m หากความกว้างปล่องมากกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับที่บริเวณด้านบนของปล่อง Bouchair (1994) ทดลองศึกษาการระบายอากาศธรรมชาติจากปล่องแดง พบว่าอัตราการไหลสูงสุดที่ค่าความกว้างของปล่องประมาณ 1/10 ของความสูงปล่อง ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยของ Burek และ Habeb (2007) ที่พบว่าอัตราการไหลของอากาศภายในปล่องขึ้นอยู่กับความกว้างของปล่องและปริมาณความร้อนที่ได้รับเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gan (1998) นอกจากนี้ Hamdy and Fikry (1998) ยังพบว่าอัตราการไหลขึ้นอยู่กับระยะในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของของปล่องแดง (stack height) และมุมเอียงของหลังคาปล่องแดงที่เหมาะสมที่สุดคือ 60° Zhai, Dai and Wang (2005) ศึกษาการใช้ปล่องแดงแบบ single pass (มีช่องทางไหล 1 ช่องทาง) และ double pass (มีช่องทางไหล 2 ช่องทาง) ซึ่งพบว่าปล่องแดงแบบ double pass สามารถทำให้เกิดการระบายอากาศได้ 20 ACH ที่มุมเอียงของหลังคาปล่องแดง 30° หากต้องการให้ปล่องแดงแบบ single pass ระบายอากาศได้ในปริมาณเท่ากัน หลังคาจะต้องเอียง 75° ซึ่งยากในการปฏิบัติ และยังคงไม่สวยงามอีกด้วย จากการคำนวณยังพบว่าปล่องแดงแบบ double pass มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศสูงกว่าแบบ single pass ถึง 10%

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการระบายอากาศธรรมชาติในประเทศไทยก็เริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น โดยทำการศึกษากการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร และได้แนะนำว่าปล่องแดงที่ดีควรมีความกว้างของช่องอากาศในช่วง 10-14 cm ยาว 1-2 m และมีมุมเอียงของหลังคา $20-45^\circ$ (Hirunlabh, Washirapuwadon, Prtinthong and Khedari (2001), Khedari, Hitunlabh, and Bunnag (1997), Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratingthong and Hirunlabh (2000), Khedari, Ingkawanich, Waewsak and Hirunlabh (2002), Khedari, Yimsamerjit, and Hirunlabh (2002)) นอกจากนี้ พรสวรรค์ และ ทวีช (2004) ยังได้เสนอวิธีการระบายอากาศธรรมชาติด้วยห้องหลังคาและปล่องแดง ซึ่งพบว่าสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศได้สูงเพียงพอต่อความต้องการอยู่อาศัยของผู้อาศัย ทั้งยังพบว่าความสูงและพื้นที่หน้าตัดการไหลของปล่อง ตลอดจนความเข้มของแสงแดด ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ และพบว่ามุมเอียงที่ดีที่สุดของหลังคา คือ 45°

จะเห็นว่าปริมาณการระบายอากาศพิจารณาได้จากค่าอัตราการไหลของอากาศที่ระบบสามารถทำได้ จากงานวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคารขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้าง (geometrical parameters) ของปล่องแดง ไม่ว่าจะเป็นระยะในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของระบบ (stack height) หรือขนาดของช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศ

ตลอดจนความกว้างของช่องอากาศ (air gap width) และความยาวของปล่องแดด (solar chimney length) จากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบการศึกษาผลกระทบของการกระจายของพื้นที่หน้าตัดของปล่องแดด งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการกระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลของอากาศในปล่องแดด ที่มีต่ออัตราการระบายอากาศ ด้วยการเพิ่มมุมขยาย (β) ของช่องการไหล ซึ่งจะทำให้เกิดการบานตัวออกของปล่องแดด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบจากความยาวของปล่องแดด ความกว้างของช่องอากาศ ตลอดจนความเข้มของแสงแดดต่ออัตราการระบายอากาศ ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์เพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพและออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้กับอาคารบ้านเรือนต่อไป

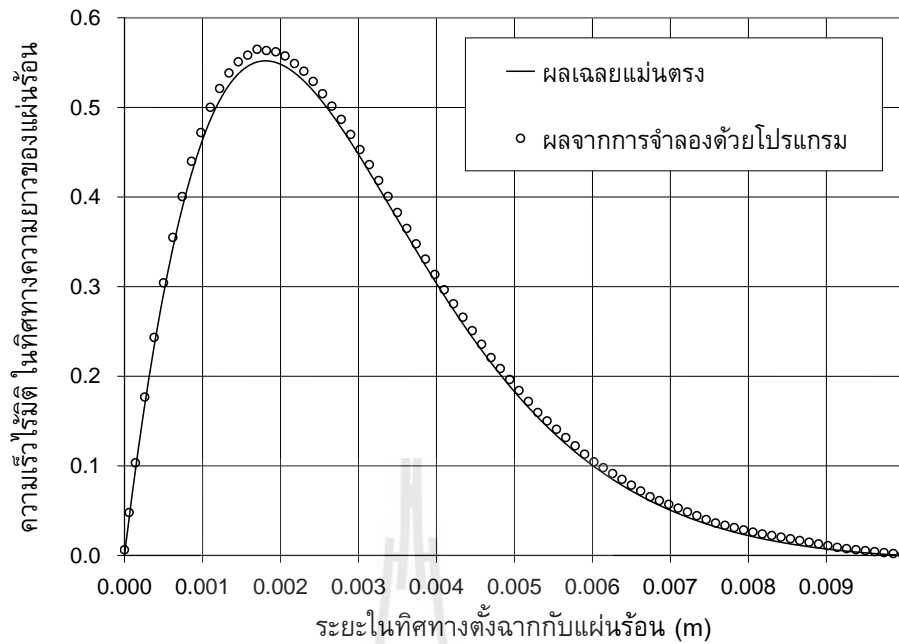
แรงคลไจในการศึกษานี้เกิดจากการศึกษาเชิงทฤษฎี จากงานวิจัยของ Chitsomboon (2001) ซึ่งทำนายการไหลในระบบปล่องแดดเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าดังสมการ

$$\frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \left[\rho_1 - 2\rho_1 A_1^2 \int_1^3 \frac{dA}{A^3} + \frac{2A_1 q''}{V_1 c_p T_1} \int_1^3 \frac{dA_r}{A^2} + \frac{2\rho_1 A_1^2 g h_c}{\gamma R T_1} \int_1^3 \frac{dA}{A^3} \right] = \frac{\rho_1 g h_c q''}{c_p T_3} \int_1^3 dA_r \quad (5.1)$$

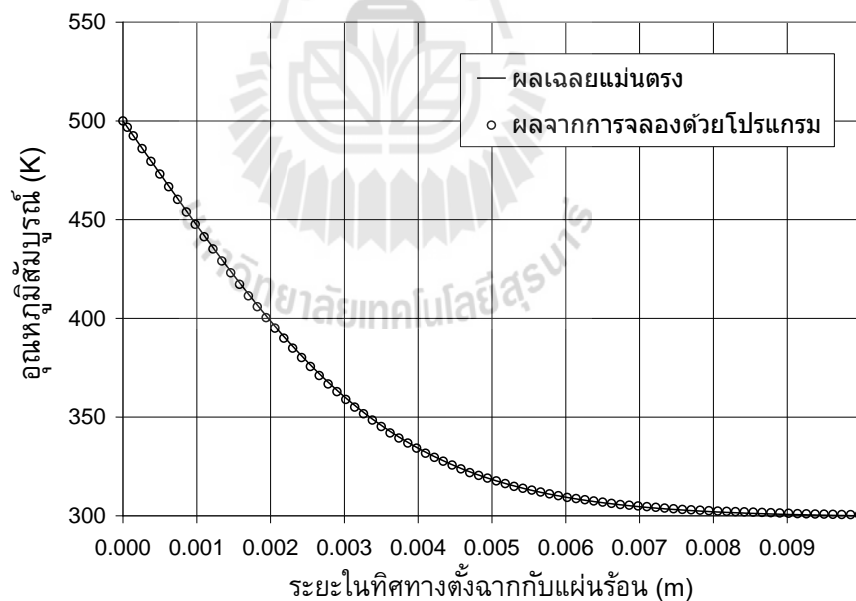
ผลการทำนายของสมการนี้สอดคล้องกับการทำนายของการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์สมการเชิงลึกพบว่า ถ้าให้ช่องทางออกใหญ่กว่าช่องทางเข้า ($A_3/A_1 > 1$) จะสามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) ได้

5.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

วิเคราะห์อัตราการระบายอากาศด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ก่อนเริ่มคำนวณได้ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมกับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนแนวตั้งใน 2 มิติ ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกันดีกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่หาคำตอบจากกรรมวิธีความเสมือน (similarity method) (Kay and Crawford (1993)) รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงความเร็ว ไร้มิติและอุณหภูมิที่คำนวณได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลเฉลยแม่นยำตรง ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ความเร็วไร้มิติที่คำนวณได้จากโปรแกรม ANSYS CFX เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง



รูปที่ 5.2 อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ANSYS CFX เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง

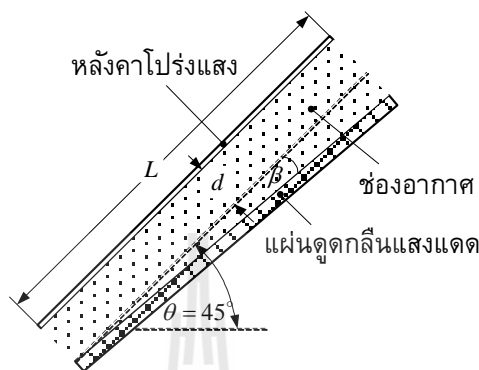
ปล่องแดดที่ทำการศึกษา มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 5.3 รูปแบบพื้นฐานที่ศึกษาคือ ปล่องแดดไม่มีมุมขยาย ($\beta = 0^\circ$) ช่องหลังคากว้าง 14 cm ความลาดเอียงคงที่ที่ 45° สมมุติให้การไหลเป็นแบบคิดความหนืด (viscous flow) และอยู่ในช่วงราบเรียบ (laminar) ในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้เปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยดังนี้

มุมขยาย (β): 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6°

ความกว้างของช่องอากาศ (d): 12 14 และ 16 cm

ความยาวของปล่องแคด (L): 1 และ 2 m

ความเข้มของแสงแคด (\dot{Q}): 500, 800 W/m²



รูปที่ 5.3 ลักษณะและองค์ประกอบของปล่องแคด

ใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX จำลองการไหลในระบบ 2 มิติ ผ่านปล่องแคดที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.3 ภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้

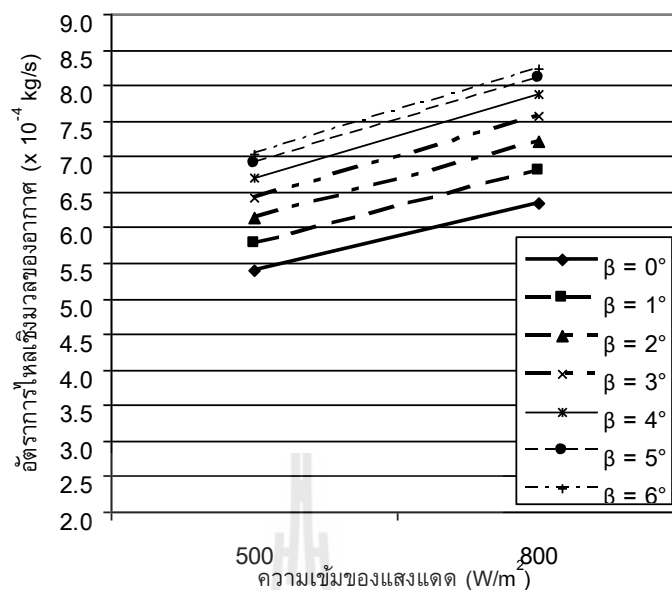
1. อากาศภายในช่องอากาศของปล่องแคดได้รับความร้อนจากแสงแคดเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรแบบเอกรูป (uniform heat source) โดยหาแบบ distributed กล่าวคือ ที่หน้าตัดใหญ่กว่าจะได้รับความร้อนต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่า
2. เป็นการไหลแบบราบเรียบ เพราะเป็นการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัว ในระยะทางสั้น ๆ ค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) ค่อนข้างต่ำ
3. ใช้ Boussinesq Model เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น

5.4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

ในการคำนวณหาผลลัพธ์ได้พิจารณาค่าเศษตกค้าง (residual) ของสมการนาเวียร์-สโตกส์โตกว่ามีการลู่อเข้า ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของคำตอบ นอกจากนี้เนื่องจากการไหลในช่อง ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลที่แต่ละหน้าตัดต้องเท่ากันตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จึงใช้เป็นอีกหนึ่งเงื่อนไขในการตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบเชิงตัวเลขที่ได้

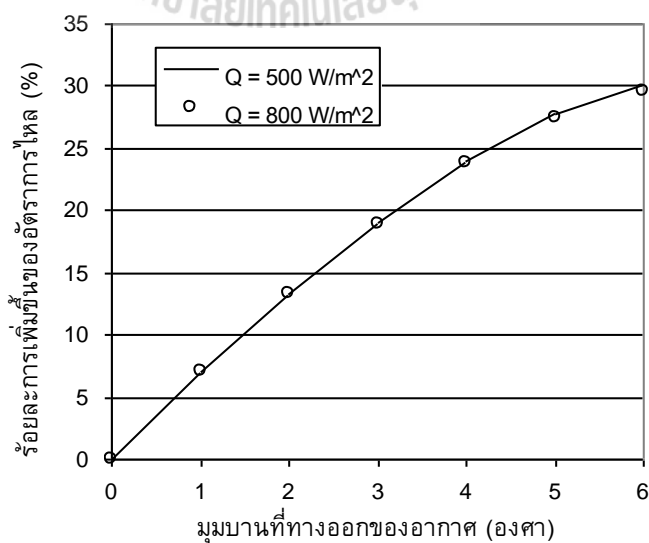
5.4.1 ผลกระทบจากการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล

รูปที่ 5.4 แสดงผลของมุมบานช่องหลังคา (β) จาก 0 - 6° โดยใช้ความกว้างของช่องอากาศ 14 cm ซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อมุมบานมีค่ามากขึ้น แต่อัตราการเพิ่มมีค่าลดลงเมื่อมุมบานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5.4 อัตราการไหลเชิงมวลที่มุมบานต่างๆ

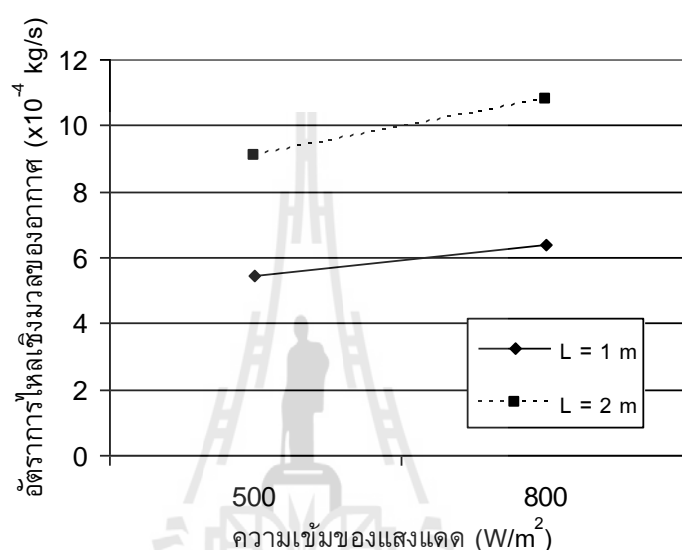
จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าร้อยละของการเพิ่มอัตราการไหลเป็นปฏิภาคกับมุมบาน เป็นที่น่าสังเกตว่าข้อมูลของสองกรณีที่มีความเข้มของแสงแดดต่างกันสองค่ามีการซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงว่าเกิดความเหมือนของข้อมูลตามระบบตัวแปรไร้มิติ จากกราฟพบว่ามุมบานส่งผลให้เกิดการเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้มากถึง 30% ที่มุมบาน 6° โดยในช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้น จากนั้นอัตราการเพิ่มมีค่าลดลง



รูปที่ 5.5 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเทียบกับกรณีมุมบานเท่ากับ 0°

5.4.2 ผลกระทบจากความยาวของปล่องแคด

เพื่อศึกษาผลกระทบจากความยาวของปล่องแคดได้จำลองการไหลผ่านปล่องแคดกรณีแผ่นขนาน โดยให้ความกว้างของช่องอากาศคงที่เท่ากับ 14 cm ความยาวของปล่องแคดเป็น 1 m และ 2 m ความเข้มของแสงแคดเป็น 500 W/m^2 และ 800 W/m^2 ตามลำดับ แสดงผลในรูปของอัตราการไหลเชิงมวลเทียบกับความเข้มของแสงแคดที่ความยาวของปล่องแคด 1 m และ 2 m ดังแสดงในรูปที่ 5.6



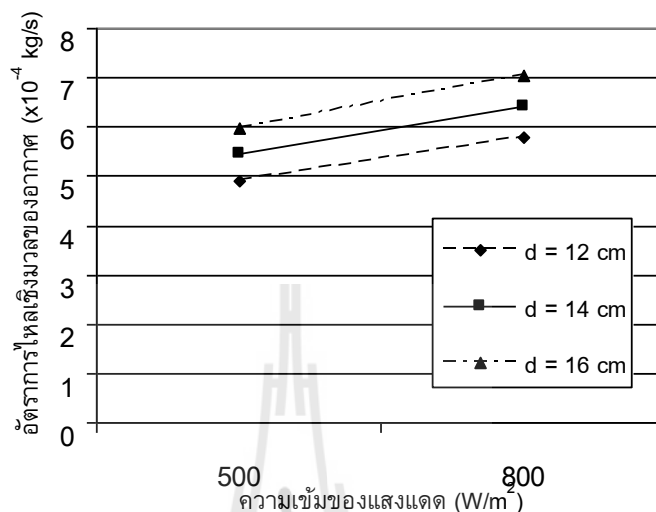
รูปที่ 5.6 อัตราการไหลเชิงมวลที่ความยาวของปล่องแคดต่างกัน

เมื่อให้ความยาวของปล่องแคดเพิ่มจาก 1 m เป็น 2 m (ความยาวเพิ่มขึ้น 2 เท่าตัว) ที่ความเข้มของแสงแคดเท่ากับ 500 W/m^2 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 67.5% และที่ความเข้มของแสงแคด 800 W/m^2 อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นประมาณ 68.3% หมายความว่าไม่ได้เพิ่ม 2 เท่าตามความยาว ซึ่งเป็นไปตามกฎของการบานตัวแบบไอเซนทรอปิก ($pv^k = c$) ที่กำหนดว่าความหนาแน่นจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่าการลดความดันส่งผลให้แรงลอยตัวมีค่าน้อยที่ความสูงมาก ถึงแม้ว่าร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อเพิ่มความเข้มของแสงแคดที่ความยาว 1 m กับ 2 m จะมีค่าเกือบเท่ากัน แต่หากพิจารณาในเชิงปริมาณพบว่าอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นที่ความยาวปล่อง 2 m มีค่ามากกว่าที่ 1 m ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ความยาว 2 m มีความชันมากกว่าเส้นกราฟของ 1 m แสดงว่าการเพิ่มความเข้มแสงแคดมีผลสูงกว่าในปล่องที่มีความยาวมากกว่า

5.4.3 ผลกระทบจากการเพิ่มความกว้างของช่องอากาศ

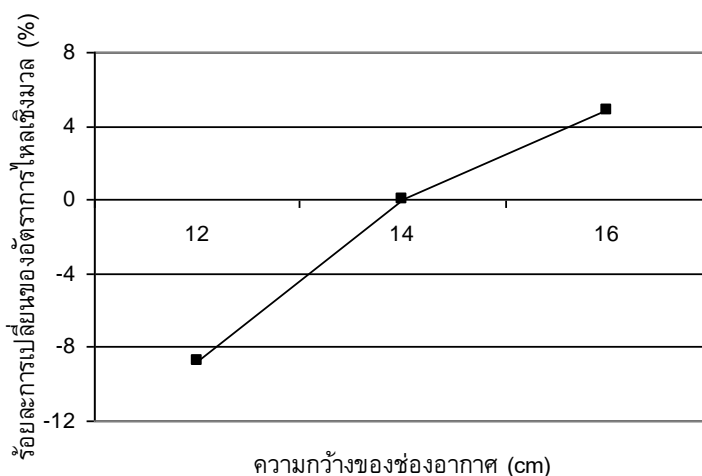
จำลองการไหลโดยเปลี่ยนความกว้างของช่องอากาศสามค่า คือ 12, 14 และ 16 cm กำหนดให้ความยาวของปล่องแคดคงที่เท่ากับ 1 m ผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งพบว่า การเพิ่มความกว้างของช่องอากาศส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศสูงขึ้น และยังมีแนวโน้มว่าหากเพิ่ม

ความกว้างของช่องอากาศมากขึ้นยังสามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้ต่อไป โดยสังเกตได้จากระยะห่างระหว่างเส้นกราฟซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ



รูปที่ 5.7 อัตราการไหลเชิงมวลเทียบกับความกว้างของช่องอากาศต่าง ๆ

จากนั้นหาร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลโดยคิดเทียบกับปล่องแคบที่มีความกว้างของช่องอากาศ 14 cm และแสดงผลในรูปของเส้นกราฟดังรูปที่ 5.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าลดความกว้างของปล่องแคบจาก 14 cm เป็น 12 cm จะทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงประมาณ 8.8% และเพิ่มขึ้นประมาณ 4.9% เมื่อให้ความกว้างของช่องอากาศเป็น 16 cm



รูปที่ 5.8 ร้อยละการเปลี่ยนของอัตราการไหลเทียบกับกรณี $d = 14$ cm

5.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์จากการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่านอกจากความเข้มของแสงแดดที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงกับอัตราการระบายอากาศแล้ว ปัจจัยโครงสร้างของปล่องแดดยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการระบายอากาศ ที่สำคัญและถูกมองข้ามโดยนักวิจัยคือมุมบานของปล่องแดดที่สามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้มากถึง 30% ส่วนความยาวและความกว้างช่องอากาศก็มีผล โดยการเพิ่มระยะความกว้างของช่องอากาศเพียงเล็กน้อย (2 cm) สามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ถึง 4.9% หรือการเพิ่มความยาวของปล่องแดดจาก 1 m เป็น 2 m สามารถเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้ถึง 68% แต่กรณีหลังนี้อาจกระทำไม่ได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากข้อจำกัดเชิงกายภาพของเนื้อที่หลังคา

การศึกษานี้ยังหาข้อสรุปไม่ได้ว่าขนาดของปัจจัยโครงสร้างแต่ละปัจจัยควรมีค่าเท่าใดจึงจะทำให้เกิดการระบายอากาศได้มากที่สุด ซึ่งจะได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาจุดออกแบบที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้จะทำการศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อเป็นการนำทาง โดยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.6 รายการอ้างอิง

พรสวรรค์ ทองใบ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2004). การใช้ห้องหลังคาและปล่องช่วยในการถ่ายเทอากาศ : การวิเคราะห์เชิงตัวเลข. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ANSYS CFX, Release 11.0. ANSYS, Inc.

Afonso C., and Oliviera A. (2000). **Solar chimneys: simulation and experiment.** Energy and Buildings 32: 71-79.

Bansal N.K., Methur R., Bhandari M.S. (1993). **Solar chimney stack ventilation.** Building and Environment 28(3): 373-377.

Bansal N.K., Methur J., Methur S., and Jane M. (2005). **Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation.** Building and Environment 40: 373-377.

Bouchair A. **Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria.** Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 15, No, 2, 1994, pp. 81 – 93.

Burek S. A.M., and Habeb A. (2007). **Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls.** Energy and Buildings 39: 128-135.

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.
- Gan G. (1998). **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings**. Energy and Buildings 27: 37-43.
- Hamdy L.F., and Fikry M.A. (1998). **PASSIVE SOLAR VENTILATION**. Renewable Energy 14(1-4): 381-386
- Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong, N., and Khedari, J. (2001). **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation**. Building and Environment 36(3): 383-391.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, J., Yimsamerjit, P., and Hirunlabh, J. (2002). **Experimental investigation of free convection in roof solar collector**. Building and Environment 37(5): 455-459.
- Kays, W.M. and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer**. (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- Zhai X.Q., Dai Y.J., Wang R.Z. (2005). **Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors**. Applied Thermal Engineering 25: 741-757.

บทที่ 6

ปัจจัยกระทบต่อปริมาณการระบายอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องแดด

6.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้ห้องหลังคาและปล่องแดดช่วยเพิ่มการระบายอากาศแบบธรรมชาติในอาคาร วิธีการหลักคือ การใช้หลังคาที่ทำจากวัสดุโปร่งใสเพื่อให้รับแสงแดดได้มากจากปรากฏการณ์เรือนกระจก และมีแผ่นโลหะสีดำเป็นอุปกรณ์ช่วยดูดซับความร้อนจากแสงแดด ระหว่างหลังคาโปร่งใสกับแผ่นโลหะดูดซับความร้อนจะกั้นด้วยช่องว่างเพื่อให้อากาศซึ่งรับความร้อนจากแผ่นดูดซับความร้อนไหลผ่าน และไหลออกผ่านช่องเปิดด้านบนของหลังคาด้วยแรงลอยตัว ซึ่งการไหลนี้เหนี่ยวนำอากาศเย็นในอาคารให้เกิดการถ่ายเทออกไปพร้อมกัน ได้ศึกษาเชิงตัวเลขถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณการไหล คือ ความกว้างของช่องอากาศ ความสูงของปล่องแดด การกระจายของพื้นที่หน้าตัดช่องทางไหลของอากาศ ตลอดจนความเข้มของแสงแดด พบว่าทุกปัจจัยศึกษามีผลต่ออัตราการระบายอากาศทั้งสิ้น

6.2 คำนำ

ห้องหลังคาและปล่องถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) หรือเพื่อช่วยเพิ่มการระบายอากาศ ซึ่งมีลักษณะและตำแหน่งการติดตั้งเข้ากับอาคารที่แตกต่างกันออกไป หลักการทำงานของระบบนี้คือการใช้พื้นที่หลังคาที่รับแสงแดดเข้ามาทำให้อากาศในช่องหลังคาร้อนขึ้น อากาศร้อนนี้จะลอยตัวสูงขึ้นไปตามช่องหลังคา และถูกปล่อยออกที่ช่องทางออกด้านบน และในขณะเดียวกันก็เหนี่ยวนำอากาศเย็นเข้ามาสู่ช่องทางเข้าด้านล่าง (ดูรูปที่ 6.3) เมื่อช่องทางเข้าต่ออยู่กับด้านในของอาคารก็จะสามารถใช้ระบายอากาศในอาคารได้ จะเห็นได้ว่าหลักการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่าย แต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นไม่ง่ายนัก

นักวิจัยได้ศึกษาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายอากาศโดยธรรมชาติในรูปแบบ ต่าง ๆ ทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี (ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์) การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง จากงานวิจัยของ Bansal, Methur and Bhandari (1993) และ Bansal, Methur J., Methur S., and Jane (2005) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยการใช้ปล่องแดดเหนี่ยวนำให้เกิดการไหล โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าอัตราไหลของอากาศที่เกิดจากปล่องแดด พบว่าปล่องแดดสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราไหลได้ $50-165 \text{ m}^3/\text{h}$ ต่อพื้นที่ปล่องแดด 1 m^2 นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราไหลของอากาศขึ้นอยู่กับปัจจัยโครงสร้างของปล่องแดด เช่น พื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลของอากาศ ตลอดจนประสิทธิภาพในการดูดซับความร้อนของปล่องแดด ต่อมาได้ศึกษาความเป็นไปได้ใน

การระบายอากาศด้วยปล่องแคบขนาดเล็กที่มีความยาว 1 m กว้าง 1 m พบว่าสามารถทำให้เกิดความเร็วสูงสุดภายในปล่องได้ 0.24 m/s ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากการทดลอง Afonso and Oliveira (2000) เสนอว่าการออกแบบปล่องแคบที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศควรพิจารณา 2 ตัวแปร คือ ความยาวและความกว้างของช่องทางไหล เพราะอัตราการระบายอากาศจะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของปล่อง Gan (1998) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนความร้อน ปริมาณความร้อนที่ได้รับ ความสูงและความหนาของผนัง (ติดตั้งปล่องแคบเข้ากับผนังอาคาร) พบว่าความเข้มของแสงแดดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ปล่องแคบประมาณ 10% นอกจากนี้ยังพบว่าความกว้างของช่องทางไหลขนาด 0.55-0.6 m ทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศสูงสุดเมื่อพิจารณาที่ความสูงปล่อง 6 m หากความกว้างปล่องมากกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับที่บริเวณด้านบนของปล่อง Bouchair (1994) พบว่าอัตราไหลสูงสุดที่ค่าความกว้างของปล่องประมาณ 1/10 ของความสูงปล่อง ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยของ Burek and Habeb (2007) ที่พบว่าอัตราการไหลของอากาศภายในปล่องขึ้นอยู่กับความกว้างของปล่องและปริมาณความร้อนที่ได้รับเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gan (1998) นอกจากนี้ Hamdy and Fikry (1998) ยังพบว่าอัตราการไหลขึ้นอยู่กับระยะในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของปล่องแคบ (stack height) และมุมเอียงของหลังคาปล่องแคบที่เหมาะสมที่สุดคือ 60° นอกจากนี้ Zhai, Dai and Wang (2005) ได้ศึกษาการใช้ปล่องแคบแบบช่องทางไหลเดี่ยวและแบบช่องทางไหลคู่ พบว่าปล่องแคบแบบช่องทางไหลคู่ สามารถทำให้เกิดการระบายอากาศได้ 20 ACH ที่มุมเอียงของหลังคาปล่องแคบ 30° หากต้องการให้ปล่องแคบแบบช่องทางไหลเดี่ยวระบายอากาศได้ในปริมาณเท่ากัน จะต้องเอียง 75° ซึ่งยากในการปฏิบัติ และยังคงไม่สวยงามอีกด้วย จากการคำนวณยังพบว่าปล่องแคบแบบช่องทางไหลคู่มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศสูงกว่าแบบช่องทางไหลเดี่ยวถึง 10%

งานวิจัยของคนไทยที่เกี่ยวกับการระบายอากาศโดยธรรมชาติในปัจจุบันพบมากขึ้น โดยทำการศึกษาการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร และได้แนะนำว่าปล่องแคบที่ดีควรมีความกว้างของช่องอากาศในช่วง 10-14 cm ยาว 1-2 m และมีมุมเอียงของหลังคา $20-45^\circ$ (Hirunlabh, Washirapuwadon, Prtinthong and Khedari (2001), Khedari, Hitunlabh, and Bunnag (1997), Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratingthong and Hirunlabh (2000), Khedari, Ingkawanich, Waewsak and Hirunlabh (2002), Khedari, Yimsamerjit, and Hirunlabh (2002)) นอกจากนี้ พรสวรรค์ และ ทวีช (2004) ยังได้เสนอวิธีการระบายอากาศด้วยห้องหลังคาและปล่องแคบ ซึ่งพบว่าสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศได้สูงเพียงพอต่อความต้องการอยู่อาศัยของผู้อาศัย และยังพบว่าความสูงและพื้นที่หน้าตัดของปล่องตลอดจนความเข้มของแสงแดด ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ และพบว่ามุมเอียงที่ดีที่สุดของหลังคาคือ 45°

จากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปได้ว่าปริมาณการระบายอากาศพิจารณาได้จากค่าอัตราไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคาร ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้าง (geometrical parameters) ของปล่องแคบ ไม่ว่าจะเป็นระยะในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้าและช่องทางออกของระบบ (stack height)

หรือขนาดของช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศ ตลอดจนความกว้างของช่องอากาศ (air gap width) และความยาวของปล่องแคด (ซึ่งอาจหมายถึงความยาวของหลังคาหากประยุกต์ปล่องแคดเป็นส่วนหนึ่งของหลังคา) งานวิจัยเร็ว ๆ นี้ของ พรสวรรค์ และ ทวิช (2008) พบว่ากระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล โดยการเพิ่มมุมบานที่ทางออกของปล่อง สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ โดยร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อเทียบกับกรณีมุมบานเป็นศูนย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อให้มีมุมบานเพียง 1-5°

งานวิจัยนี้ทำการขยายขอบเขตการศึกษาจาก พรสวรรค์ และ ทวิช (2008) นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มปล่องเข้ากับระบบ โดยติดตั้งปล่องเข้ากับทางออกเดิม วิธีนี้ทำให้ระยะในแนวตั้งของช่องเปิดทางเข้าและทางออกของระบบมากขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้มากพอสมควร โดยแรงคลอใจในการศึกษานี้เกิดจากการศึกษาเชิงทฤษฎี โดยในงานวิจัยของ Chitsomboon (2001) ผู้วิจัยได้ทำนายการไหลในระบบปล่องแคดเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าไว้เป็นสมการคือ

$$\frac{1}{2} m V_1^2 \left[\rho_1 - 2\rho_1 A_1^2 \int_1^3 \frac{dA}{A^3} + \frac{2A_1 q''}{V_1 c_p T_1} \int_1^3 \frac{dA_r}{A^2} + \frac{2\rho_1 A_1^2 g h_c}{\gamma R T_1} \int_1^3 \frac{dA}{A^3} \right] = \frac{\rho_1 g h_c q''}{c_p T_3} \int_1^3 dA_r \quad (6.1)$$

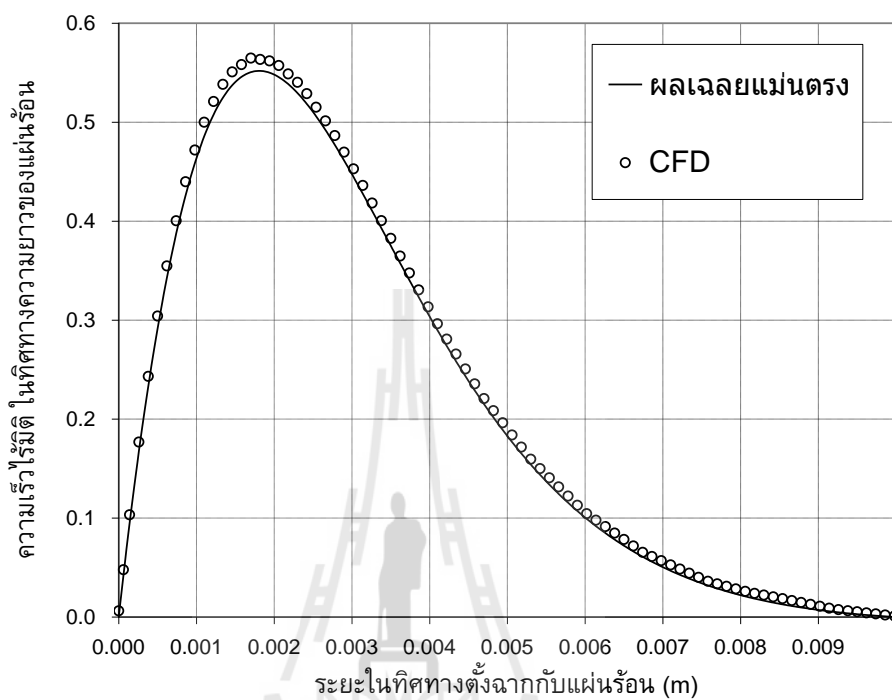
ซึ่งสมการนี้เป็นผลจากการตั้งเงื่อนไขสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงานเข้าด้วยกัน และผลการทำนายของสมการนี้สอดคล้องกับการทำนายของการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์สมการเชิงลึกพบว่า ถ้าให้ช่องทางออกใหญ่กว่าช่องทางเข้า ($A_3 / A_1 > 1$) จะสามารถเพิ่มอัตราการไหล (\dot{m}) ได้

6.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

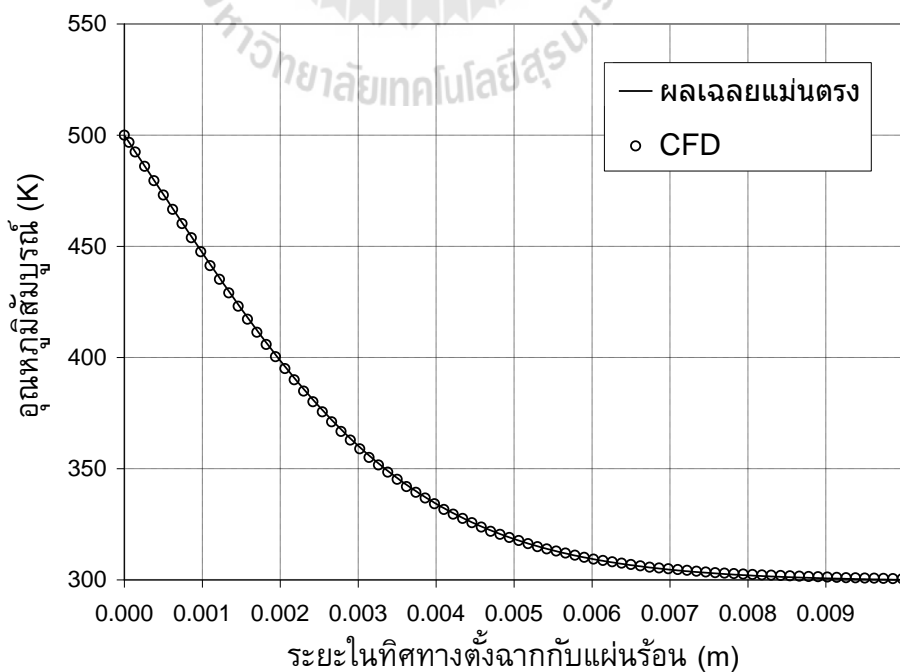
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX ก่อนที่จะนำโปรแกรมฯ ไปจำลองการไหลผ่านระบบที่ต้องการศึกษา ได้ทำการทดสอบโปรแกรมฯ กับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนแนวตั้งใน 2 มิติ ซึ่งเป็นปัญหาการไหลแบบคงตัวที่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้จากกรรวิธีความเสมือน (similarity method) (Kay and Crawford (1993))

การจำลองปัญหาการไหลที่ซับซ้อนด้วยแรงลอยตัวของโปรแกรม ANSYS CFX จะต้องจำลองด้วย Transient model เท่านั้น ผู้วิจัยได้ลองเปลี่ยนรูปแบบของเงื่อนไขขอบเขตจนกระทั่งได้รูปแบบที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ โดยเลือกใช้ Advection scheme เป็นแบบ Specified Blend Factor เท่ากับ 1.0 เทียบเท่ากับ second order ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีความถูกต้องค่อนข้างสูง และใช้ Transient scheme เป็นแบบ Second Order Backward Euler ผลลัพธ์แสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติของความเร็วและอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2 พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลเฉลยแม่นยำ โดยมีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แสดงถึงความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากการจำลอง

ด้วยโปรแกรมฯ ตลอดจนทราบแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตหรือกำหนดค่าต่าง ๆ ภายในโปรแกรมฯ ก่อนทำการจำลองปัญหาการไหลจริงต่อไป



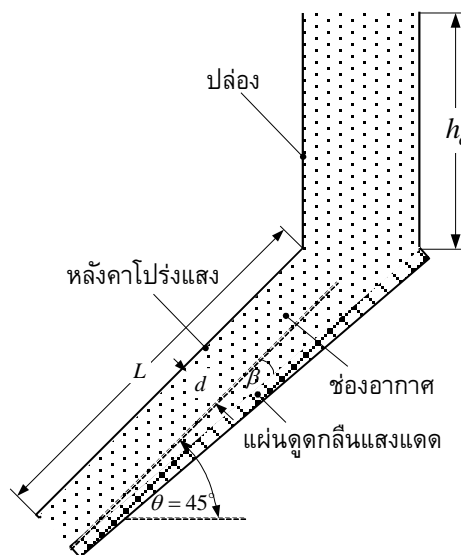
รูปที่ 6.1 ความเร็วไร้มิติที่คำนวณได้เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ



รูปที่ 6.2 อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่คำนวณได้เทียบกับผลเฉลยแม่นยำ

ลักษณะของห้องหลังคาและปล่องแดดที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 6.3 และ 6.4 โดยในรูปที่ 6.3 เป็นห้องหลังคาที่ไม่มีการติดตั้งปล่อง ส่วนรูปที่ 6.4 เป็นห้องหลังคาที่ติดตั้งปล่องในแนวตั้งเข้ากับทางออก รูปแบบพื้นฐานของระบบที่ศึกษามี 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 คือ ห้องหลังคาที่ไม่มีการบานตัวของช่องว่างอากาศ ($\beta = 0^\circ$) ความกว้างของช่องอากาศ 14 cm มุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 45° ส่วนรูปแบบที่ 2 เหมือนรูปแบบที่ 1 ทุกประการเพียงแต่เพิ่มปล่องเข้าไปที่ทางออก ได้ศึกษาการผลกระทบท่อปริมาณอัตราไหลมวลของอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- มุมบานตัวของช่องอากาศ (β): $0 - 12^\circ$ เพิ่มขึ้นทีละ 1°
- ความกว้างของช่องอากาศ (d): 12 – 60 cm
- ความยาวของหลังคา (L): 1 - 4 m เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 m
- ความสูงของปล่องแดด (h_c): 0 – 1.25 m เพิ่มขึ้นทีละ 0.25 m
- ความเข้มของแสงแดด (\dot{q}): 500, 650, 800 และ 900 W/m^2



รูปที่ 6.4 ห้องหลังคาแบบมีปล่อง

การจำลองการไหล ได้กระทำภายใต้สมมุติฐานดังนี้

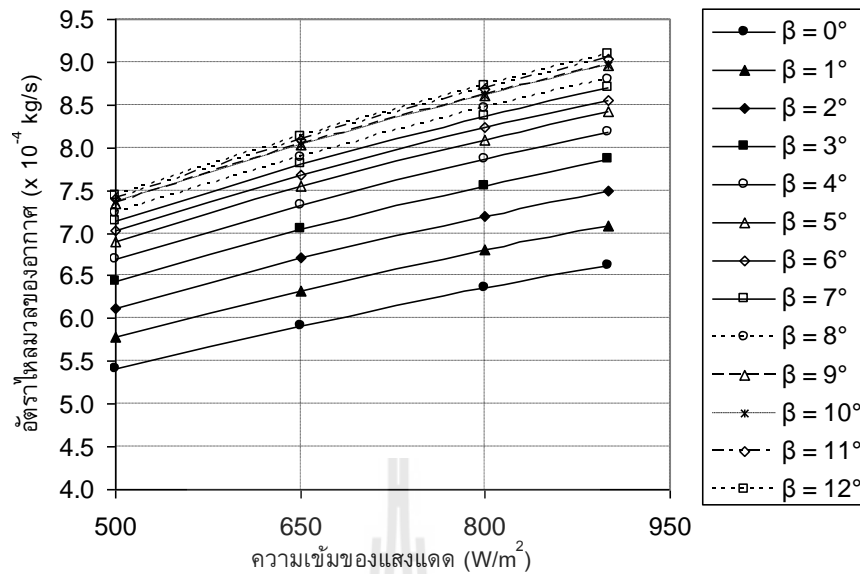
1. เป็นการไหลในระบบพิกัด 2 มิติ
2. อากาศภายในช่องอากาศของปล่องแคบได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรแบบเอกรูป (uniform heat source)
3. เป็นการไหลแบบมีความหนืดที่ราบเรียบ (laminar) เพราะเป็นการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัวในระยะทางสั้นๆ ที่ค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) ต่ำ
4. ใช้ Boussinesq Model เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่ได้รับความร้อน การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใช้รูปแบบเดียวกับปัญหาการไหลที่ใช้ในการทดสอบ โปรแกรม เนื่องจากเป็นปัญหาการไหลแบบการพาอิสระเช่นเดียวกัน

6.4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

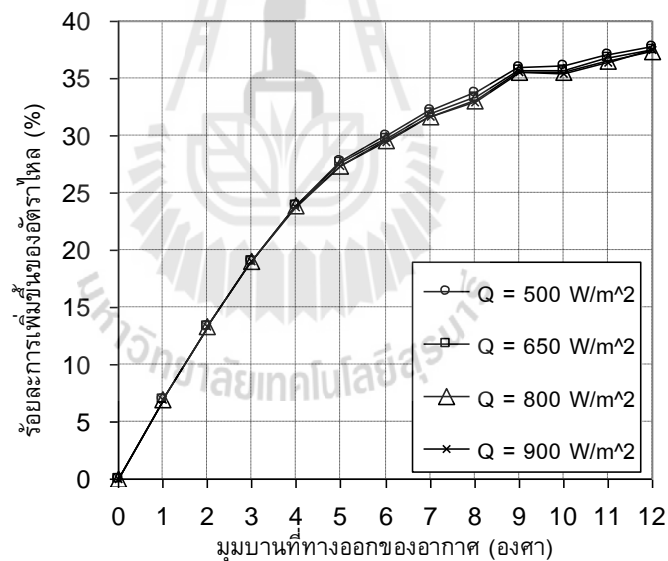
ความมั่นใจในผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมฯ พิจารณาจาก 2 ปัจจัย หนึ่งคือ ค่าเศษตกค้าง (residual) ของสมการนาเวียร์-สโตค โดยตรวจสอบได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่โปรแกรมแสดงผลว่ามีการลู่อู่เข้าหรือไม่ และมีค่าต่ำเพียงพอต่อการยอมรับได้หรือไม่ และสองคือ เนื่องจากการไหลในช่อง ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลที่แต่ละหน้าตัดต้องมีค่าเท่ากันตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass)

6.4.1 ผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล

ผลกระทบต่ออัตราไหลเชิงมวลจากการเพิ่มมุมบานที่ทางออกแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 ซึ่งเห็นได้ว่าการบานตัวออกสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ โดยเฉพาะช่วงมุมบานเล็ก ๆ $1 - 6^\circ$ สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้สูงถึง 30% จะเห็นได้จากระยะห่างระหว่างเส้นกราฟแต่ละเส้น จากนั้นอัตราการเพิ่มจะเริ่มช้าลงหากเปรียบเทียบอัตราไหลกับกรณีพื้นฐานที่มีมุมบานเป็นศูนย์องศา โดยคิดเป็นร้อยละการเพิ่มของอัตราไหล จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ซึ่งพบว่าร้อยละของการเพิ่มของอัตราไหลเป็นปฏิภาคกับมุมบาน น่าสังเกตว่าข้อมูลที่ได้จากกรณีความเข้มของแสงแดดต่างกัน 4 เกิดการซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงว่าเกิดความเหมือนของข้อมูลตามระบบตัวแปรไร้มิติ โดยในช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้นและมีค่าค่อนข้างสูง สังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ จากนั้นอัตราการเพิ่มเริ่มช้าลง



รูปที่ 6.5 ผลกระทบของมุมบานที่ทางออกต่ออัตราไหลมวล

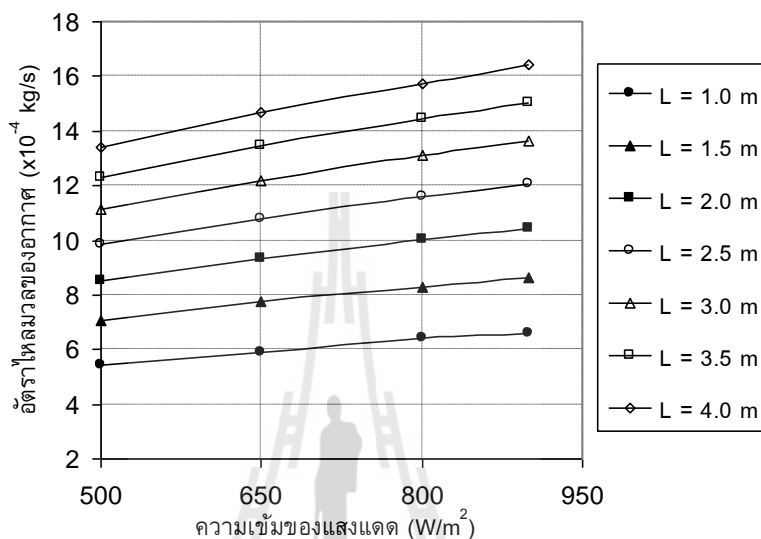


รูปที่ 6.6 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลเทียบกับกรณีมุมบาน = 0°

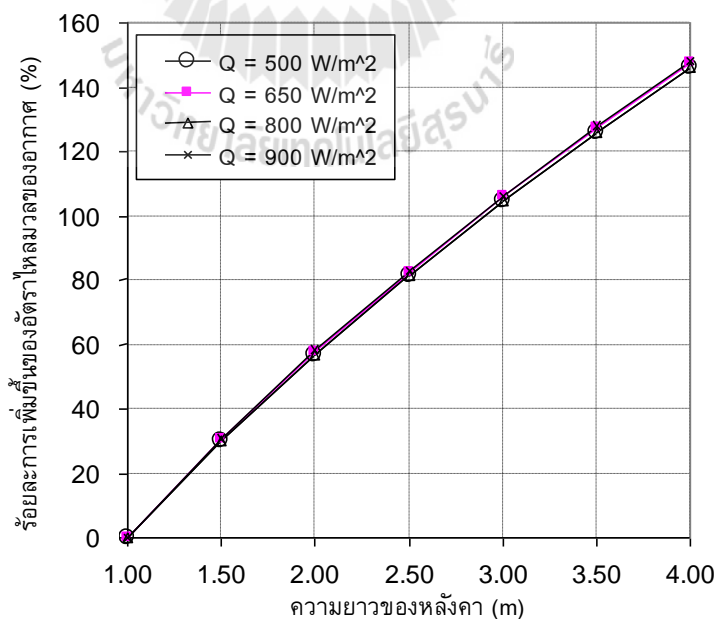
6.4.2 ผลกระทบจากความยาวหลังคา

เมื่อเพิ่มความยาวของหลังคาพบว่าสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลของอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 โดยความยาวของหลังคาที่ทำการศึกษาคือ 1-4 m ได้ศึกษาในกรณีที่ไม่มียูนบาน ความกว้างของช่องอากาศคงที่ 14 cm ความเข้มของแสงแดด 500, 650, 800 และ 900 W/m² โดยภาพรวมเห็นได้ว่าอัตราไหลเพิ่มเมื่อเพิ่มความยาว (ซึ่งเป็นการเพิ่มความร้อนและความสูงโดยปริยายนั่นเอง) และเป็นการเพิ่มในอัตราที่ลดลงเล็กน้อย และยังเห็นว่าเส้นกราฟของกรณีความเข้มของแสงแดดทั้ง 4 ค่าซ้อนทับกันซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเสมือนของข้อมูล หากพิจารณาค่าอัตราไหลมวลเมื่อเพิ่มความยาวของหลังคา

จาก 1 m เป็น 2 m (ความยาวเพิ่มขึ้น 2 เท่าตัว) พบว่าอัตราไหลมวลเพิ่มขึ้นประมาณ 60% หมายความว่าไม่ได้เพิ่ม 2 เท่าตามความยาว ซึ่งเป็นไปตามกฎของการบานตัวแบบไอเซนทรอปิก ($pv^k = c$) ที่กำหนดว่าความหนาแน่นจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่าการลดความดัน ซึ่งส่งผลให้แรงลอยตัวซึ่งเกิดจากการลดลงของความหนาแน่นมีค่าน้อยลงที่ความสูงมากขึ้น



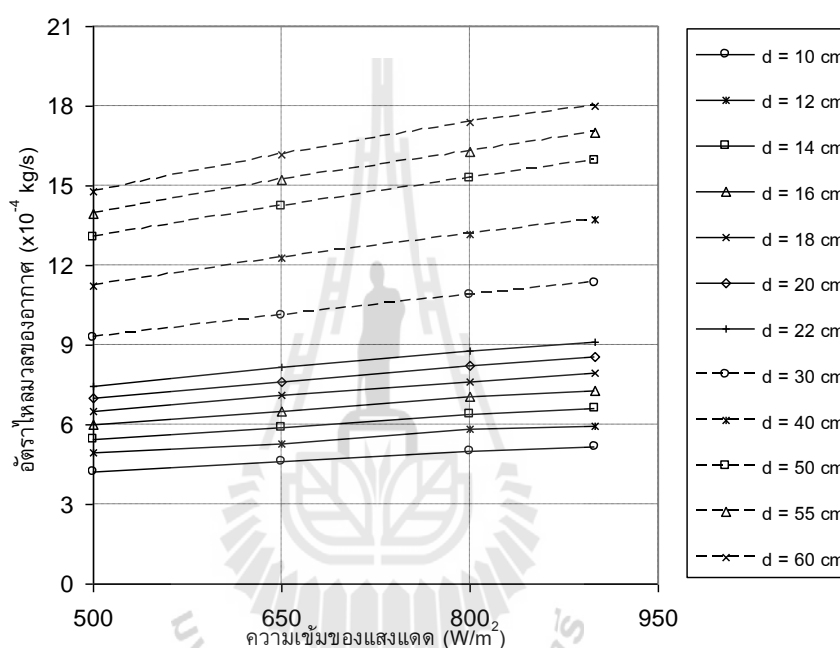
รูปที่ 6.7 ผลกระทบของความยาวหลังคาต่ออัตราไหลมวล



รูปที่ 6.8 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลเทียบกับกรณีหลังคายาว 1 m

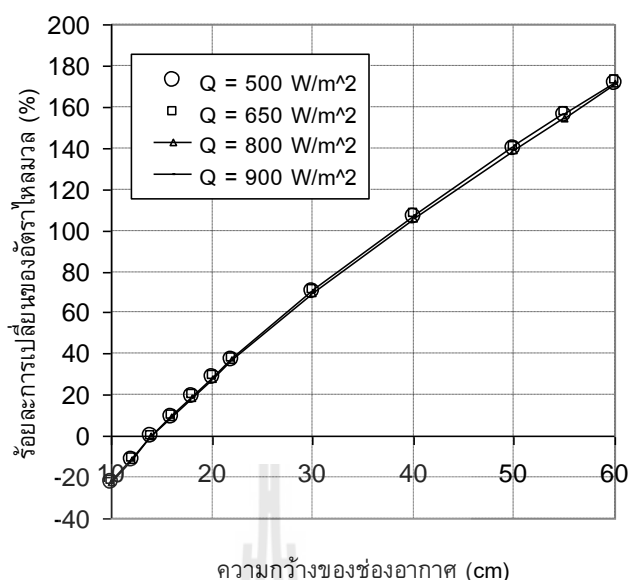
6.4.3 ผลกระทบจากความกว้างของช่องอากาศ

เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของช่องอากาศหรือช่องทางไหลจาก 12 ถึง 22 cm โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2 cm พบว่าการเพิ่มความกว้างของช่องอากาศมีผลทำให้อัตราไหลมวลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 6.9 และมีแนวโน้มว่าหากเพิ่มความกว้างของช่องอากาศมากขึ้นยังสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้ต่อไป โดยสังเกตได้จากระยะห่างระหว่างเส้นกราฟซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลของอากาศ



รูปที่ 6.9 ผลกระทบของความกว้างของช่องอากาศต่ออัตราไหลมวล

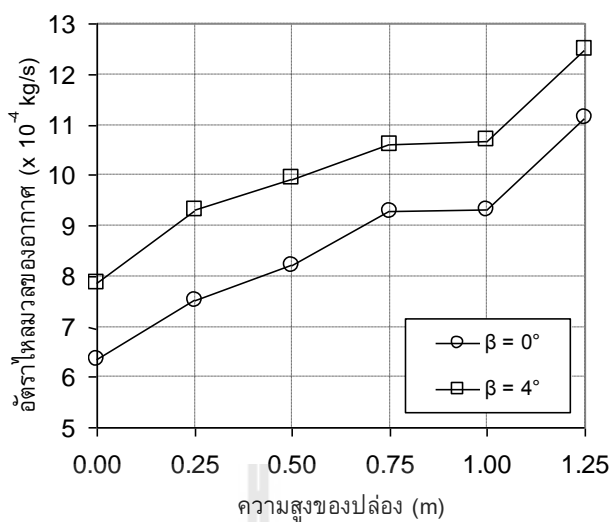
จากนั้นหำร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลโดยคิดเทียบกับปล่องแดดที่มีความกว้างของช่องอากาศ 14 cm ดังแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 6.10 จะเห็นว่าร้อยละการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราไหลมวลเกือบจะเป็นเชิงเส้น โดยหากให้ความกว้างของช่องอากาศเล็กลงจาก 14 cm เป็น 12 cm ทำให้อัตราไหลมวลของอากาศลดลงประมาณ 11.2% และเพิ่มขึ้นประมาณ 9.3% เมื่อให้ความกว้างของช่องอากาศเป็น 16 cm



รูปที่ 6.10 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลรวมเทียบกับกรณี $d = 14$ cm

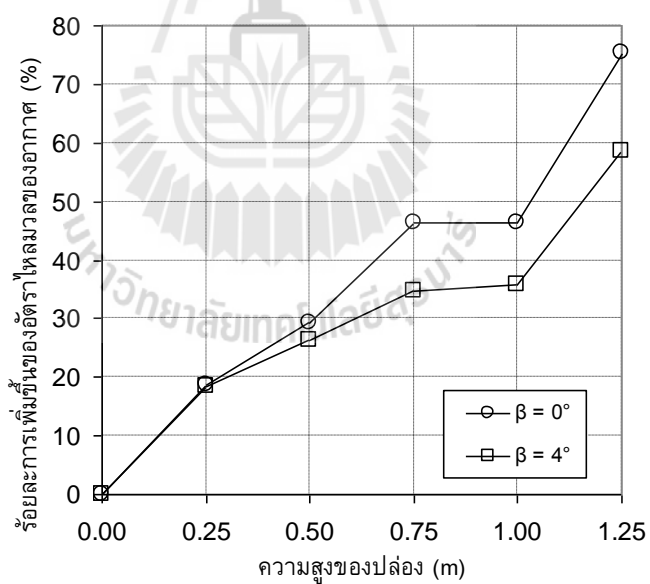
6.4.4 ผลกระทบจากความสูงของปล่องที่ต่อนหลังคา

กรณีนี้กระทำขึ้นเพราะคาดหวังว่าการเพิ่มระยะในแนวตั้งระหว่างช่องทางเข้า/ออกของอากาศ (stack height) โดยไม่มีการให้พลังงานแสงแดดเพิ่ม จะสามารถเพิ่มอัตราไหลรวมได้มากขึ้น ซึ่งหากเป็นจริงก็จะเพิ่มแนวทางในการออกแบบระบบระบายอากาศได้มากยิ่งขึ้น จำลองการไหลเมื่อให้ปล่องสูง 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, และ 1.25 m ตามลำดับ ความยาวของหลังคาและความกว้างของช่องอากาศคงที่เท่ากับ 1 m และ 14 cm ตามลำดับ กราฟแสดงอัตราไหลรวมเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีปล่อง ดังแสดงผลในรูปที่ 6.11 พบว่าระบบที่มีปล่องสามารถเพิ่มอัตราไหลรวมได้ค่อนข้างมาก การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานจากการเพิ่มความสูงปล่องนั้นถือว่ามิติน้อย เพราะปล่องไม่สูงมากนัก (ค่า h/d กรณีสูงสุดมีค่าประมาณ 10 เท่านั้น) จึงมีผลน้อยนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปล่องสูง 1 m แทบจะไม่เพิ่มอัตราไหลรวมเมื่อเทียบกับกรณีปล่องสูง 0.75 m ซึ่งคาดว่าเป็นผลจาก Transient model ซึ่งเกิดขึ้น ณ ความสูงนี้เท่านั้น ผู้วิจัยลองเพิ่มความสูงปล่องเป็น 1.25 m ระบบก็ยังสามารถเพิ่มอัตราไหลรวมต่อไปได้



รูปที่ 6.11 ผลกระทบของความสูงปล่องต่ออัตราไหลมวล

ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลเทียบกับกรณีที่ไม่มีปล่องดังแสดงในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของอัตราไหลมวลเทียบกับกรณีไม่มีปล่อง

6.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

สามารถสรุปผลลัพธ์จากการศึกษาเชิงตัวเลขของปัจจัยที่มีผลต่อการระบายอากาศโดยธรรมชาติได้ดังนี้

1. การเพิ่มมุมบานที่ช่องทางออกของหลังคาสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้มากกว่า 30% ถือเป็นทางเลือกในการออกแบบการระบายอากาศที่ดีแนวทางหนึ่งที่ยังไม่พบในวรรณกรรม

2. ความยาวของหลังคามากขึ้นทำให้อัตราไหลมวลสูงขึ้น โดยหากเพิ่มความยาวของหลังคาจาก 1 m เป็น 2 m สามารถเพิ่มอัตราไหลมวลของอากาศได้ประมาณ 57%
3. การเพิ่มความกว้างของช่องอากาศสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้ ปริมาณการเพิ่มเกือบเป็นเชิงเส้นเทียบกับความกว้างที่เพิ่มขึ้น
4. การติดตั้งปล่องแนวตั้งที่ทางออกของหลังคาสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้มาก เพราะเป็นการเพิ่มระยะในแนวตั้งระหว่างช่องเปิดทางเข้าและทางออกของอากาศ (stack height) ในทางปฏิบัติการเลือกความสูงที่เหมาะสมของปล่องต้องคำนึงถึงความสวยงามและค่าวัสดุที่เพิ่มขึ้นด้วย

6.6 รายการอ้างอิง

- พรสวรรค์ ทองใบ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2004). การใช้ห้องหลังคาและปล่องช่วยในการถ่ายเทอากาศ : การวิเคราะห์เชิงตัวเลข. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พรสวรรค์ ทองใบ และ ทวีช จิตรสมบูรณ์. (2008). การเพิ่มประสิทธิภาพปล่องแดดเพื่อระบายอากาศในอาคาร. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ANSYS CFX, Release 11.0. ANSYS, Inc.
- Afonso C., and Oliviera A. (2000). **Solar chimneys: simulation and experiment.** Energy and Buildings 32: 71-79.
- Bansal N.K., Methur R., Bhandari M.S. (1993). **Solar chimney stack ventilation.** Building and Environment 28(3): 373-377.
- Bansal N.K., Methur J., Methur S., and Jane M. (2005). **Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation.** Building and Environment 40: 373-377.
- Bouchair A. **Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria.** Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 15, No, 2, 1994, pp. 81 – 93.
- Burek S. A.M., and Habeb A. (2007). **Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls.** Energy and Buildings 39: 128-135.
- 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.
- Gan G. (1998). **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings**. Energy and Buildings 27: 37-43.
- Hamdy L.F., and Fikry M.A. (1998). **PASSIVE SOLAR VENTILATION**. Renewable Energy 14(1-4): 381-386
- Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong, N., and Khedari, J. (2001). **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation**. Building and Environment 36(3): 383-391.
- Kays, W.M. and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer**. (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, 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.
- Khedari, J., Yimsamerjit, P., and Hirunlabh, J. (2002). **Experimental investigation of free convection in roof solar collector**. Building and Environment 37(5): 455-459.
- Zhai X.Q., Dai Y.J., Wang R.Z. (2005). **Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors**. Applied Thermal Engineering 25: 741-757.

บทที่ 7

การศึกษาเชิงตัวเลขของปัจจัยกระทบต่อปริมาณการระบายอากาศแบบธรรมชาติในอาคารด้วยระบบปล่องแดด

7.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้ห้องหลังคาและปล่องแดดช่วยเพิ่มการระบายอากาศแบบธรรมชาติในอาคาร วิธีการหลักคือหลังคาทำจากวัสดุโปร่งใสเพื่อได้รับแสงแดดได้มากจากปรากฏการณ์เรือนกระจก ใช้แผ่นโลหะสีดำเป็นอุปกรณ์ช่วยดูดซับความร้อนจากแสงแดด ระหว่างหลังคาโปร่งใสกับแผ่นโลหะดูดซับความร้อนจะคั่นด้วยช่องว่างอากาศเพื่อให้อากาศซึ่งรับความร้อนจากแผ่นดูดซับความร้อนไหลผ่าน และไหลออกผ่านช่องเปิดด้านบนของหลังคาด้วยแรงลอยตัว ซึ่งการไหลนี้เหนี่ยวนำอากาศเย็นในอาคารให้เกิดการถ่ายเทและทำความเย็นไปพร้อมกัน จำลองการไหลในสองมิติผ่านระบบปล่องแดดด้วยโปรแกรม ANSYS CFX วิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อปริมาณการไหล โดยเฉพาะการกระจายพื้นที่หน้าตัดช่องทางไหลของห้องหลังคาด้วยการบานตัวของช่องทางการไหล ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด มุมเอียง ความยาวของหลังคา ความกว้างของช่องอากาศ และความสูงของปล่อง ตลอดจนผลกระทบจากการใช้ห้องหลังคาแบบมีปล่องและไม่มีปล่องที่ความสูงรวมของระบบเท่ากัน พบว่าทุกปัจจัยมีผลต่ออัตราการระบายอากาศทั้งสิ้น

7.2 บทนำ

แนวคิดเรื่องระบบปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคารมีมาตั้งแต่อดีต โดยอาจมีขนาด รูปแบบ หรือตำแหน่งที่ประยุกต์ปล่องแดดเข้ากับอาคารแตกต่างกันออกไป ระบบปล่องแดดสามารถประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตประจำวันได้หลายทาง เช่น เพื่อการระบายอากาศและทำความเย็น หรือเพื่อการผลิตน้ำร้อน และเร็ว ๆ นี้ มีงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบปล่องแดด (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ระบบปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคาร โดยประยุกต์เข้ากับหลังคา ดังแสดงในรูปที่ 7.2 การไหลในระบบปล่องแดดเกิดจากแรงลอยตัว ขนาดของแรงลอยตัวขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศด้านในและด้านนอกของระบบระบบปล่องแดดส่วนใหญ่จึงใช้วัสดุโปร่งใส (transparent roof) คลุม ด้านนอกเพื่อยอมให้แสงแดดทะลุผ่านเข้ามาภายในช่องว่างอากาศ (air gap) ได้มาก และดูดกลืนความร้อนไว้ด้วยแผ่นดูดกลืนแสงแดด (absorber plate) ซึ่งโดยทั่วไปทำจากแผ่นโลหะและฉาบด้วยสีดำเพื่อช่วยให้ดูดกลืนแสงแดดได้มาก

อากาศภายในช่องว่างจะได้รับความร้อนจากที่ถ่ายเทจากแผ่นดูดกลืนแสงแดด ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นลดลง และลอยตัวสูงขึ้นและออกสู่บรรยากาศผ่านช่องทางออกด้านบน หากนำระบบนี้ประยุกต์เข้ากับอาคาร ก็จะสามารถเหนี่ยวนำอากาศเย็นจากด้านนอกเข้าสู่อาคารผ่านช่องเปิดทางด้านล่างช่วยระบายอากาศและทำความเย็นไปพร้อม ๆ กัน จะเห็นว่าหลักการการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่าย แต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นไม่ใช่ง่ายนัก

ในอดีตมีงานวิจัยที่ศึกษาหาแนวทางการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศแบบธรรมชาติ ทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง Bansal, Methur and Bhandari (1993) และ Bansal, Methur J., Methur S., and Jane (2005) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยการใช้ปล่องแดด คำนวณหาปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคาร พบว่าปล่องแดดสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลได้ 50 - 165 m³/h ต่อพื้นที่ปล่องแดด 1 m² และพบว่าอัตราการไหลขึ้นอยู่กับปัจจัยโครงสร้าง (geometrical parameters) ของปล่องแดด เช่น พื้นที่หน้าตัดการไหลของช่องอากาศ เป็นต้น รวมทั้งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของปล่องแดดด้วย นอกจากนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศด้วยปล่องแดดขนาดเล็ก (ยาว 1 m กว้าง 1 m) พบว่าความเร็วสูงสุดในปล่องมีค่าเท่ากับ 0.24 m/s แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบปล่องแดดขนาดเล็กเพื่อการระบายอากาศ จากรายงานวิจัยของ Afonso and Oliveira (2000) แสดงให้เห็นว่าอัตราการระบายอากาศแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเช่นเดียวกัน ส่วน Gan (1998) ศึกษาปล่องแดดที่ประยุกต์เข้ากับผนังอาคาร พบว่าอัตราการระบายอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด โดยอัตราการระบายอากาศมากเมื่อความเข้มแสงแดดสูง และอัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ความสูงปล่อง 6 m เมื่อพิจารณาที่ความกว้างของช่องอากาศระหว่าง 0.55 - 0.6 m หากมากกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับบริเวณด้านบนของปล่อง ส่วน Bouchair (1994) พบว่าอัตราการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่ความกว้างของปล่องประมาณ 1/10 ของความสูงปล่อง และงานวิจัยของ Burek and Habeb (2007) ก็พบว่าอัตราการไหลของอากาศภายในปล่องขึ้นอยู่กับความกว้างของปล่องและปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคาร (heat gain) นอกจากนี้ Hamdy and Fikry (1998) ยังพบว่าอัตราการไหลขึ้นอยู่กับความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องแดด (stack height) การเปลี่ยนความสูงนี้ทำได้โดยเปลี่ยนมุมเอียงของหลังคา (กรณีประยุกต์ปล่องเข้ากับหลังคาเอียง) ถ้าหลังคาเอียงมากขึ้นย่อมหมายถึงความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องมากขึ้นด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้เสนอว่ามุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 60° (อย่างไรก็ตาม มุมเอียงมากหมายถึงต้องใช้วัสดุคุมหลังคามากขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่าต้นทุนในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นด้วย) Zhai, Dai and Wang (2005) เปรียบเทียบการใช้ปล่องแดดแบบหนึ่งช่องทางไหลและแบบสองช่องทางไหล พบว่าอัตราการระบายอากาศของปล่องแดดแบบสองช่องทางไหลมีค่าเท่ากับ 20 ACH (Air Change per Hour) เมื่อพิจารณาที่มุมเอียงของหลังคาปล่องแดดเท่ากับ 30° หากต้องการให้ปล่องแดดแบบหนึ่งช่องทางไหลเพื่อระบายอากาศให้ได้ในปริมาณเท่ากัน ปล่องแดดต้องเอียง 75° ซึ่งยากในทางปฏิบัติ และอาจดูไม่สวยงาม ตลอดจนเพิ่มค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุคุมหลังคาที่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อคำนวณประสิทธิภาพของปล่องแดดแบบสองช่องทาง

ไหลในการระบายอากาศพบว่าสูงกว่าแบบหนึ่งช่องทางไหลประมาณ 10% นอกจากนี้ (Hirunlabh, Washirapuwadon, Pratinthong and Khedari (2001), Khedari, Hitunlabh, and Bunnag (1997), Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratingthong and Hirunlabh (2000), Khedari, Ingkawanich, Waewsak and Hirunlabh (2002) และ Khedari, Yimsamerjit, and Hirunlabh (2002)) ได้ศึกษาการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร พบว่าปล่องแคดที่ตีควรมีความกว้างของช่องอากาศ 10 - 14 cm ยาว 1 - 2 m และมุมเอียงของหลังคาอยู่ระหว่าง 20 - 45° (เพื่อความสวยงาม ประหยัด และง่ายในทางปฏิบัติ) และงานวิจัยเมื่อไม่นานนี้ของ Tongbai and Chitsomboon (2004) เสนอวิธีการระบายอากาศด้วยห้องหลังคาและปล่องแคด ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้อาศัย นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงและขนาดของปล่อง ตลอดจนความเข้มของแสงแคด ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ มุมเอียงของหลังคาที่ควรนำไปใช้ในทางปฏิบัติ คือ 45° ในความเป็นจริง หากเพิ่มมุมเอียงของปล่องแคดเป็น 60° ยังสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้แต่ด้วยอัตราที่ลดลง และไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

จากงานวิจัยในอดีต จะเห็นว่าปริมาณการระบายอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแคด และปัจจัยโครงสร้างของระบบปล่องแคด ได้แก่ ความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องแคด (stack height) ขนาดของช่องทางเข้าและออกของอากาศ ความกว้างของช่องอากาศ (air gap width) ตลอดจนความยาวของปล่องแคด (ซึ่งอาจหมายถึงความยาวของหลังคาหากประยุกต์ปล่องแคดเข้ากับหลังคา) อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความหลากหลาย ดังนั้นก่อนที่จะทำการทดลองควรมีการศึกษาเชิงทฤษฎีหรือเชิงตัวเลข เพื่อให้เห็นแนวทางการศึกษาเสียก่อน เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่ามาก เมื่อได้แนวทางที่ชัดเจนแล้วจึงทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ผลลัพธ์ต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การไหลผ่านอาคารด้วยระบบปล่องแคดโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS CFX นอกจากนี้จะศึกษาผลของปัจจัยโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ (ดังได้กล่าวมาข้างต้น) ต่ออัตราการไหลแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหลด้วยการทำให้มีมุมบานเล็ก ๆ ที่ทางออกของช่องอากาศ ซึ่งยังไม่พบการศึกษาปัจจัยนี้มาก่อนในอดีต นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการใช้หลังคาแบบราบที่มีปล่องแนวดิ่งต่อเข้ากับหลังคา และหลังคาแบบเอียงเมื่อพิจารณาให้มีความสูงรวมระหว่างช่องทางเข้าและออกของระบบเท่ากัน โดยกำหนดให้มีพื้นที่รับแคดของหลังคาเท่ากันด้วย

แรงจูงใจในการศึกษาผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหลของปล่องแคด เกิดจากผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), และ Chitsomboon and Tongbai (1999) ซึ่งทำนายนการไหลในระบบปล่องแคดเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าไว้ (ประกอบด้วยหลังคาแบบโปรงใส และมีปล่องแนวดิ่งอยู่ตรงกลางของหลังคา) เป็นสมการคือ

$$\frac{1}{2} \dot{m} V_1^2 \left[\rho_1 - 2\rho_1 A_1^2 \int_1^3 \frac{dA_r}{A^2} + \frac{2\rho_1 A_1^2 g h_c}{\gamma R T_1} \int_1^3 \frac{dA}{A^3} \right] = \frac{\rho_1 g h_c q''}{c_p T_3} \int_1^3 dA_r \quad (7.1)$$

สมการนี้ได้จากการสังเคราะห์สมการอนุกรมมวล โมเมนตัม และพลังงานเข้าด้วยกัน ผลการทำนายของสมการสอดคล้องกับการทำนายของการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นอย่างดี จากการวิเคราะห์สมการเชิงลึกพบว่า ถ้าให้ช่องทางออกใหญ่กว่าช่องทางเข้าของระบบ ($A_3 / A_1 > 1$ เมื่อ A_3 คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางออกของปล่อง และ A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ช่องทางเข้าของหลังคารับแดด) สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ ซึ่งผลลัพธ์นี้ได้รับการยืนยันอีกครั้งจากงานวิจัยของ Koonsrisuk and Chitsomboon (2006) ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้แนวคิดเดียวกันนี้กับระบบปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศ (Tongbai and Chitsomboon (2008)) โดยการกระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศด้วยการทำให้ทางออกของห้องหลังคาบานตัวออกด้วยมุมเล็ก ๆ ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศภายในอาคารได้ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพิจารณาที่มุมบาน $1-5^\circ$ (เทียบกับกรณีไม่มีมุมบาน) และเมื่อเพิ่มค่ามุมบานไปที่ 6° อัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง จากนั้น Tongbai and Chitsomboon (2008) ได้ศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาที่มุมบานของหลังคามากกว่า 6° และศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของการระบายอากาศเมื่อต่อปล่องแนวตั้งเข้ากับทางออกของช่องอากาศ ปล่องนี้เป็นปล่องแบบธรรมชาติที่ช่วยเพิ่มความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของระบบเท่านั้น โดยไม่ได้มีหน้าที่รับแสงแดดแต่อย่างใด ซึ่งพบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกือบจะเป็นเชิงเส้นที่มุมบานของช่องอากาศในช่วง $1-5^\circ$ พิจารณาที่มุมบานตัว 6° สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 30% (เทียบกับกรณีไม่มีมุมบาน) เมื่อเพิ่มมุมบานไปจนถึง 12° อัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง ส่วนการเพิ่มปล่องแนวตั้งเข้ากับระบบนั้นช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 38% ที่ความสูงปล่อง 0.75 m

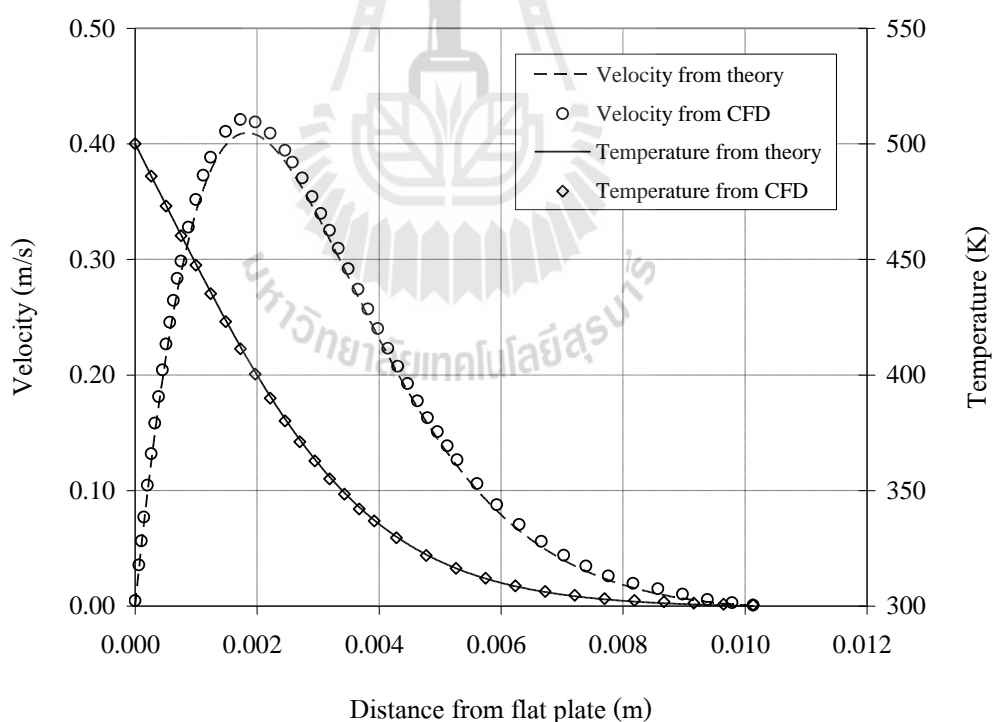
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Tongbai and Chitsomboon (2008) โดยเลือกใช้ระบบกริดแบบ Extrude 2D mesh ศึกษาผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหล การเพิ่มความสูงของระบบด้วยการต่อปล่องเข้ากับห้องหลังคา ตลอดจนผลของการใช้หลังคาเอียงและหลังคาแบบราบที่มีปล่องแนวตั้ง เมื่อให้ความสูงรวมของระบบเท่ากัน (ดังแสดงในรูปที่ 7.4) ซึ่งพบว่าที่ความสูงของระบบเท่ากัน ควรเลือกใช้หลังคาเอียงที่ไม่มีปล่อง เพราะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศสูงกว่าและหากติดตั้งปล่องธรรมชาติเข้ากับหลังคาเอียง (เพิ่ม stack height) สามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้

7.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

7.3.1 การทดสอบโปรแกรม

สำหรับการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยกรรมวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การไหล ANSYS CFX โดยทำการทดสอบโปรแกรมกับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระ (free convection) ผ่านแผ่นร้อนแนวตั้ง ด้วยการจำลองการไหลใน 2 มิติ เปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลเฉลยแม่นยำที่คำนวณจากกรรมวิธีความเสมือน (similarity method) (Kay and Crawford (1993)) ซึ่งใช้ Boussinesq model ในการจัดการกับตัวแปรความหนาแน่นของอากาศ โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่ในทุกเทอมของสมการควบคุมการไหล

ยกเว้นความหนาแน่นที่ปรากฏในเทอมของแรงลอยตัว เพราะแรงลอยตัวเป็นแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการไหลหลักของปัญหา ขนาดของแรงลอยตัวขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างอากาศที่อยู่ใกล้แผ่นร้อนกับความหนาแน่นของอากาศระยะไกล (free stream) ซึ่งโดยปกติความแตกต่างนี้มีค่าค่อนข้างน้อยแต่จะมีผลอย่างมากต่อการไหลของปัญหา ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดค่าความหนาแน่นในเทอมนี้มีค่าคงที่ได้ การจำลองการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัวด้วยโปรแกรม ANSYS CFX จะใช้ Transient model เพราะเป็นปัญหาการไหลที่ไม่มี steady solution หรือปัญหาที่ใช้เวลานานมากในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) นั่นเอง และเลือกใช้ Advection scheme แบบ Specified Blend Factor โดยกำหนดค่าเท่ากับ 1.0 ความถูกต้องของผลลัพธ์เมื่อใช้วิธีนี้เทียบเท่ากับวิธี second order ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีความถูกต้องค่อนข้างสูง ส่วน Transient scheme เลือกใช้แบบ Second Order Backward Euler ผลลัพธ์แสดงในรูปของความเร็วในทิศทางตามความสูงของแผ่นร้อนและอุณหภูมิสัมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.1 จะเห็นได้จากกราฟว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง (CFD) มีความสอดคล้องดีกับผลเฉลยแม่นยำ (ทฤษฎี) ซึ่งคำนวณค่าผิดพลาดสูงสุดเพียง 3.1% จึงยอมรับได้



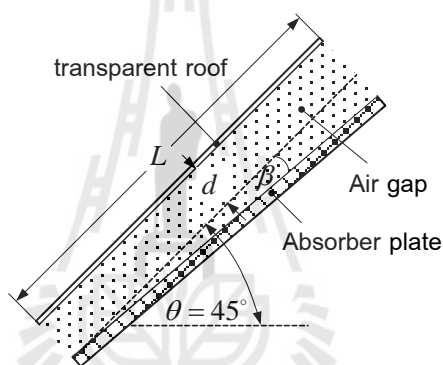
รูปที่ 7.1 ความเร็วและอุณหภูมิสัมบูรณ์เทียบกับระยะห่างจากแผ่นร้อน

7.3.2 ลักษณะของระบบปล่องแดงที่ทำการศึกษา

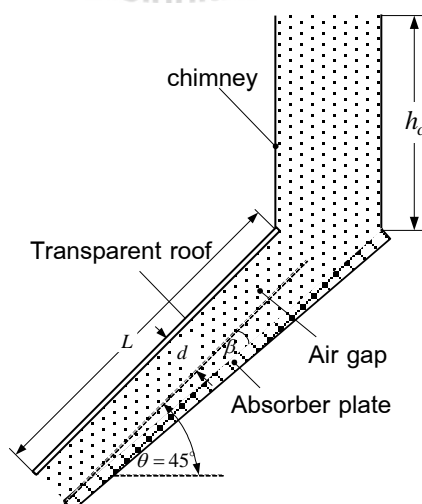
ระบบปล่องแดงพื้นฐานที่ศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7.2, 7.3 และ 7.4 โดยรูปที่ 7.2 เป็นระบบปล่องแดงที่มีเฉพาะห้องหลังคา ส่วนรูปที่ 7.3 เป็นระบบปล่องแดงที่ประกอบด้วยห้องหลังคาและปล่องที่ต่อเข้ากับห้องหลังคา และรูปที่ 7.4 แสดงรูปแบบของปล่องแดงที่ใช้ในการศึกษาผล

ของการใช้หลังคาแบบราบที่มีปล่องกับหลังคาเอียง (ไม่มีปล่อง) เมื่อกำหนดให้ความสูงรวมของระบบเท่ากัน รูปแบบพื้นฐาน (base case) ของระบบที่ทำการศึกษาครั้งนี้เป็นหลังคาเอียง 45° และไม่มีมุมบาน ($\beta = 0^\circ$) ความกว้างของช่องอากาศเท่ากับ 14 cm ศึกษาผลกระทบต่อปริมาณอัตราไหลมวลของอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

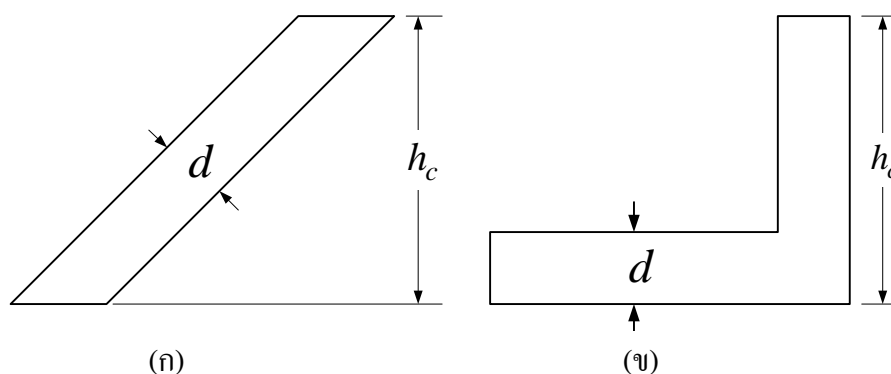
- มุมบาน (β): $0 - 12^\circ$ เพิ่มขึ้นครั้งละ 1°
- ความกว้างของช่องอากาศ (d): 12 – 60 cm
- ความยาวของหลังคา (L): 1 - 4 m เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 m
- ความสูงของปล่องแคด (h_c): 0 – 1.25 m เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.25 m
- ความเข้มของแสงแคด (\dot{Q}): 500, 650, 800 และ 900 W/m^2



รูปที่ 7.2 ระบบปล่องแคดที่มีเฉพาะห้องหลังคา



รูปที่ 7.3 ระบบปล่องแคดที่มีทั้งห้องหลังคาและปล่อง



รูปที่ 7.4 (ก) หลังกาแบบเอียงและ (ข) หลังกาแบบราบมีปล่อง ที่ความสูงรวมเท่ากัน

จำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS CFX ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. เป็นการไหลในระบบพิกัด 2 มิติ
2. อากาศภายในช่องอากาศของปล่องแคบได้รับความร้อนจากแสงแดดเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรแบบเอกรูป (uniform heat source)
3. เป็นการไหลแบบมีความหนืดในช่วงราบเรียบ (laminar) เพราะเป็นการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัวในระยะทางสั้นๆ ที่ค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) ต่ำ
4. ใช้ Boussinesq model เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่ได้รับความร้อน
5. เงื่อนไขขอบเขตใช้รูปแบบเดียวกับปัญหาการไหลที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม เนื่องจากเป็นปัญหาการไหลแบบการพาอิสระเช่นเดียวกัน

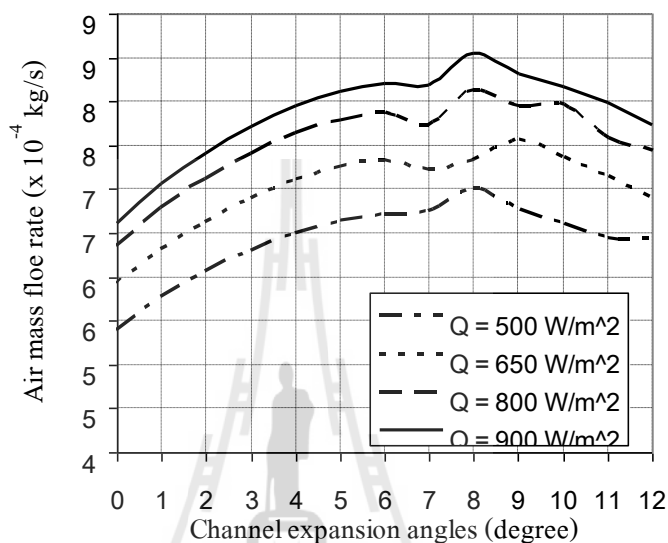
ความมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมฯ พิจารณาจาก 2 ปัจจัย หนึ่งคือ ค่าเศษตกค้าง (residual) ของสมการนาเวียร์-สโตก ตรวจสอบได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่โปรแกรมแสดงผลซึ่งต้องเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง และมีค่าต่ำเพียงพอที่จะยอมรับได้ และสองคือ อัตราการไหลเชิงมวลที่แต่ละหน้าตัดต้องมีค่าเท่ากันตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) เนื่องจากการไหลในช่องทาง

7.4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

7.4.1 ผลกระทบจากการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหลของช่องอากาศ

การกระจายพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลของอากาศสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.5 อัตราการเพิ่มของอัตราการไหลมีค่ามากในช่วงแรกที่มีการขยายพื้นที่ด้วยมุมบานเล็กๆ ($1 - 6^\circ$) ที่มุมบาน 6° สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้สูงถึง 24% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐานที่ไม่มีมุมบาน อย่างไรก็ตามหลังจาก 8° เป็นต้นไป อัตราการไหลเริ่มลดลงอย่างชัดเจน ยกเว้นกรณีความเข้มของ

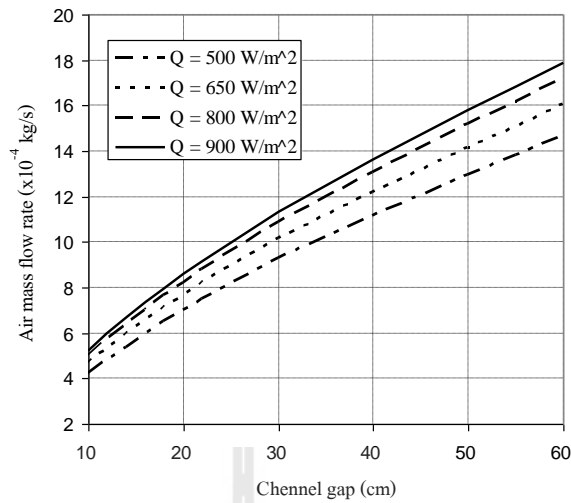
แสงแดด 650 W/m^2 ส่วนที่มุมบาน 7° อัตราการไหลลดลงอย่างกะทันหันและเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่มุมบาน 8° ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเนื่องจากการเกิดการหมุนวน (circulation) ของกระแสอากาศ บริเวณทางออกของห้อง หลังคาทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของอากาศ อัตราการไหลที่เกิดขึ้นจึงลดลง หรืออาจเกิดจากความละเอียดในการคำนวณของโปรแกรม (numerical error) ซึ่งจะได้ทำการพิสูจน์ต่อไป



รูปที่ 7.5 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับมุมบานของหลังคาที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

7.4.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนความกว้างของช่องอากาศ

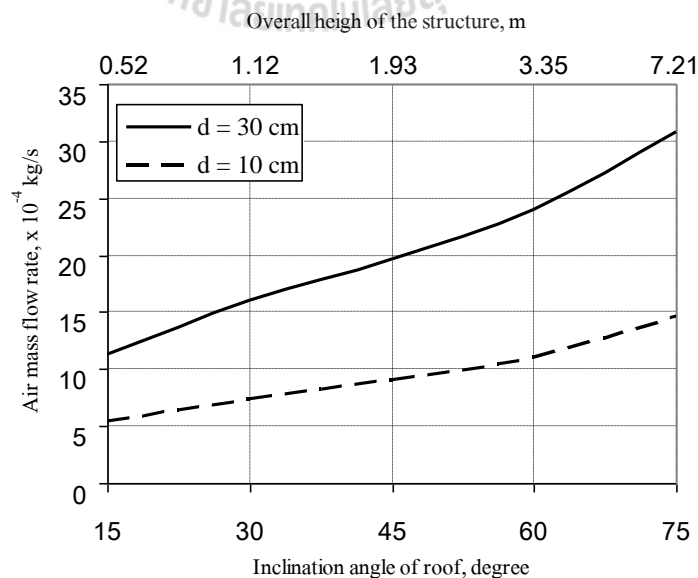
ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนความกว้างของช่องอากาศเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยในอดีต นั่นคือเมื่อให้ความกว้างของช่องอากาศมากขึ้น (แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดการไหลที่มากขึ้น) สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่าอัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มความกว้างของช่องอากาศไปจนถึง 60 cm และดูเหมือนว่าการเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้น ผลลัพธ์นี้แตกต่างจากผลลัพธ์ที่ Hirunlabh, Washirapuwadon, Pratinthong and Khedari (2001) เสนอไว้ว่าควรใช้ความกว้างของช่องอากาศ 14 - 16 cm เมื่อพิจารณาที่ความยาวของปล่อง 1 m เท่ากัน หากพิจารณาโดยหลักการ เมื่อปริมาตรของอากาศภายในช่องว่างมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มของแสงแดดยังเท่าเดิม แสดงว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศภายในช่องว่างน้อยลง แสดงว่าแรงลอยตัวน้อยลงด้วย แต่พื้นที่หน้าตัดการไหลมากขึ้น อาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดการไหลมีนัยสำคัญต่ออัตราการไหลที่เกิดขึ้นมากกว่า จึงทำให้อัตราการไหลสูงขึ้นได้ทั้ง ๆ ที่แรงลอยตัวน้อยลง ซึ่งจะได้ทำการพิสูจน์เพื่อความกระจ่างต่อไป



รูปที่ 7.6 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความกว้างของช่องอากาศที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

7.4.3 ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา

หากเพิ่มความยาวของหลังคาด้วยการเปลี่ยนมุมเอียงของหลังคาโดยให้ระยะในแนวนอนคงที่ (ให้พื้นที่รับแดดของหลังคาคงที่) สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ ซึ่งไม่ใช่เรื่องน่าประหลาดใจแต่อย่างใด เพราะหากมุมเอียงของหลังคามากขึ้น (เมื่อให้ระยะในแนวนอนเท่าเดิม) นั่นคือหลังคายาวขึ้น นั่นแสดงว่าระยะความสูงในแนวตั้งระหว่างทางเข้ากับทางออก (stack height) มากขึ้น จึงทำให้อัตราการไหลสูงขึ้นด้วย เนื่องจากอัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของความสูงนี้นั่นเอง

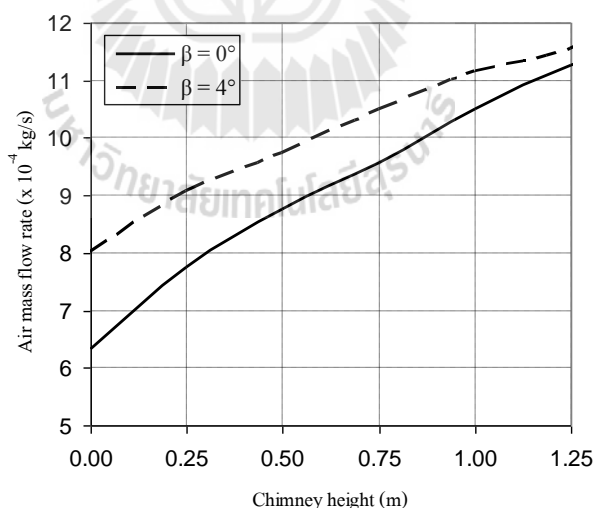


รูปที่ 7.7 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับมุมเอียงและความสูงของหลังคาที่ความกว้างของช่องอากาศต่างกัน

รูปที่ 7.7 แสดงอัตราการไหลของอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคาและความสูงของปล่อง ที่ความกว้างของช่องอากาศสองค่าด้วยกัน จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นเกือบจะเป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามมุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมควรคำนึงถึงปัจจัยอื่นด้วย อาทิเช่น ค่าใช้จ่าย ความสวยงาม ตลอดจนความยากง่ายในทางปฏิบัติ เป็นต้น

7.4.4 ผลกระทบจากความสูงของปล่องที่ต่อบนหลังคา

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ใช้ปล่องเพื่อการดูดซับความร้อนจากแสงแดด ซึ่งมีทั้งการใช้ปล่องแนวตั้งหรือปล่องเอียงที่ประยุกต์เข้ากับส่วนใดส่วนหนึ่งของอาคาร เช่น หลังคาหรือผนัง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ปล่องเพื่อเพิ่มอัตราการไหลเนื่องจากเป็นการเพิ่มความสูงให้กับระบบ ซึ่งปล่องไม่ได้มีหน้าที่รับแสงแดดแต่อย่างใด ซึ่งพบว่าที่ความสูงปล่องเพียง 0.5 m สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้มากขึ้นถึง 38% เมื่อเทียบกับการใช้ห้องหลังคาเพียงอย่างเดียว วิธีการนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริง ในที่นี้ได้ศึกษาผลของการต่อปล่องเข้ากับหลังคาแบบมีมุมบานตัวออกของช่องทางออก โดยเลือกใช้ที่มุมบานเท่ากับ 4° ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลกรณีหลังคามุมบานที่ทางออกมีแนวโน้มลดลง จากรูปมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการตัดกันของเส้นกราฟทั้งสอง ณ ความสูงปล่องค่าใดค่าหนึ่ง นั่นหมายความว่า การเพิ่มมุมบานไม่มีนัยสำคัญต่อระบบอีกต่อไป



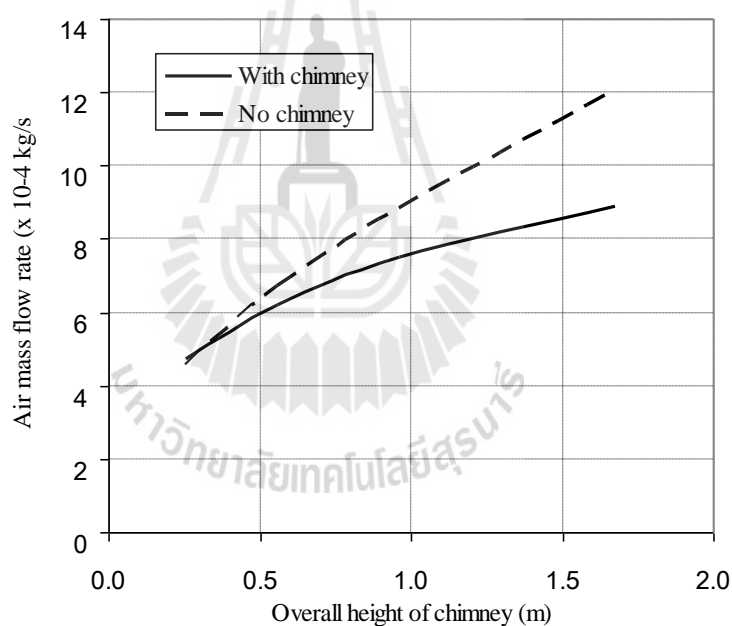
รูปที่ 7.8 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความสูงของปล่องที่มีมุมบานตัวต่างกัน

7.4.5 ผลกระทบจากการใช้หลังคาแบบราบมีปล่องกับหลังคาเอียงที่ความสูงรวมเท่ากัน

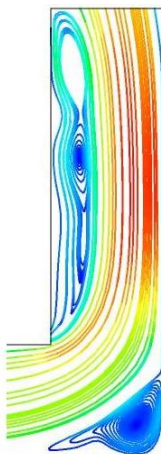
จากการศึกษาที่ผ่านมาเห็นได้ว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงหลังคามากขึ้นหรือมีการต่อปล่องแคบให้สูงขึ้น จึงเกิดแนวคิดว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราไหลนี้จะเท่ากันหรือไม่ถ้าคงพื้นที่รับแดดไว้เท่าเดิม โดยให้ความสูงรวมเท่ากัน ทั้งนี้ไม่ว่าความสูงรวมนี้จะได้มาจากการเอียงหลังคาและหรือการต่อปล่องเพิ่มในลักษณะใดก็ตาม ข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการทำให้สามารถออกแบบหลังคาที่

หลากหลายมากขึ้นได้ตามข้อจำกัดหรือความนิยมของผู้ใช้ เช่น อาจใช้หลังคาลาดเอียงต่ำผสมกับปล่องแคบ แทนการใช้หลังคาที่ลาดเอียงมากแต่เพียงอย่างเดียว

เพื่อการศึกษาดังกล่าวจึงเปรียบเทียบกรณีหลังคาเอียงกับกรณีหลังคาราบ (ไม่มีมุมเอียง) แต่ต่อปล่องแคบให้มีความสูงรวมเท่ากับกรณีหลังคาเอียง ซึ่งในที่นี้เลือกจำลองมุมเอียงสามค่าคือ 15, 30 และ 45° ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 7.9 พบว่ากรณีอ้างอิงให้อัตราการไหลมากกว่ากรณีหลังคาราบ และความแตกต่างของอัตราการไหลยิ่งมากขึ้นที่ความสูงรวมปล่องมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากเส้นกราฟที่ฉีกตัวห่างออกจากกัน เนื่องจากการสูญเสียเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการสูญเสียบริเวณข้อต่อของการไหลในท่อ การต่อปล่องเข้ากับหลังคาราบในที่นี้เป็นารต่อแบบมุมฉาก จึงก่อให้เกิดการสูญเสียบริเวณนี้ด้วยการเกิดก่อนหมุนวนด้านหลังของมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ดังนั้นหากมีการเข้ามุมโดยใช้การลบมุมแบบผิวโค้งก็ คงจะช่วยลดการสูญเสียได้ จนอาจมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับหลังคาเอียงก็เป็นได้



รูปที่ 7.9 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความสูงรวมของปล่องของหลังคาที่มีปล่องและไม่มีปล่อง



รูปที่ 7.10 Separation bubble บริเวณรอยต่อระหว่างหลังคา กับปล่อง

7.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเชิงตัวเลขด้วยกรรมวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ โดยรวมสอดคล้องกับผลลัพธ์จากงานวิจัยในอดีต นั่นคือ อัตราการไหลของอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้าง ได้แก่ ความกว้างของช่องอากาศ มุมเอียงของหลังคา (ซึ่งหมายถึงความยาวและความสูงของหลังคา) ความสูงของปล่อง นอกจากนี้การศึกษารังนี้ยังพบว่าการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหลด้วยมุมบานตัวของหลังคาเพียงเล็กน้อยสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้มาก นับเป็นทางเลือกใหม่เพื่อนำไปปฏิบัติจริงต่อไป และการใช้ปล่องธรรมชาติต่อเข้ากับหลังคาเรียบสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ โดยเพิ่มขึ้นถึง 38% ที่ความสูงปล่องเพียง 0.5 m เมื่อเทียบกับกรณีหลังคาไม่มีปล่อง อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาที่ความสูงรวมเท่ากัน จากผลลัพธ์ที่ได้ควรเลือกใช้หลังคาเอียงแทนหลังคาเรียบที่มีปล่อง จนกว่าจะได้รับการพิสูจน์ถึงผลกระทบจากการต่อปล่องแบบลมมุมโค้งต่อไป

7.6 รายการอ้างอิง

ANSYS CFX, Release 11.0. ANSYS, Inc.

Afonso C. and Oliviera A. (2000). **Solar chimneys: simulation and experiment.** Energy and Buildings, Vol. 32, pp. 71-79.

Bansal N.K., Methur J., Methur S. and Jane M. (2005). **Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation.** Building and Environment, Vol. 40, pp. 373-377.

Bansal N.K., Methur R. and Bhandari M.S. (1993). **Solar chimney stack ventilation.** Building and Environment, Vol. 28(3), pp. 373-377.

Bouchair A. **Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria.** Building Services

- Engineering Research and Technology, Vol. 15, No, 2, 1994, pp. 81 – 93.
- Burek S. A.M. and Habeb A. (2007). **Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls.** Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 128-135.
- Chitsomboon, T. and Tongbai, P. (1998). **A Mathematical Model of Solar Chimney for Electrical Energy Production.** Proceedings of the 12th National Mechanical Engineering Conference, Chulalongkorn University, Thailand, pp. 14-20.
- Chitsomboon, T. (2001). **A Validated Analytical Model for Flow in Solar Chimney.** International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 3(2), pp. 339-346.
- 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 Pataya, Thailand, pp. 263-268.
- Gan G. (1998). **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings.** Energy and Buildings, Vol. 27, pp. 37-43.
- Hamdy L.F. and Fikry M.A. (1998). **PASSIVE SOLAR VENTILATION.** Renewable Energy, Vol. 14(1-4), pp. 381-386.
- Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong, N. and Khedary, J. (2001). **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation.** Building and Environment, Vol. 36(3), pp. 383-391.
- Kays, W.M. and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer.** (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- 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, Vol. 26(2), pp. 159-164.
- Khedary, J., Ingkawanich, S., Waewsak, J. and Hirunlabh, J. (2002). **A PV system enhanced the performance of roof solar collector.** Building and Environment, Vol. 37(12), pp. 1317-1320.
- Khedary, J., Mansirisub, W., Chaima, S., Pratinthong, N. and Hirunlabh, J. (2000). **Field measurements of performance of roof solar collector.** Energy and Buildings, Vol. 31(3), pp. 171-178.
- Khedary, J., Yimsamerjit, P. and Hirunlabh, J. (2002). **Experimental investigation of free convection in roof solar collector.** Building and Environment, Vol. 37(5), pp. 455-459.

- Koonsrisuk A. and Chitsomboon, T. (2006). **Effect of Tower Area Change on the Potential of Solar Tower.** The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment”, Bangkok, Thailand.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2004). **The Use of Attic and Chimney to Enhance Air Ventilation : A Numerical Analysis.** Proceedings of the 18th National Mechanical Engineering Conference, Khonkaen, Thailand, pp. 263-268.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2008). **Enhancements of solar chimney for building ventilation.** The 4th Conference on Energy Network of Thailand, Nakhon Pathom, Thailand.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2008). **Parameters Affecting Ventilation in Building using Solar Chimney.** Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering Conference, Thailand.
- Zhai X.Q., Dai Y.J. and Wang R.Z. (2005). **Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors.** Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 741-757.

บทที่ 8

การจำลองแบบสามมิติของการระบายอากาศในอาคารด้วยระบบปล่องแดด

8.1 บทคัดย่อ

ระบบปล่องแดดเป็นระบบที่ใช้ในการระบายอากาศจากอาคาร โดยวิธีการไหลแบบธรรมชาติ (natural convection) ประกอบด้วยห้องหลังคาและปล่องที่วางอยู่ในแนวเฉียงหรือแนวตั้ง ในอดีตได้ทำการศึกษาโดยการจำลองแบบสองมิติพบว่าระบบปล่องแดดสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศได้ และยังสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ด้วยการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ เช่น ความสูง ความกว้าง และการบานตัวของช่องหลังคา งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการระบายอากาศในสามมิติเมื่อใช้ระบบปล่องแดด ลักษณะเดียวกัน ทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของอากาศที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องและร้อยละของความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์จากการจำลองการไหลในสองมิติ ซึ่งหากค่าคลาดเคลื่อนจากการจำลองทั้งสองแบบไม่สูงมาก นั้นหมายถึงสามารถจำลองการไหลเพียงสองมิติเพื่อประเมินหาอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริงในสามมิติได้ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้เป็นอย่างมาก

8.2 บทนำ

นอกจากจะพบงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบปล่องแดดเพื่อการผลิตไฟฟ้า (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)) แล้ว ยังพบว่ามิงงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ระบบปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการออกแบบระบบปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศ ซึ่งมีรูปแบบ ขนาด หรือตำแหน่งที่ประยุกต์ปล่องแดดเข้ากับอาคารแตกต่างกันออกไป สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคาร โดยประยุกต์เข้ากับหลังคา

การไหลของอากาศในระบบห้องหลังคาและปล่องแดดเกิดจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศภายในและภายนอกของระบบ ส่วนประกอบหลักของระบบปล่องแดดส่วนใหญ่คือ ด้านนอกส่วนที่ติดกับบรรยากาศทำจากวัสดุโปร่งใส (transparent material) ซึ่งมีค่าการส่งผ่านความร้อนสูงจึงยอมให้แสงแดดทะลุผ่านได้มาก (ดูรูปที่ 8.1) ถัดมาคือช่องอากาศ (air channel) หรือช่องทางไหล ส่วนสุดท้ายคือแผ่นดูดกลืนแสงแดด (absorber plate) ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงแดดที่ทะลุผ่านวัสดุโปร่งใสเข้ามา เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่อยู่ในช่องอากาศต่อไป โดยทั่วไปแผ่นดูดกลืนแสงแดดจะทำจากแผ่นโลหะที่เคลือบหรือทาด้วยสีดำเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงแดด ความร้อนจะถูกกักให้อยู่ในช่องอากาศโดยพฤติกรรมเรือนกระจก (greenhouse

effect) อากาศภายในช่องว่างจะได้รับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนแสงแดด ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นลดลง และลอยตัวสูงขึ้นออกสู่บรรยากาศผ่านช่องทางออกด้านบน หากทำการประยุกต์ระบบปล่องแดดนี้เข้ากับอาคาร ก็จะสามารถเหนี่ยวนำอากาศเย็นจากด้านนอกเข้าสู่อาคารผ่านช่องเปิดทางด้านล่าง ช่วยระบายอากาศและทำความเย็นไปพร้อม ๆ กัน จะเห็นได้ว่าหลักการทำงานของระบบนี้ค่อนข้างง่าย แต่การออกแบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงนั้นมีความยุ่งยากพอสมควร เพราะต้องมีทั้งทฤษฎี การคำนวณ และ การทดลองที่ดีเป็นเครื่องมือในการทำงาน

จากการศึกษาและรวบรวมผลลัพธ์ของงานวิจัยในอดีตพบว่าปริมาณการระบายอากาศที่เกิดจากการใช้ระบบปล่องแดดแปรผันตรงกับค่าความเข้มของแสงแดด และขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างของปล่องแดด (geometrical parameters) เช่น ความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องแดด (stack height) ขนาดของช่องเปิด ความกว้างของช่องอากาศ ตลอดจนความยาวหรือความสูงของปล่อง (ซึ่งอาจหมายถึงความยาวของหลังคาหากประยุกต์ปล่องแดดเข้ากับหลังคา) และความเอียงของหลังคา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถหาข้อสรุปจากผลลัพธ์ที่ได้จากนักวิจัยแต่ละท่านได้ว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดต่อการระบายอากาศของแต่ละปัจจัยทางโครงสร้างคือค่าใด หรือมีแนวทางออกแบบใดบ้างที่สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศและเสนอค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้ปล่องแดดเพื่อการระบายอากาศโดยติดตั้งเข้ากับหลังคาบ้านหรืออาคาร โดยเรียกระบบนี้ว่า ระบบห้องหลังคาและปล่องแดด (solar attic and solar chimney system)

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการระบายอากาศแบบธรรมชาติภายในอาคาร ทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาเชิงตัวเลข และการทดลอง เช่น งานวิจัยของ Bansal, Methur and Bhandari (1993) และ Bansal, Methur J., Methur S., and Jane (2005) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยการใช้ปล่องแดด คำนวณหาปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคาร พบว่าปล่องแดดสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดอัตราการไหลได้ 50 - 165 m³/h ต่อพื้นที่ปล่องแดด 1 m² และพบว่าอัตราการไหลของอากาศขึ้นอยู่กับ พื้นที่หน้าตัดการไหลของช่องอากาศ และประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของปล่องแดด นอกจากนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการระบายอากาศด้วยปล่องแดดขนาดเล็ก (ยาว 1 m กว้าง 1 m) พบว่าความเร็วสูงสุดภายในปล่องมีค่าเท่ากับ 0.24 m/s แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบปล่องแดดขนาดเล็กเพื่อการระบายอากาศในอาคาร ผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Afonso and Oliveira (2000) พบว่าอัตราการระบายอากาศแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ เช่นเดียวกัน ส่วน Gan (1998) ประยุกต์ปล่องแดดเข้ากับผนังอาคารเพื่อศึกษาอัตราการระบายอากาศ พบว่าอัตราการระบายอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงแดด โดยอัตราการระบายอากาศมากเมื่อความเข้มแสงแดดสูง และอัตราการระบายอากาศมีค่าสูงสุดที่ความสูงปล่อง 6 m เมื่อพิจารณาที่ความกว้างของช่องอากาศระหว่าง 0.55 - 0.6 m หากความสูงมากกว่าช่วงดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับบริเวณด้านบนของปล่อง ส่วน Bouchair (1994) พบว่าอัตราการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่ความกว้างของปล่องประมาณ 1/10 ของความสูงปล่อง และงานวิจัยของ Burek and Habeb (2007) พบว่า

อัตราการไหลของอากาศภายในปล่องขึ้นอยู่กับความกว้างของปล่องและปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคาร (heat gain) นอกจากนี้ Hamdy and Fikry (1998) ยังพบว่าอัตราการไหลขึ้นอยู่กับความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องแคบ การเปลี่ยนความสูงนี้ทำได้โดยเปลี่ยนมุมเอียงของหลังคา (กรณีนี้ประยุกต์ปล่องเข้ากับหลังคาเอียง) ถ้าหลังคาเอียงมากขึ้นย่อมหมายถึงความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของปล่องมากขึ้นด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้เสนอว่ามุมเอียงของหลังคาที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 60° ส่วน Zhai, Dai and Wang (2005) เปรียบเทียบการใช้ปล่องแคบแบบหนึ่งช่องทางไหลและแบบสองช่องทางไหลเมื่อติดตั้งปล่องแคบเข้ากับหลังคาเอียง พบว่าอัตราการระบายอากาศของปล่องแคบแบบสองช่องทางไหลมีค่าเท่ากับ 20 ACH (Air Change per Hour) เมื่อพิจารณาที่มุมเอียงของหลังคาปล่องแคบเท่ากับ 30° หากต้องการให้ปล่องแคบแบบหนึ่งช่องทางไหลระบายอากาศได้ในปริมาณเท่ากัน ปล่องแคบต้องเอียง 75° ซึ่งยากในทางปฏิบัติ และอาจดูไม่สวยงาม ตลอดจนเพิ่มค่าใช้จ่ายเรื่องวัสดุของหลังคาที่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการระบายอากาศของปล่องแคบแบบสองช่องทางไหลพบว่าสูงกว่าแบบหนึ่งช่องทางไหลประมาณ 10% นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Hirunlabh, Washirapuwadon, Printhong and Khedari (2001), Khedari, Hitunlabh, and Bunnag (1997), Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratingthong and Hirunlabh (2000), Khedari, Ingkawanich, Waewsak and Hirunlabh (2002), Khedari, Yimsamerjit, and Hirunlabh (2002) ยังศึกษาการระบายอากาศภายในบ้านพักอาศัยที่อยู่ในพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยเสนอว่าปล่องแคบควรมีความยาว 1 - 2 m ความกว้างของช่องอากาศ 10 - 14 cm และมุมเอียงของหลังคาอยู่ระหว่าง $20 - 45^{\circ}$ (เพื่อความสวยงาม ประหยัด และง่ายในทางปฏิบัติ) นอกจากนี้ งานวิจัยเร็ว ๆ นี้ของ Tongbai and Chitsomboon (2004) เสนอวิธีการระบายอากาศด้วยห้องหลังคาและปล่องแคบ ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้อาศัย นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงและขนาดของปล่อง ตลอดจนความเข้มของแสงแดด ต่างส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ มุมเอียงที่ควรนำไปใช้ในทางปฏิบัติของหลังคาคือ 45°

จากผลลัพท์งานวิจัยของ Chitsomboon (2001) และ Koonsrisuk and Chitsomboon (2006) ซึ่งศึกษาการไหลของอากาศผ่านปล่องแคบเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าการทำให้ช่องทางไหลของอากาศบานตัวออก สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศในปล่องได้ ซึ่งแนวคิดนี้ได้ถูกนำไปใช้กับปล่องแคบเพื่อการระบายอากาศโดย Tongbai and Chitsomboon (2008a, 2008b) ซึ่งพบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกือบจะเป็นเชิงเส้นที่มุมบานตัวของหลังคาในช่วง $1 - 5^{\circ}$ พิจารณาที่มุมบานตัว 6° สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 30% (เทียบกับกรณีไม่มีมุมบานตัว) เมื่อเพิ่มมุมบานตัวไปจนถึง 12° อัตราการไหลยังคงเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง จากนั้นศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของการระบายอากาศเมื่อต่อปล่องแนวดิ่งเข้ากับทางออกของห้องหลังคา โดยปล่องนี้เป็นปล่องแบบธรรมชาติที่ช่วยเพิ่มความสูงระหว่างช่องทางเข้าและออกของระบบเท่านั้น (ไม่ได้มีหน้าที่รับแสงแดดแต่อย่างใด) ส่วนการเพิ่มปล่องแนวดิ่งเข้ากับระบบนั้นช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้ถึง 38% ที่ความสูงปล่อง 0.75 m อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขแบบ 2 มิติ นอกจากนี้ Tongbai and Chitsomboon (2008b) ยังศึกษาเปรียบเทียบผลของลักษณะของหลังคาเอียงกับหลังคาแบบราบที่ต่อปล่องให้มีความสูงในแนวดิ่งเท่ากัน ซึ่งพบว่าหลังคา

แบบเอียงให้ค่าอัตราการไหลสูงกว่าหลังคาแบบราบที่มีปล่อง นับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถนำไปช่วยตัดสินใจในการสร้างอาคารเพื่ออยู่อาศัยต่อไป

การศึกษาในระบบ 2 มิติอาจเกิดการผิดพลาดของผลลัพธ์ได้มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขใน 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูป ANSYS CFX เพื่อศึกษาอัตราการระบายอากาศแบบธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ปล่องแตก โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศอันเกิดจากความเอียงของหลังคา ความสูงของปล่อง ตลอดจนตำแหน่งการติดตั้งของปล่อง พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบผลกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองใน 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์รายละเอียดของความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์จากการจำลองการไหลในสองมิติ หากสามารถประเมินขนาดความแตกต่างในผลลัพธ์ได้ โดยเฉพาะหากค่าคลาดเคลื่อนจากการจำลองทั้งสองแบบไม่สูงมาก นั้นหมายถึงสามารถจำลองการไหลเพียงสองมิติเพื่อประเมินหาอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริงในสามมิติได้ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้เป็นอย่างมาก

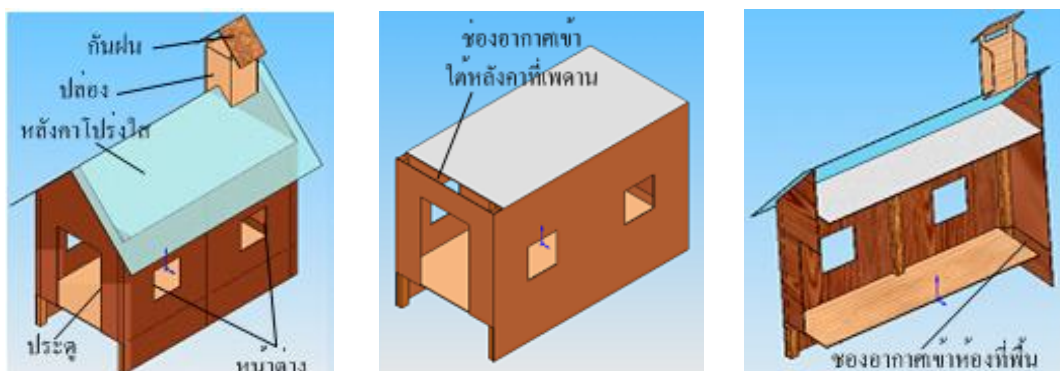
8.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

8.3.1 การสอบเทียบโปรแกรม

ข้อมูลในงานวิจัยของ Tongbai and Chitsomboon (2008b) ได้ทำการสอบเทียบโปรแกรมไว้แล้ว โดยทำการคำนวณการไหลธรรมชาติผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง ผลปรากฏว่าการกระจายของความเร็วและอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลเฉลยเชิงทฤษฎีแบบ similarity ได้เป็นอย่างดี

8.3.2 ลักษณะของอาคารต้นแบบ

สำหรับการจำลองปัญหาการไหลใน 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบ (แบบสมจริงมากขึ้น) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบบ้านต้นแบบ อย่างง่ายขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น มุมเอียงของหลังคา ขนาดและความสูง ตลอดจนตำแหน่งของปล่อง ขนาดของช่องเปิดบริเวณต่าง ๆ ของอาคาร เป็นต้น และจะขยายผลการศึกษาเพื่อบ้านหรืออาคารเพื่อการอยู่อาศัยจริงต่อไป ลักษณะของบ้านต้นแบบเป็นบ้านชั้นเดียว ห้องเดียว ยกพื้นสูงจากพื้น 1 m ขนาดหน้าตัดของบ้านเท่ากับ 8 m × 10 m หลังคาบ้านเป็นแบบหลังคาหน้าจั่ว (หลังคาเอียง) มีปล่องอยู่ด้านบนของหลังคา ตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน ดังแสดงในรูปที่ 8.1 โดยในการจำลองทำการปิดหน้าต่างทุกบาน



รูปที่ 8.1 บ้านต้นแบบสามมิติ

ทำการจำลองการไหลผ่านบ้านต้นแบบ (กรณีอ้างอิง) เพื่อศึกษาผลกระทบจากปัจจัย ต่าง ๆ ในสามมิติ เช่น มุมเอียงของหลังคา ขนาดและความสูง ตลอดจนตำแหน่งของปล่อง ขนาดของช่องเปิด บริเวณต่าง ๆ ของอาคาร เป็นต้น ได้เปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยต่าง ๆ เพื่อจำลองการไหลดังนี้

1. ความเข้มของแสงแดด: 500, 650 และ 800 W/m²
2. มุมเอียงหลังคา: 15, 30, 45 และ 60°
3. ความสูงปล่อง: 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 m
4. ตำแหน่งของปล่อง: ด้านเดียวกับช่องเปิดที่เพดาน, ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน, ตรงกลางของหลังคา

ทำการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS CFX ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. เป็นการไหลในสามมิติ
2. หลังการรับความร้อนจากแสงแดดเป็นเวลานานจนเข้าสู่สภาวะคงตัว
3. ความร้อนที่ได้รับจัดเป็นความร้อนต่อหน่วยปริมาตรแบบเอกรูป (uniform heat source)

ให้กับปริมาตรอากาศที่อยู่ในห้องหลังคา

4. เป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) เพราะเป็นการไหลที่ขับเคลื่อนโดยแรงลอยตัวในระยะทางสั้น ๆ ที่ค่าเลขกราชอฟต่ำ
5. พื้นที่รับแดดของหลังคาทั้งสองมีขนาดเท่ากัน โดยใช้พื้นที่แนวระนาบ (projected area) เสมือนว่าเป็นการรับแดดเมื่อตะวันตรงศีรษะพอดี
6. ใช้ Buossinesq model เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่ได้รับความร้อน

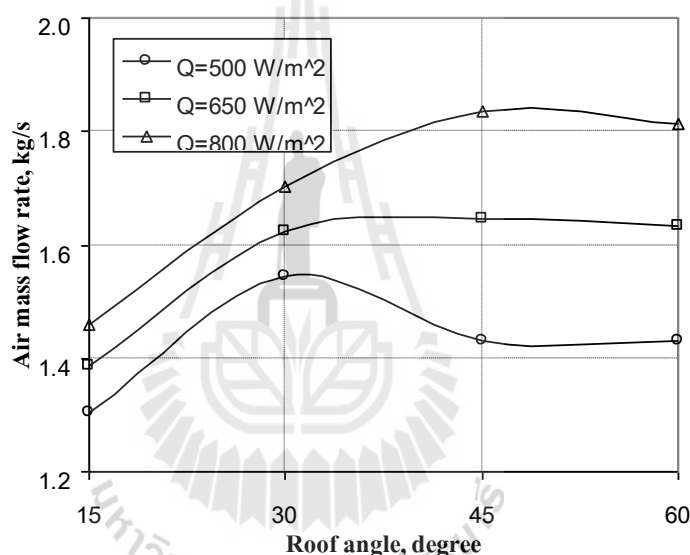
ความมั่นใจในความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมฯ พิจารณาจาก 2 ปัจจัยหนึ่งคือค่าเศษตกค้าง (residual) ของสมการนาเวียร์-สโตค ตรวจสอบได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่โปรแกรมแสดงผลซึ่งต้องลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง และมีค่าต่ำเพียงพอต่อการยอมรับ และสองคือ อัตราการไหลเชิงมวลที่แต่ละหน้าตัดต้องมีค่าเท่ากันตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) เนื่องจากการไหลใน

ช่องทาง ดังนั้นจึงตรวจสอบโดยการคำนวณค่าอัตราการไหลบริเวณทางเข้ากับทางออกซึ่งต้องได้ค่าเท่ากัน

8.4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

8.4.1 ผลกระทบจากมุมเอียงของหลังคา

ผลลัพธ์จากการจำลองการไหลผ่านบ้านต้นแบบ โดยให้ความสูงของปล่องเป็น 0.5 m (วัดจากยอดแหลมของหลังคาเอียง) เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเอียงของหลังคาเป็น 15° , 30° , 45° และ 60° ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.2



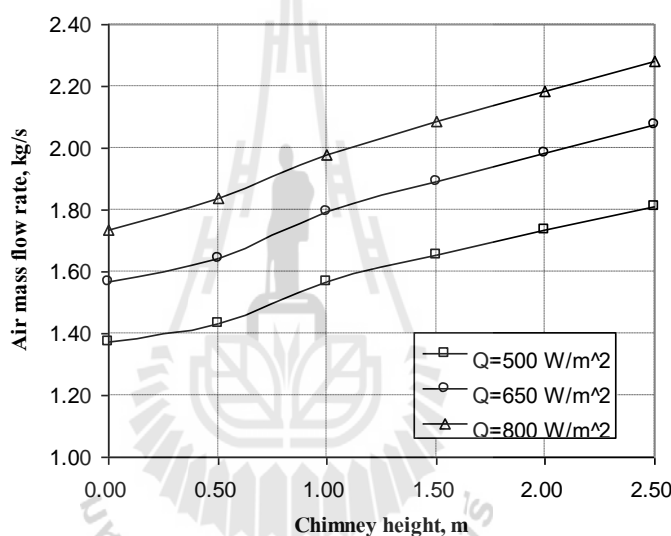
รูปที่ 8.2 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับมุมเอียงของหลังคาที่ความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ

พบว่าอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มมุมเอียงของหลังคา จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่มุมเอียงประมาณ 45° จากนั้นค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากกระแสอากาศเกิดการหมุนวน (separation) การเสียดสีระหว่างอากาศที่หมุนวนอาจก่อให้เกิดการสูญเสีย เป็นเหตุผลให้อัตราการไหลของอากาศลดลงได้ ยกเว้นกรณีความเข้มของแสงแดด 500 W/m^2 ซึ่งพบว่าอัตราการไหลสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมเอียง 30° และลดลงอย่างรวดเร็วที่มุมเอียง 45° จากนั้นค่อนข้างคงที่ พิจารณาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการไหลที่ค่ามุมเอียงของหลังคาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15° กรณีหลังคาเอียง 30° สามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ 16.5% เมื่อเทียบกับกรณีหลังคาเอียง 15° และกรณีหลังคาเอียง 45° สามารถเพิ่มค่าอัตราการไหลได้ 7.9% เมื่อเทียบกับกรณีหลังคาเอียง 30° จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นลดลงน้อยกว่าช่วงการเพิ่มครั้งแรก

8.4.2 ผลกระทบจากความสูงปล่อง

เพื่อศึกษาผลกระทบจากความสูงของปล่องต่ออัตราการระบายอากาศได้เปลี่ยนความสูงของปล่องของบ้านต้นแบบที่มีหลังคาเอียงเท่ากับ 45° โดยกำหนดความสูงปล่องกรณีอ้างอิงเป็นศูนย์ (วัด

จากยอดแหลมของหลังคาเอียง) จนถึง 2.5 m พบว่าการเพิ่มความสูงของปล่องสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ 8.3 การเพิ่มความสูงของปล่องสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ด้วยผลของ stack effect เพราะอัตราการไหลของอากาศแปรผันตรงกับระยะทางในแนวตั้งระหว่างช่องเปิดทางเข้า-ออกของอากาศในอาคาร (stack height) นั่นเอง โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศเมื่อเทียบกับกรณีอ้างอิงพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ถึงประมาณ 32% ที่ความสูงปล่อง 2.5 m การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเมื่อเพิ่มความสูงปล่องนี้เกือบจะเป็นเส้นตรง นั่นคือหากเพิ่มความสูงมากกว่า 2.5 m ก็คาดว่าอัตราการไหลของอากาศก็ยิ่งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการออกแบบก็คือ หากปล่องสูงเกินไปอาจดูไม่สวยงาม และสิ้นเปลืองมากขึ้นการนำไปใช้จริงจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยเหล่านี้ด้วย



รูปที่ 8.3 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความสูงของปล่องที่ความเข้มของแสงแดดต่าง ๆ

8.4.3 ผลกระทบจากตำแหน่งของปล่องบนหลังคา

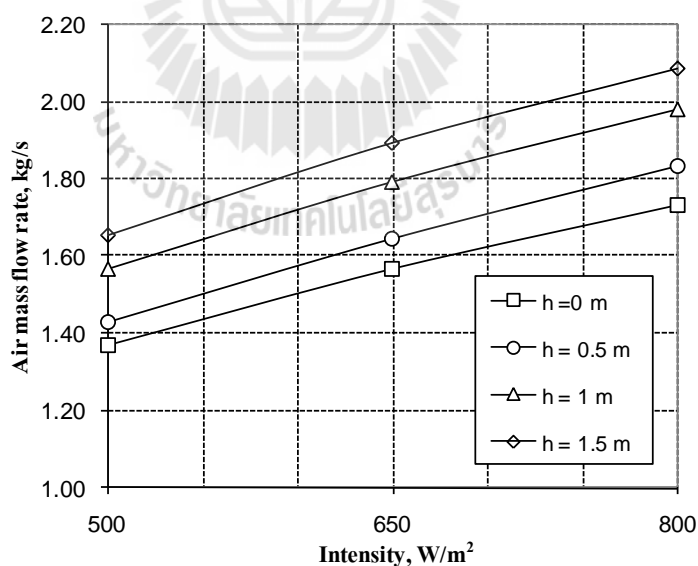
ตำแหน่งของปล่องของบ้านต้นแบบจะอยู่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดานเพราะเป็นตำแหน่งที่ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อพิสูจน์แนวคิดนี้ผู้วิจัยลองเปลี่ยนตำแหน่งของปล่องสองแบบด้วยกัน หนึ่งให้ปล่องอยู่ตรงกลางของหลังคาพอดี และสองคือให้ปล่องอยู่ด้านเดียวกับช่องเปิดที่เพดาน โดยเลือกบ้านต้นแบบกรณีมีมุมเอียงของหลังคาเท่ากับ 45° ความสูงของปล่อง 3 m จากนั้นเปรียบเทียบอัตราการไหลที่ได้แต่ละกรณี พบว่าตำแหน่งของปล่องที่ดีที่สุดคือให้อยู่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน ดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามตำแหน่งของปล่องไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ เพราะค่าตัวเลขไม่ต่างกันมาก เมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลในกรณีปล่องอยู่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดานเปรียบเทียบกับกรณีปล่องอยู่ด้านเดียวกับช่องเปิดที่เพดาน พบว่ามีค่าเพียงประมาณ 0.4% เท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก

ตารางที่ 8.1 ผลลัพธ์ที่ตำแหน่งของปล่องต่าง ๆ

ตำแหน่งของปล่องบนหลังคา	ค่าอัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
อยู่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน	2.2786
อยู่ตรงกลาง	2.2757
อยู่ด้านเดียวกับช่องเปิดที่เพดาน	2.2703

8.4.4 ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดด

เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากความเข้มของแสงแดดต่ออัตราการไหล ได้เลือกชุดข้อมูลกรณีที่บ้านต้นแบบมีหลังคาเอียง 45° และปล่องอยู่ฝั่งตรงข้ามกับช่องเปิดที่เพดาน ที่ค่าความสูงต่าง ๆ กันสี่ค่าด้วยกัน ผลกระทบของค่าความเข้มของแสงแดดต่ออัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่อาคารในสามมิติให้ผลเช่นเดียวกับผลลัพธ์จากการจำลองในสองมิติ นั่นคือ เมื่อความเข้มของแสงแดดเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของอากาศผ่านอาคารยิ่งมาก ดังแสดงในรูปที่ 8.4 ซึ่งหมายถึงอัตราการระบายอากาศที่มากขึ้นด้วย นับเป็นผลลัพธ์เชิงบวกที่ดีมากต่อประเทศไทย เพราะมีแสงแดดที่มากเกือบตลอดทั้งปี และความเข้มของแสงแดดค่อนข้างสูง นั่นหมายความว่าระบบห้องหลังคาและปล่องแดดนี้เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งต่อการระบายอากาศอาคารที่อยู่ในประเทศไทยหรือประเทศในเขตร้อน



รูปที่ 8.4 อัตราการไหลของอากาศเทียบกับความเข้มของแสงแดด

8.4.5 ผลลัพธ์จากการจำลองการไหลผ่านบ้านต้นแบบใน 2 มิติ และ 3 มิติ

เพื่อศึกษาผลกระทบของ 3 มิติ ได้จำลองการไหลผ่านบ้านต้นแบบใน 3 มิติ และใน 2 มิติ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าอัตราการไหล ผลลัพธ์จากการจำลองการไหลใน 2 มิติ พบว่าอัตราการไหลมีค่าประมาณ 0.08584 kg/s ผ่านพื้นที่ช่องเปิดขนาด 0.125 m^2 และเท่ากับ 1.6955 kg/s ใน 3

มิติ ผ่านพื้นที่ช่องเปิดขนาด 2.5 m^2 ซึ่งมากกว่าพื้นที่ใน 2 มิติ 20 เท่า ดังนั้นอัตราการไหลผ่านพื้นที่ขนาด 2.5 m^2 ในระบบสองมิติควรจะมีค่าเท่ากับ $0.08584 \text{ kg/s} \times 20 = 1.72 \text{ kg/s}$ นั้นแสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองใน 3 มิติ เทียบกับจาก 2 มิติ คือ $(1.72 - 1.69) \times 100 / 1.72 = 1.74\%$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก

8.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถสรุปได้ว่า

1. อัตราการไหลของอากาศเป็นฟังก์ชันของความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้างของระบบห้องหลังคาและปล่องแดด ได้แก่ ความสูง ตลอดจนตำแหน่งของปล่องบนหลังคา และมุมเอียงของหลังคา ซึ่งหากพิจารณาเหตุผลทั้งในด้านประสิทธิภาพในการระบายอากาศ เศรษฐศาสตร์ และความสวยงาม ควรใช้ที่ 30° ส่วนความสูงของปล่อง หากใช้ปล่องสูงย่อมเสียค่าใช้จ่ายด้านวัสดุมากขึ้น อีกทั้งอาจมองว่าไม่สวยงาม ดังนั้นในการตัดสินใจว่าจะใช้ปล่องสูงเท่าไรขึ้นอยู่กับความคิดเห็นของผู้นำไปใช้เป็นสำคัญ
2. ตำแหน่งของปล่องไม่มีผลต่อค่าอัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถให้ปล่องอยู่ตรงไหนก็ได้บนหลังคา ซึ่งนับเป็นข้อดีเพราะเป็นการลดข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง
3. ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองใน 3 มิติ เทียบกับจาก 2 มิติ มีค่าเพียง 1.74% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก นั้นหมายความว่า สามารถทำการจำลองการไหลเพื่อศึกษาอัตราการระบายอากาศผ่านอาคารใน 2 มิติได้ ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้เป็นอย่างมาก

8.6 รายการอ้างอิง

ANSYS CFX, Release 11.0. ANSYS, Inc.

Afonso C. and Oliviera A. (2000). **Solar chimneys: simulation and experiment.** Energy and Buildings, Vol. 32, pp. 71-79.

Bansal N.K., Methur J., Methur S. and Jane M. (2005). **Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation.** Building and Environment, Vol. 40, pp. 373-377.

Bansal N.K., Methur R. and Bhandari M.S. (1993). **Solar chimney stack ventilation.** Building and Environment, Vol. 28(3), pp. 373-377.

Bouchair A. **Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria.** Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 15, No, 2, 1994, pp. 81 – 93.

Burek S. A.M. and Habeb A. (2007). **Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls.** Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 128-135.

- Chitsomboon, T. (2001). **A Validated Analytical Model for Flow in Solar Chimney**. International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 3(2), pp. 339-346.
- Gan G. (1998). **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings**. Energy and Buildings, Vol. 27, pp. 37-43.
- Hamdy L.F. and Fikry M.A. (1998). **PASSIVE SOLAR VENTILATION**. Renewable Energy, Vol. 14(1-4), pp. 381-386.
- Hirunlabh, J., Washirapuwadon, S., Pratinthong, N. and Khedari, J. (2001). **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation**. Building and Environment, Vol. 36(3), pp. 383-391.
- Kays, W.M. and Crawford M.E. (1993). **Convective heat and mass transfer**. (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- Khedari, J., Hirunlabh, J. and Bunnag, T. (1997). **Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses**, Energy and Buildings, Vol. 26(2), pp. 159-164.
- Khedari, J., Ingkawanich, S., Waewsak, J. and Hirunlabh, J. (2002). **A PV system enhanced the performance of roof solar collector**. Building and Environment, Vol. 37(12), pp. 1317-1320.
- Khedari, J., Mansirisub, W., Chaima, S., Pratinthong, N. and Hirunlabh, J. (2000). **Field measurements of performance of roof solar collector**. Energy and Buildings, Vol. 31(3), pp. 171-178.
- Khedari, J., Yimsamerjit, P. and Hirunlabh, J. (2002). **Experimental investigation of free convection in roof solar collector**. Building and Environment, Vol. 37(5), pp. 455-459.
- Koonsrisuk A. and Chitsomboon, T. (2006). **Effect of Tower Area Change on the Potential of Solar Tower**. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment”, Bangkok, Thailand.
- Padki, M. M., and Sherif, S. A. (1999). **On a simple analytical model for solar chimneys**. International Journal of Energy Research, Vol. (23), pp. 289-294.
- Schlaich, J. (1995). **The Solar Chimney: Electricity from the Sun**. Edition Axel Menges, Stuttgart, Germany.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2004). **The Use of Attic and Chimney to Enhance Air Ventilation: A Numerical Analysis**. Proceedings of the 18th National Mechanical Engineering Conference, Khonkaen, Thailand, pp. 263-268.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2008a). **Enhancements of solar chimney for building ventilation**. The 4th Conference on Energy Network of Thailand, Nakhon Pathom, Thailand.

- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2008b). **Efficiency Enhancement for Natural Ventilation in Building Using Solar Chimney System.** Proceedings of the 23th National Mechanical Engineering Conference, Chaingmai, Thailand.
- Tongbai, P. and Chitsomboon, T. (2008c). **Parameters Affecting Ventilation in Building using Solar Chimney.** Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering Conference, Thailand.
- Zhai X.Q., Dai Y.J. and Wang R.Z. (2005). **Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors.** Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 741-757.



CHAPTER 9

ENHANCEMENTS OF ROOOF SOLAR CHIMNEY PERFORMANCE FOR BUILDING VENTILATION

9.1 Abstract

A roof solar chimney (RSC) is inclined in the roof of a building wherein solar radiation is employed to heat the air the channel. The hot air flows up the channel which can be used to induce flow out of the building in order to ventilate it. In this study, parameters that affect the performance of this natural ventilation system were investigated numerically, namely: inclination angles, channel gaps, solar intensities, vertical chimney attachment heights and channel expanding angles. The two last parameters were new concepts that seem to have never been studied before. All of the mentioned parameters were found to exhibit positive effects on the ventilation. Relative merits of these techniques were compared and discussed.

9.2 Introduction

The concept of solar chimney has been employed since ancient past to induce flows to ventilate buildings. Recently it has been adapted to be an electricity generating device (Chitsomboon (2001), Chitsomboon and Tongbai (1998), Chitsomboon and Tongbai (1999)). Building ventilation, however, has been the main application area of this concept. In this method air contained between a parallel channel, normally under a building's roof, or in a vertical chimney, is heated by solar heat flux so that its density is reduced. The lighter air is "pulled" by buoyancy to flow upward through the inclined channel or a

chimney or a chimney-liked structure. The upwardly flowing air is manipulated to induce the surrounding air to ventilate the building. The concept is very simple but to design a good ventilating system based on this principle requires a great deal of theoretical knowledge and proven experimental data.

Bansal *et al.* (1993) and Bansal *et al.* (2005) developed a theoretical model to predict that a solar chimney system could induced air flow around 50–165 m³/h per 1 m² of solar collector area. They also found, both theoretically and experimentally, that the cross sectional area and the height of a solar chimney could significantly affect the air flow rate. Gan (1998) also found similarly but noted that a chimney that was too high could induce a reversed flow near its top. Beneficial effects of channel width, height, and solar intensity were confirmed by Bouchair (1994), Burek and Habeb (2007) and Afonso and Oliveira (2000).

The study of Hamdy and Fikry (1998) reported that roof inclination of 60° produced the best results. Zhai, Dai and Wang (2005) found that roof inclination could be reduced, while increasing efficiency, by using a double channel set up instead of a single channel. Several works on roof solar chimney (RSC) had been conducted by Hirunlabh *et al.* (2001) and Khedari *et al.* (1997, 2000, 2002a, 2002b). Their collective works had suggested that the best roof channel widths should be 10–14 cm and optimal lengths of 1–2 m, while the inclination angles should be 20–45°. Tongbai and Chitsomboon proposed a vertical chimney attachment on top of the roof channel structure and found additional benefit (Tongbai and Chitsomboon (2004)).

From the literature reviewed above it can be concluded that air flow rate through RSC was found to be basically dependent on: solar intensity, chimney height (or roof inclination), channel width, chimney attachment as well as manipulations on the

configurations. The qualitative trends of past researches agreed well with one another but with some quantitative differences.

The recent works of Tongbai and Chitsomboon (2008a, 2008b) have found that expansions of the channel along the flow path could also help increase the air flow rate. This finding was based on an analysis of the theoretical model of Chitsomboon (2000) and was confirmed by Koonsrisuk and Chitsomboon (2006) in the context of a solar chimney for electricity generation.

The main objectives of this study were to reinvestigate the beneficial effects (or the lack thereof) of all the mentioned parameters in a wider range and to compare their relative merits. By using the same tool for these investigations the results could be compared more credibly than before. Another objective was to introduce the concept of using the expanding channel to a wider audience since up until now it was circulated only within a small research community of Thailand.

9.3 Methodology

ANSYS CFX, Release 11.0 is the basic CFD (Computational Fluid Dynamics) tool that was used in this study. The CFD code was based on the finite volume methodology with the unstructured grid. Before endeavoring into the computation, the program was validated by solving for a free convective flow over a heated flat plate. Good comparisons of the computed results with those of the similarity method (Kay and Crawford (1993)) in Figure 9.1 helps establish confidence in the forthcoming computations.

A schematic of the full-featured roof solar chimney is as shown in Figure 9.2. In this configuration the air channel is expanding along the flow path (with the angle, β) and a vertical chimney is also attached at the exit. The conditions used for the computational test cases are as indicated in Table 9.1.

Assumptions and conditions used in this study were as follows:

- Two – dimensional air channel.
- Uniform volumetric heat source to simulate the solar heat absorption.
- Laminar flow (low Grashof number).
- Boussinesq’s approximation for density change due to heat.
- Numerical convergence deemed by RMS residuals and mass flow rates in

channel

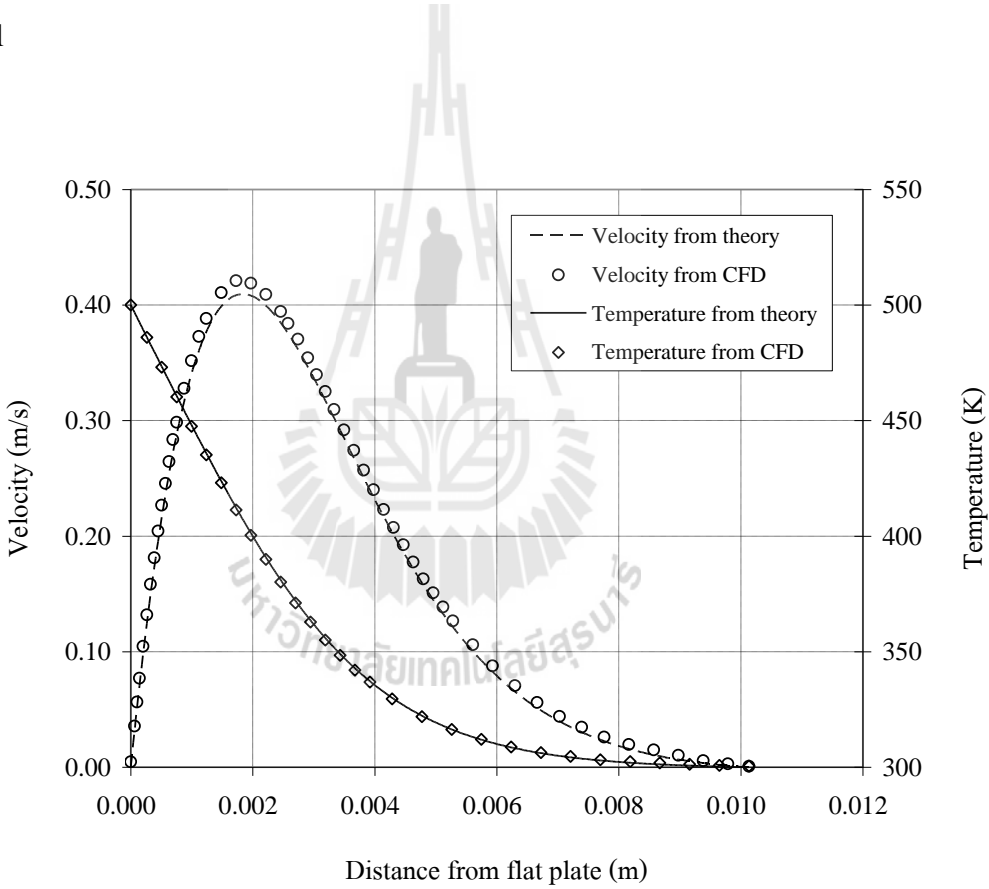


Figure 9.1 Comparison of velocity and temperature profiles between CFD and theory for buoyant boundary layer flow along a vertical flat plate.

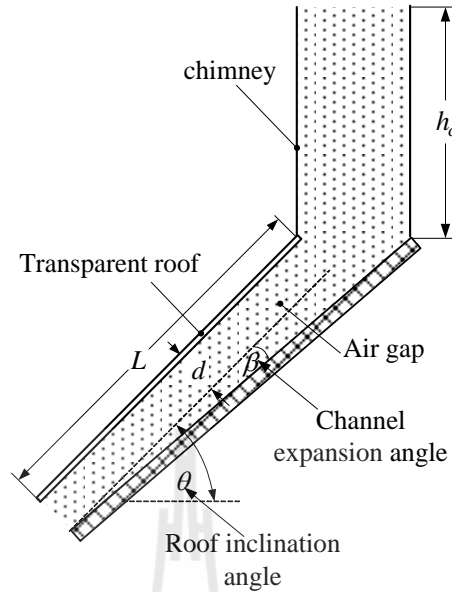


Figure 9.2 Schematic of the roof solar chimney.

Table 9.1 Conditions used in the computational test cases.

Case	increment	β	d , cm	L , m	h_c , m	\dot{q} (W/m^2)
Channel expansion, β	1°	0- 12°	14	1	0	500, 650, 800, 900
Channel gap, d	2°	0	10- 60	1	0	500, 650, 800, 900
Inclination angle of Roof, θ	15°	0	10, 30	Dependent to θ	0	650
Chimney attachment height, h_c	0.25 m	0, 4°	14	1	0- 1.25	800
Overall height of roof, h_o	-	0	14	-	-	800

The second assumption is plausible because we are more interested in qualitative solution rather than quantitative solution. In other words, we are interested in the macroscopic behavior of the flow so that we can observe trends and relative merits of each technique.

Detailed heat transfer models certainly will improve quantitative results slightly but should not change trends and qualitative behaviors of the solutions.

9.4 Result and Discussion

9.4.1 Effects of Channel Expansion Angles

Figure 9.3 indicates that the flow rate increases with the channel expansion angle. The relationships are almost linear to about 5 degree and decline gradually thereafter. The declines were probably due to the flow being separated from the wall which is often observed for flow in a diffuser. At about 6 degree expansion the flow rate increased by about 24% over the no expansion case. This is quite significant and it offers a new means to enhance the ventilation rate. Experiments are needed here to confirm the findings of this study.

The reason behind the increase of the flow rate is perhaps that of the diffuser effect whereby the flow at inlet can increase its velocity and hence reduces its pressure according to the Bernoulli's principle. The low pressure at the inlet can be recovered through the expanding channel (again by the Bernoulli's principle) and equilibrate itself with that of the surrounding at the exit. Observe also that the graphs wiggle at about 7 degree expansion; this was due to the mentioned flow separations. More expansions beyond the separation limit cause the air flow rates to reduce for all insulations due to increased frictions caused by progressively larger flow separations.

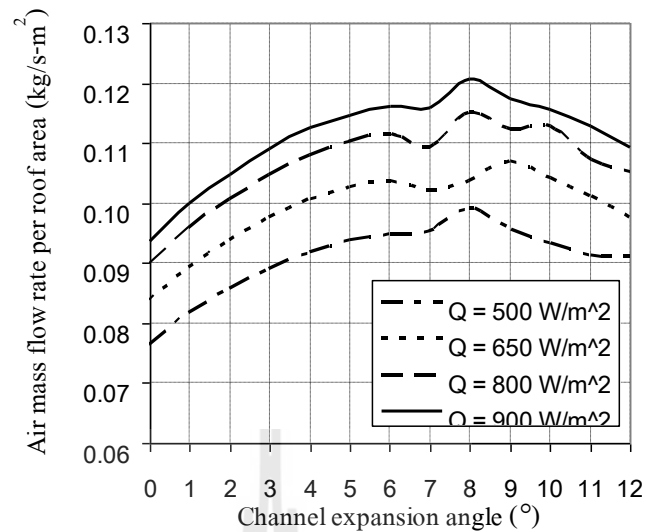


Figure 9.3 Air mass flow rates per projected area of roof due to channel expansion angle ($L=1$ m, $\theta=45^\circ$, $d=14$ cm).

9.4.2 Effects of Air Gap

Like previous researchers, we found that the increase of air gap (channel width) could increase the flow rate. In Figure 9.4 it is evident that the air flow rates increase approximately linearly with the air gaps. At low insolation when the air gap is increased from 10 cm to 60 cm the air flow rates increase as much as 250%. Our finding here, however, contradicts Hirunlabh *et al* (2001)'s finding wherein they reported that the optimal air gap should be about 14–16 cm for a 1 m long channel, beyond which a decreased flow rate resulted.

The contradiction with Hirunlabh *et al* (2001)'s findings could be due to the fact that in Hirunlabh *et al* (2001)'s experiment the increased air gaps helped promote heat losses to the sides of the channel while in our numerical investigations such losses were ignored. If this is really the case then it suggests that sidewall insulation is very important.

It is interesting to note that as the air gap is widened the air temperature is reduced, hence the reduction of the buoyant driving force and air velocity. But it seems that

the increase of the cross sectional area overcompensates the reduced velocity such that air mass flow rate increases. This could be a subject of further theoretical and experimental investigations.

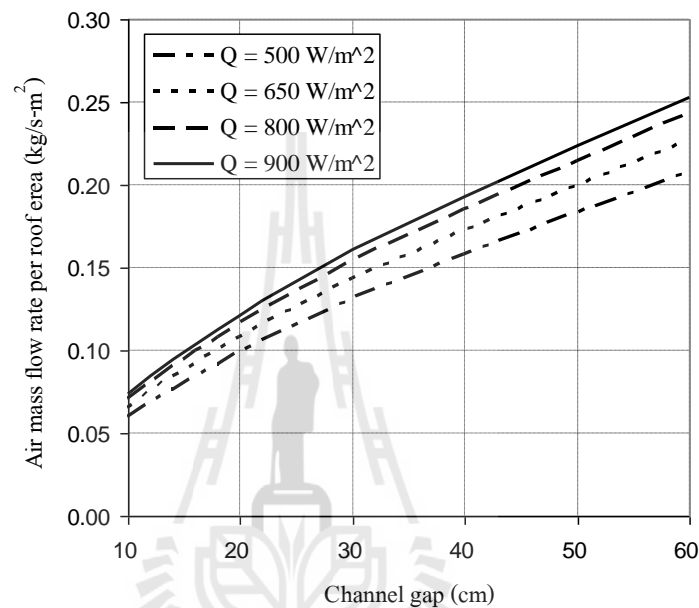


Figure 9.4 Air mass flow rates per projected area of roof due to air gap variation
($L = 1 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$).

9.4.3 Effects of Roof Inclinations

In this study the roof inclination was increased while keeping the base (horizontal) length constant; thus, the height increases with the inclination. The base length was set as the projected area of the 2 m long RSC inclined at 15° . With this set up the total solar heat added were the same for all cases; any change in the flow rate were due solely to the roof inclination. It is not a surprise to see that the flow rate increases with the roof inclination, as is shown in Figure 9.5. At air gap of 10 cm when the angles increase from 15 to 45° the ventilation increases by about 90%; this is quite significant.

The rates of increase of the flow rates appear to be almost linear. The general reason for the increase simply is the stack effect due to the increase of the vertical height of the channel. A steep roof obviously performs better but its accompanying cost and architectural connotation must also be considered in a ventilation design. The mild bend down at 30 and bend up 60° of the graphs are believed to be the effect of the height being increased with $\tan \theta$ and the bends here are characteristic of $\tan \theta$ curve.

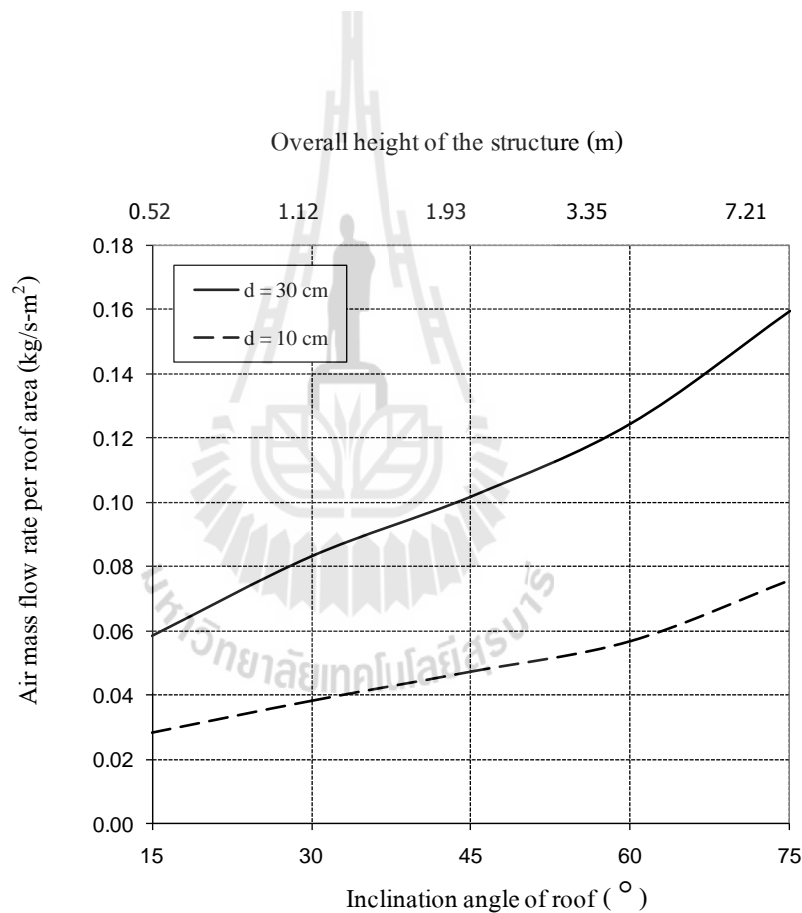


Figure 9.5 Air mass flow rates per projected area of roof due to roof length and roof angles ($\dot{q} = 650 \text{ W/m}^2$, $\beta = 0^\circ$)

9.4.4 Effects of Chimney Attachment

Several past studies had been conducted on solar chimney in building ventilation but they used chimneys also as a means to collect solar radiation, either in a

vertical or an inclined arrangements. In this study a vertical chimney is attached to the inclined channel's exist mainly to provide an additional height for the system and not for the purpose of adding heat; this is more plausible to the tropical part of the world where the sun is high. The results, shown in Figure 9.6, indicate an increase of the flow rate with the height of the vertical chimney attachment. In this configuration the roof angle was 45° and the roof length was 1 m, giving the roof height of 0.71 m by attaching the 'passive' vertical chimney for another 1 m the flow rate increase by about 67%

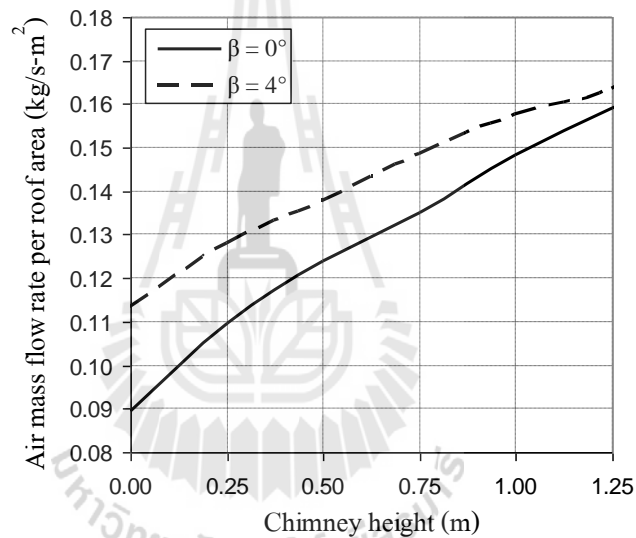


Figure 9.6 Air mass flow rate per projected area of roof due to chimney height

$$(d=14 \text{ cm}, \dot{Q}=800 \text{ W/m}^2)$$

The results of the case for $\beta = 4^\circ$ are also shown in the plot. In this case only the roof portion was expanded while the chimney portion was straight. The advantage of the expansion angle is seen to be lesser as the chimney is longer. This is believed to be due to the effect of lesser buoyant force caused by a lower air temperature in the expanded roof

The Chimney attachment offers a new design alternative with different architectural appeals as well as cost.

9.4.5 Chimney V.S. No Chimney

In this design, a flat roof is combined with a vertical chimney to give the same overall height as the inclined roofs without chimneys. From an engineering point of view it is interesting to see whether the two designs, with the same overall height, will produce similar flow rate. Figure 9.7 provides the comparisons of the two systems wherein it is seen that the roof without a chimney performs slightly better. At the chimney height of 1 m the air flow rate reduced by about 15% below the level of the no-chimney condition. This is believed to be the effect of friction since the flow has to turn a sharp corner formed at the juncture of the flat roof and the vertical chimney. It is obvious that, a combination of a less inclined roof with a chimney attachment can be made to give the same total mass flow rate as a more inclined roof.

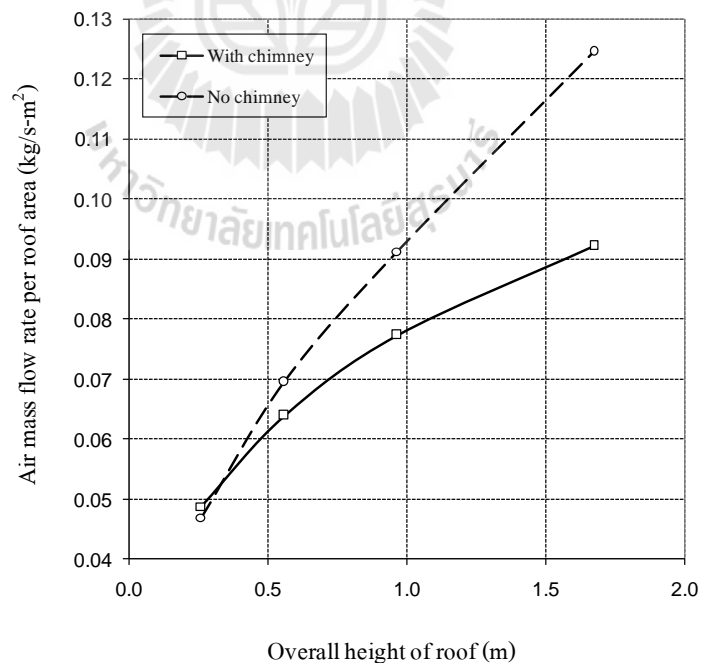


Figure 9.7 Air mass flow rate per projected area of roof due to overall height of chimney ($d=14$ cm, $\beta=0^\circ$, $\dot{q}=800$ W/m²)

9.5 Conclusions

The numerical study performed in this study has confirmed the trends of some of the previous studies in the past, namely that flow rates in solar chimney for building ventilations increase with air gap, roof inclination and insolation level. Wider air gaps helped increase the ventilation most significantly, up to 250% as the gap increased from 10 to 60 cm. The continuous increase of ventilation with the air gap contradicts the finding of a past investigation which proposed an optimal air gap width. This contradiction is believed to be due to the heat losses to the side panels which were not included in this study. Two new concepts, namely, the longitudinally expanded channel and the (passive) vertical chimney attachment, have been introduced and found to help increase the ventilation rate even further and quite significantly. These new concepts offer new design alternatives for the natural ventilation of a building.

9.6 References

- A. Bouchair, **Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria.** Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 15, No, 2, 1994, pp. 81 – 93.
- ANSYS CFX, Release 11.0.** ANSYS, Inc.
- A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, **Effect of Tower Area Change on the Potential of Solar Tower.** The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment, Bangkok, Thailand, 2006.
- C. Afonso and A. Oliviera, **Solar chimneys: simulation and experiment, Energy and Buildings.** Vol. 32, 2000, pp. 71 – 79.
- G. Gan, **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings.** Energy and Buildings, Vol. 27, 1998, pp. 37 – 43.

- J. Hirunlabh , S. Washirapuwadon, N. Pratinthong and J. Khedari, **New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation.** Building and Environment, Vol. 36, No. 3, 2001, pp. 383 – 391.
- J. Khedari, J. Hirunlabh and T. Bunnag, **Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses.** Energy and Buildings, Vol. 26, No. 2, 1997, pp. 159 – 164.
- J. Khedari, P. Yimsamerjit and J. Hirunlabh, **Experimental investigation of free convection in roof solar collector.** Building and Environment, Vol. 37, 2002, pp. 455 – 459.
- J. Khedari, S. Ingkawanich, J. Waewsak and J. Hirunlabh, **A PV system enhanced the performance of roof solar collector.,** Building and Environment, Vol. 37, No. 12, 2002, pp. 1317 – 1320.
- J. Khedari, W. Mansirisub, S. Chaima, N. Pratinthong and J. Hirunlabh, **Field measurements of performance of roof solar collector.** Energy and Buildings, Vol. 31, No. 3, 2000, pp. 171 – 178.
- L.F. Hamdy and M.A. Fikry, **PASSIVE SOLAR VENTILATION.** Renewable Energy, Vol. 14, No. 1 – 4, 1998, pp. 381 – 386.
- N.K. Bansal, J. Mathur, S. Mathur and M. Jane, **Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation.** Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 373 – 377.
- N.K. Bansal , R. Mathur and M.S. Bhandari , **Solar chimney stack ventilation.** Building and Environment, Vol. 28, No. 3, 1993, pp. 373 – 377.
- P. Tongbai and T. Chitsomboon , Enhancements of solar chimney for building ventilation. The 4th Conference on Energy Network of Thailand, Nakhon Pathom, Thailand, 2008.
- P. Tongbai and T. Chitsomboon, **Parameters Affecting Ventilation in Building using Solar Chimney.** Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering

- Conference, Thailand, 2008.
- P. Tongbai and T. Chitsomboon, **The Use of Attic and Chimney to Enhance Air Ventilation: A Numerical Analysis**. Proceedings of the 18th National Mechanical Engineering Conference, Khonkaen, Thailand, 2004, pp. 263 – 268.
- T. Chitsomboon, **A Validated Analytical Model for Flow in Solar Chimney**. International Journal of Renewable Energy Engineering. Vol. 3, No. 2, 2000, pp. 339–346.
- T. Chitsomboon and P. Tongbai, **A Mathematical Model of Solar Chimney for Electrical Energy Production**. Proceedings of the 12th National Mechanical Engineering Conference, Chulalongkorn University, Thailand, 1998, pp. 14 – 20.
- T. Chitsomboon and P. Tongbai, **The Effect of Chimney-Top Convergence on Efficiency of a Solar Chimney**. Proceedings of the 13th National Mechanical Engineering Conference, Pataya, Thailand, 1999, pp. 263 – 268.
- W.M . Kays and M.E. Crawford, **Convective heat and mass transfer**. third ed., McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- S. A.M Burek and A. Habeb, **Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls**. Energy and Buildings, Vol. 3, 2007, pp. 128 – 135.
- X.Q. Zhai, Y.J. Dai and R.Z. Wang , **Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors**. Applied Thermal Engineering, Vol. 25, 2005, pp. 741 – 757.

บทที่ 10

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 บทสรุป

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลผ่านอาคารที่ขับเคลื่อนโดยระบบปล่องแฉดด้วยโปรแกรม ANSYS CFX สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ค่าอัตราการระบายอากาศ)เป็นฟังก์ชันของความเข้มของแสงแดด และปัจจัยโครงสร้าง (geometrical parameters) ได้แก่ มุมเอียงของหลังคา ความยาวของหลังคา ความกว้างของช่องอากาศ ความสูงของปล่อง และมุมบานตัวของช่องอากาศทั้งสิ้น

2) การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ เพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้น เมื่อให้ความเข้มของแสงแดดเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่า อากาศยิ่งร้อน ยิ่งทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศได้มาก อย่างไรก็ตาม ในการนำไปปฏิบัติจริงต้องพึงระวังเรื่องความร้อนที่จะระบายออกจากแผ่นดูดกลืนแสงแดดสู่ห้องอยู่อาศัย ซึ่งป้องกันได้โดยการติดตั้งวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวน

3) มุมเอียงของหลังคามากขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมากขึ้น ในที่นี้เพิ่มมุมเอียงของหลังคาโดยให้ระยะในแนวนอนคงที่ (ให้พื้นที่รับแดดของหลังคาคงที่) นั่นแสดงว่าระยะระหว่างทางเข้ากับทางออก (stack height) มากขึ้นเมื่อมุมเอียงมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้อัตราการไหลสูงขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลเป็นฟังก์ชันของระยะในแนวดิ่งระหว่างช่องเปิดทางเข้าและออกของระบบ หรืออธิบายในอีกทางหนึ่งคือ อัตราการไหลเชิงมวลผ่านอาคารสูงขึ้นเมื่อให้ความยาวของหลังคามากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในการนำไปปฏิบัติจริงย่อมมีข้อจำกัดในการใช้งานเกี่ยวกับราคาวัสดุที่จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมเอียงมากขึ้น ตลอดจนความสวยงาม ซึ่งประเด็นหลังนั้นขึ้นอยู่กับความชอบส่วนบุคคล

4) การเพิ่มความกว้างของช่องอากาศสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้ โดยปริมาณการเพิ่มเกือบเป็นเชิงเส้นกับความกว้างที่เพิ่มขึ้น

5) การค้นพบประเด็นใหม่สำหรับงานวิจัยที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือการทำให้ช่องอากาศมีการกระจายพื้นที่หน้าตัดการไหล ซึ่งในที่นี้เรียกว่ามุมบานตัวของช่องอากาศนั้น สามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้มากกว่า 30% ที่มุม 6° ถือเป็นทางเลือกในการออกแบบการระบายอากาศที่ดีแนวทางหนึ่งที่ยังไม่พบในวรรณกรรม

6) การติดตั้งปล่องแนวตั้งที่ทางออกของหลังคาสามารถเพิ่มอัตราไหลมวลได้มาก เพราะเป็นการเพิ่มระยะในแนวดิ่งระหว่างช่องเปิดทางเข้าและทางออกของอากาศ (stack height) โดยเพิ่มขึ้นถึง

38% ที่ความสูงปล่องเพียง 0.5 m ในทางปฏิบัติการเลือกความสูงที่เหมาะสมของปล่องต้องคำนึงถึงความสวยงามและค่าวัสดุที่เพิ่มขึ้นด้วย

7) การใช้หลังคาเอียงที่ความสูงรวมเท่ากับหลังคาแบบราบที่มีปล่องทำให้เกิดอัตราการไหลได้มากกว่า และความแตกต่างของอัตราการไหลยิ่งมากขึ้นที่ความสูงรวมของปล่องมากขึ้น

8) ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองใน 3 มิติ เทียบกับจาก 2 มิติ มีค่าเพียง 1.74% ซึ่งถือว่าเป็นค่าน้อยมาก นั่นหมายความว่า สามารถทำการจำลองการไหลเพื่อศึกษาอัตราการระบายอากาศผ่านอาคารใน 2 มิติได้ ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาได้เป็นอย่างมาก

9) จากการศึกษาใน 3 มิติ พบว่าตำแหน่งของปล่องไม่มีผลต่อค่าอัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถให้ปล่องอยู่ตรงไหนก็ได้บนหลังคา ซึ่งนับเป็นข้อดีเพราะเป็นการลดข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง

10.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำการจำลองพฤติกรรมกรไหลที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น เช่น มีการพิจารณาการสูญเสียความร้อนจากปล่อง หรือกรอบผนังของอาคาร เป็นต้น

2) ควรมีการศึกษาเชิงการทดลอง เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS CFX นี้

3) หาคำตอบให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อประเมินค่าอัตราการระบายอากาศ เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลข และหรือจากการทดลองต่อไป

4) ควรทำการศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการระบายอากาศในรูปแบบตัวแปรไร้มิติ โดยพัฒนาต่อจากกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้พัฒนาไว้ เพื่อลดจำนวนการทดลอง หรือการจำลองการไหลให้น้อยลง

5) ควรขยายผลงานวิจัยในอนาคต โดยหาแนวทางลดอุณหภูมิของอากาศก่อนจะเข้าตัวอาคาร เพื่อการทำความเย็นที่ดีขึ้น เช่น การทำความเย็นโดยการระเหย หรือการระเหยโดยอ้อม เป็นต้น ซึ่งวิธีการหลังน่าจะเหมาะสมกับลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยซึ่งมีอากาศลักษณะร้อนชื้นมากกว่า เพราะเป็นการลดอุณหภูมิโดยที่ความชื้นของอากาศไม่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบายมากกว่า



ภาคผนวก

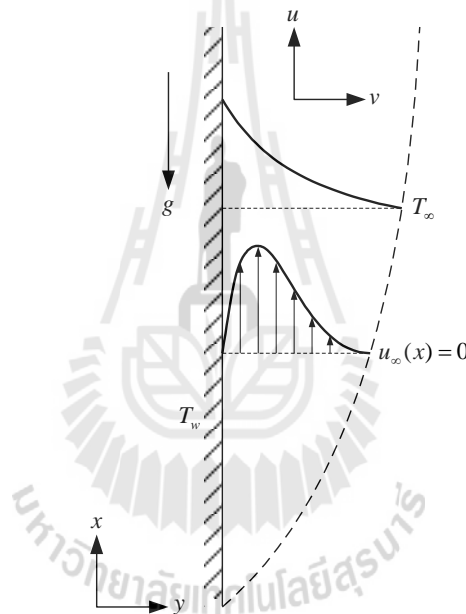
ภาคผนวก ก

ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหลโดยการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง



ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหลโดยการพาอึสร่ผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

พิจารณาแผ่นร้อนที่วางตัวในแนวตั้งซึ่งมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 500 K ความยาวของแผ่นร้อนเท่ากับ 10 cm 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 ลักษณะทางกายภาพของปัญหาการไหลโดยการพาอึสร่ผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง

ความยาวของแผ่นร้อนเท่ากับ 10 cm นั้นสามารถนำไปพิสูจน์ได้ว่าช่วงของการไหลอยู่ในช่วงราบเรียบจริงได้ โดยการคำนวณหาค่าเลขราเลย์ (Rayleigh number) หากการไหลอยู่ในช่วงของการไหลแบบราบเรียบ ค่าเลขราเลย์จะมีค่าไม่เกิน 1×10^9 หากค่าเลขราเลย์มีค่าเกินกว่าค่านี้ถือว่าเป็นการไหลในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งค่าเลขราเลย์นี้เป็นฟังก์ชันของค่าเลขกราชอฟ (Grashof number) และค่าเลขพรันเทิล (Prandtl number) ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Ra = Gr \times Pr$$

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

และ
$$Pr = \frac{\rho c}{\mu}$$

จะเห็นว่าค่าเลขพรันเทิลเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของของไหล ซึ่งเป็นค่าคงที่ ณ อุณหภูมิ หนึ่ง ๆ ดังนั้น จึงสามารถหาค่าเลขพรันเทิลนี้ได้จากการเปิดตารางคุณสมบัติได้โดยตรง

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

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

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

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

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

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

$$Pr = 0.711$$

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

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

คำนวณหาค่าเลขกราสอฟจากสมการ (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

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

และ

$$G(\eta) = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}$$

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

สมการที่ถูกนำมาวิเคราะห์หาคำตอบเป็นสมการที่ทำการแปลงให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (simultaneous ordinary differential equations) ในรูปของตัวแปรไร้มิติเรียบร้อยแล้ว ดังนี้

$$F''' + \frac{3FF''}{4} - \frac{F'^2}{2} + G = 0$$

$$G'' + \frac{3}{4} Pr FG' = 0$$

ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตเช่นเดียวกันกับสมการก่อนที่จะแปลงให้เป็นสมการในรูปตัวแปรไร้มิติ แต่ได้ทำการแปลงให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ในรูปไร้มิติเรียบร้อยแล้ว ดังนี้

ที่ $\eta = 0$: $F' = 0$

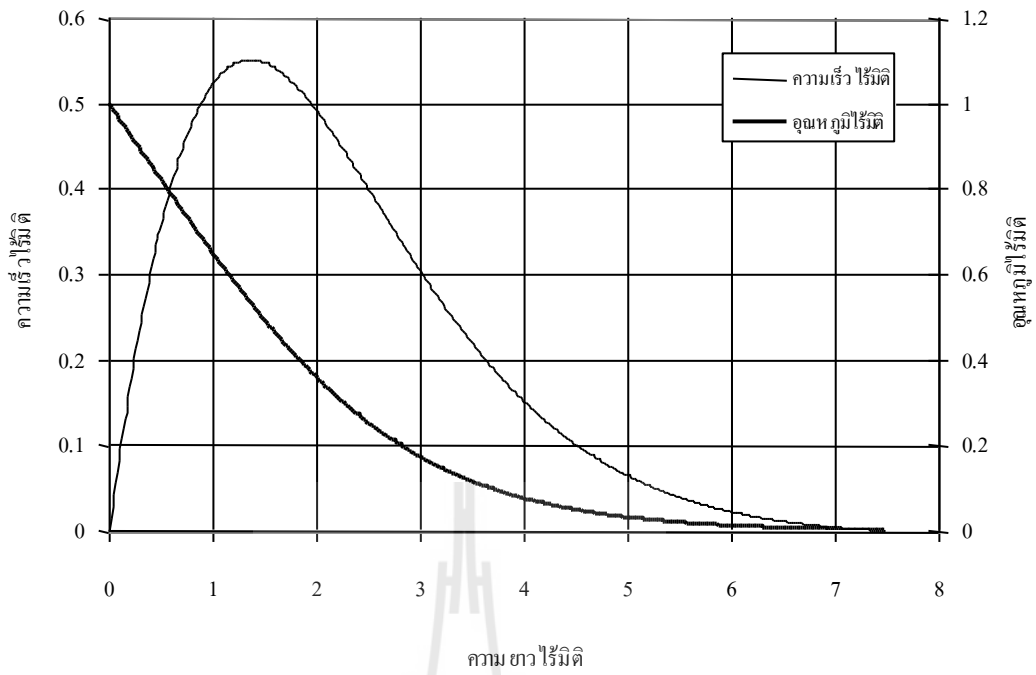
ที่ $\eta = 0$: $F = 0$

ที่ $\eta = 0$: $G = 1$

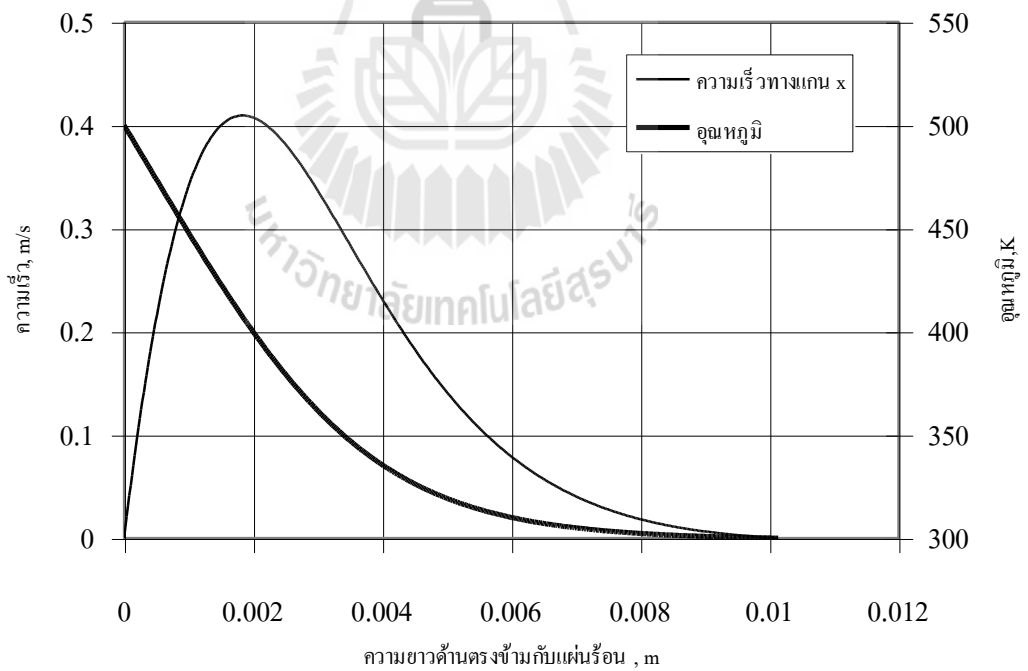
หาก η มีขนาดใหญ่แล้ว $F' \rightarrow 0$

หาก η มีขนาดใหญ่แล้ว $G \rightarrow 0$

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) ก็ได้ค่าความเร็วและอุณหภูมิตามลำดับ



รูปที่ ก.2 รูปด้านข้างตัวแปร ไร้มิติของความเร็วและอุณหภูมิ



รูปที่ ก.3 รูปด้านข้างของความเร็วและอุณหภูมิ

ตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับปัญหาการไหลแบบการพาอิสระผ่านแผ่นร้อนในแนวตั้ง หรือการไหลแบบการพาโดยทั่วไปอย่างหนึ่งคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, h) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

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

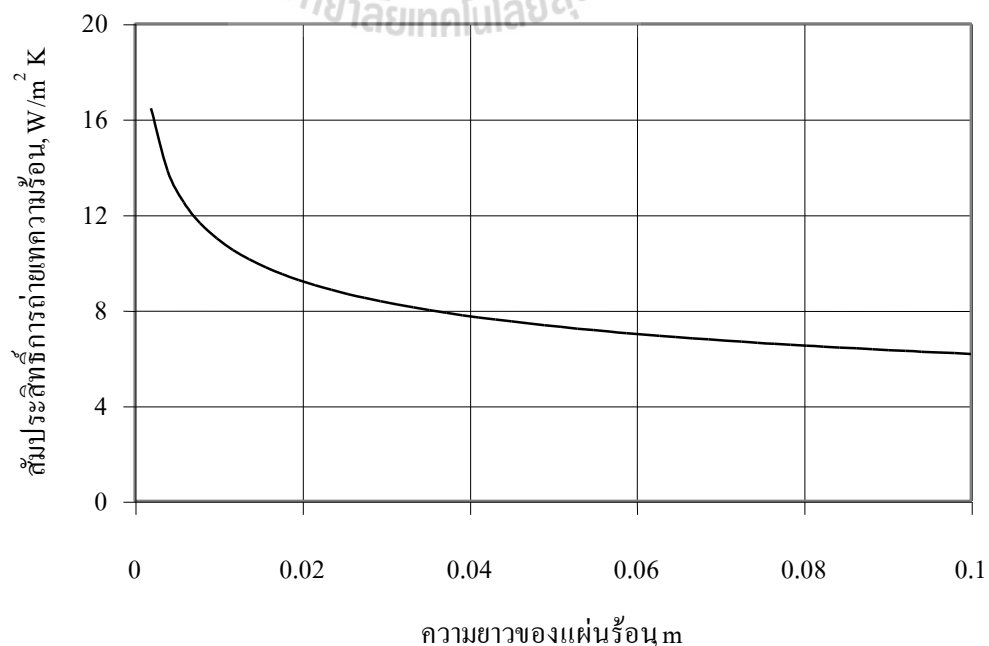
ค่า G' ที่ $\eta = 0$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมฟอร์แทรนที่ใช้ในการหาคำตอบดังกล่าว ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่า Nu_x นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$Nu_x = \frac{xh_x}{k}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

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

โดยค่าที่อยู่ในวงเล็บสี่เหลี่ยมก็คือค่าของ Gr ดังแสดงไว้ในสมการ (ก.2) นั้นเอง จะเห็นได้จากสมการว่าค่า h_x เป็นฟังก์ชันของ x ซึ่งคือความยาวของแผ่นร้อนกับค่าคุณสมบัติของของไหล หากแทนค่าคุณสมบัติของของไหล ซึ่งในที่นี้คืออากาศที่อุณหภูมิ 300 K และแทนค่าที่ x ณ ตำแหน่ง ต่าง ๆ แล้วก็จะทราบค่า h_x ได้ รูปที่ ก.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากสมการ (ก.11) ดังกล่าว



รูปที่ ก.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบกับความยาวของแผ่นร้อน

Code โปรแกรมที่ใช้ในการหาผลเฉลยแม่นยำตรง

```

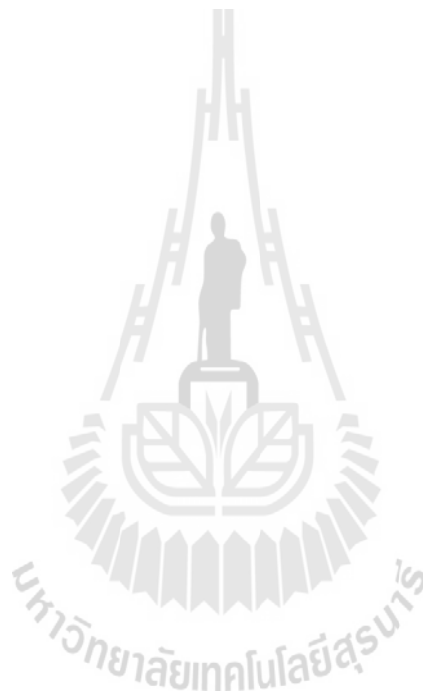
*****
****              SIMPLNAT              ****
*****
**** THIS PROGRAM GIVES SIMILARITY SOLUTION RESULTS FOR ****
**** LAMINAR FREE CONVECTIVE BOUNDARY LAYER FLOW OVER A ****
**** VERTICAL ISOTHERMAL FLAT PLATE. ****
*****
      DIMENSION T(10000),F(10000),G(10000),H(10000),A(10000)
      & ,HGUESS(3),AGUESS(3),FPIN(3),TPIN(3)
      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
DEFVVF=(FPIN(2)-FPIN(1))/0.001
DEFVVT=(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)/DEFVVT)/(DETVF/DETVT-DEFVVF/DEFVVT)
DA=(TPIN(1)/DETVF - FPIN(1)/DEFVVF)/(DETVT/DETVF-DEFVVT/DEFVVF)
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
```

