

การวิเคราะห์ความเหมือนเพื่อการสร้างแบบจำลองปล่องลมแดด Similarity Analysis in Scale Modeling of a Solar Chimney

อาทิตย์ คุณศรีสุข¹ และ ทวิช จิตรสุมบูรณ์²

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-4410 โทรสาร 0-4422-4411 E-mail: atit@math.sut.ac.th¹, tabon@ccs.sut.ac.th²

Atit Koonsrisuk¹ and Tawit Chitsomboon²

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Muang District, Nakorn Ratchasima 30000 Thailand

Tel: 0-4422-4410 Fax: 0-4422-4411 E-mail: atit@math.sut.ac.th¹, tabon@ccs.sut.ac.th²

บทคัดย่อ

ปล่องลมแดด(solar chimney)เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการพาความร้อนธรรมชาติ(natural convection) ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวขึ้นในแนวตั้งของอากาศ โดยสามารถนำปล่องลมแดดไปใช้ในการอบแห้ง การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ หรือการผลิตกระแสไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์มิติ(dimensional analysis) และวิศวกรรมสัญชาตญาณ(engineering intuition) ร่วมกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ ยุบรวมตัวแปรที่มีผลต่อการไหลในระบบปล่องลมแดดซึ่งมีจำนวนหลายตัวแปร ทำให้เหลือตัวแปรไร้มิติ(dimensionless variable)เพียง 2 ตัว จากนั้นได้ออกแบบแบบจำลองขนาดเล็ก(small-scale model)ที่มีความเหมือนทางรูปทรง(geometric similarity)กับต้นแบบขนาดใหญ่(prototype) และแบบจำลองขนาดเล็กที่มีความเหมือนทางรูปทรงเพียงบางส่วน(incomplete geometric similarity)กับต้นแบบขนาดใหญ่ แล้วใช้โปรแกรม CFD (Computational Fluid Dynamics) สำเร็จรูปชื่อ "CFX" ทำการคำนวณการไหลในแบบจำลองขนาดเล็กและต้นแบบขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาความเหมือนที่เกิดขึ้น และนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบสร้างปล่องลมแดดต่อไป

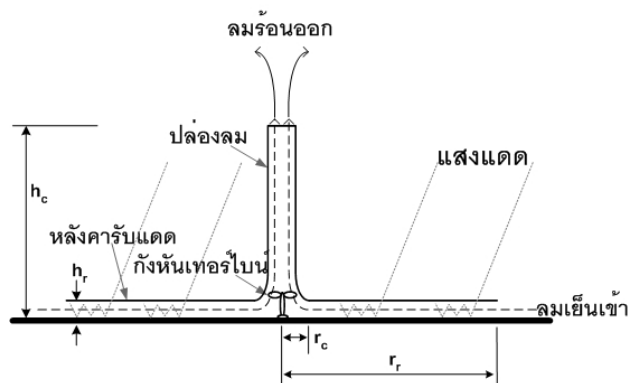
Abstract

Solar chimney is a device for generating updraft of air that is caused by the natural convection mechanisms. Applications of solar chimney are: natural ventilation; drying; and electricity generation. A combination of dimensional analysis methodology, engineering intuition, and the result from past researches, provides the functional relationship of the variables involved in terms of 2 dimensionless variables only. Using the functional relationship, two types of small-scale model are developed. One type is geometrical similar to the prototype, while another type is

just partially geometrical similar to the prototype. After that CFX, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, is used to determine dynamic similarity between both types of model and prototype. The information obtained will be used in designing the model.

1. บทนำ

ปล่องลมแดด(solar chimney)เป็นเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า[9] โดยปล่องลมแดดมีหลักการทำงาน คือ การให้อากาศภายใต้"หลังคารับแดด"รับพลังงานความร้อนจากแสงแดด เพื่อให้ลอยตัวขึ้นยังปล่องสูง ด้วยการไหลแบบการพาความร้อนธรรมชาติ(natural convection) จากนั้นใช้กังหันเทอร์โบใบพัดดูดซับพลังงานจากการไหลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไปดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพแสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของปล่องลมแดด

ก่อนที่จะมีการสร้างปล่องลมแดดเพื่อใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจริงนั้น ต้องมีการศึกษาทั้งในเชิงทฤษฎีและทำการทดลอง เพื่อการออกแบบ

ปล่องลมแดดที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาของผู้วิจัยในเอกสารอ้างอิงหมายเลข 2-5 นั้นเป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลข เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลในปล่องลมแดด ขณะที่งานวิจัยในเอกสารอ้างอิงหมายเลข 7-8 เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีด้วยวิธีวิเคราะห์มิติ(dimensional analysis) โดยเลือกวิธีการสร้างตัวแปรไร้มิติ โดยการทอนด้วยหน่วยวัดคุณลักษณะ (characteristic scaling) [6] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องในรูปตัวแปรไร้มิติ(dimensionless variables) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะช่วยประหยัดงบประมาณและเวลาเมื่อต้องการทดลอง [1]

กลุ่มผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างแบบจำลองขนาดเล็กของปล่องลมแดด โดยจะสร้างปล่องลมแดดจำนวน 2 ชุดในพื้นที่กลางแจ้ง ซึ่งในการออกแบบได้พยายามให้ปล่องลมแดดทั้งสองมีความเสมือนทางพลศาสตร์(dynamic similarity)ต่อกัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มิติ ซึ่งหากพบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความถูกต้อง ก็จะใช้ความสัมพันธ์นี้ในการออกแบบปล่องลมแดดขนาดใหญ่เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์มิติ จากนั้นได้ออกแบบปล่องลมแดดที่จะใช้ในการศึกษา โดยเลือกวัสดุที่จะใช้ในการสร้างหลังคาปรับแดดของโรงงานต้นแบบเป็นกระจกใส และเลือกวัสดุที่จะใช้ในการสร้างหลังคาปรับแดดของแบบจำลองขนาดเล็กเป็นกระจกสีชาและกระจกใส ซึ่งความมุ่งหมายของผู้วิจัย คือ ใช้กระจกใสทั้งในโรงงานต้นแบบและแบบจำลองขนาดเล็ก เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้องเนื่องจากการใช้กระจกที่ไม่เหมือนกัน งานวิจัยจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 7 ได้แสดงให้เห็นว่า โปรแกรมคำนวณการไหล(CFD)สำเร็จรูปชื่อ CFX สามารถใช้ในการทำนายคำตอบเชิงตัวเลขสำหรับการไหลในปล่องลมแดดได้ ในการศึกษาครั้งนี้ จึงใช้โปรแกรม CFX เพื่อคำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลขของการไหลในโรงงานต้นแบบและแบบจำลองขนาดเล็ก จากนั้นจึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างโรงงานต้นแบบกับแบบจำลอง

2. การวิเคราะห์มิติของการไหลในปล่องลมแดด

พิจารณาการไหลแบบไม่มีความหนืด(inviscid flow)ในปล่องลมแดด ลักษณะการไหลอาจขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้

h_c $\equiv$ ความสูงของปล่อง, m

h_r $\equiv$ ความสูงของหลังคาปรับแดด, m

r_c $\equiv$ รัศมีของปล่อง, m

r_r $\equiv$ รัศมีของหลังคาปรับแดด, m

A $\equiv$ พื้นที่หน้าตัดของปล่องลม, m²

ρ $\equiv$ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m³

g $\equiv$ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางโลก, m/s²

q''' $\equiv$ กำลังความร้อนที่ของไหลได้รับต่อหน่วยปริมาตร, W/m³

c_p $\equiv$ ความร้อนจำเพาะของของไหล, J/(kg.K)

β $\equiv$ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของของไหล, 1/K

V $\equiv$ ความเร็วของของไหล, m/s

จะเห็นว่าจำนวนตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไหลมีมาก ทำให้เป็นการลำบากหากจะทำการทดลอง โดยอาศัยวิธีวิเคราะห์มิติ ร่วมกับผลจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ และวิศวกรรมสัญชาตญาณ(engineering intuition) ผู้วิจัยจึงได้กำหนดกลุ่มตัวแปรด้วยการยุบรวมตัวแปรบางตัวเข้าด้วยกัน

ซึ่งวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์มิติในที่นี้ คือ จะหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่เกิดขึ้นภายในปล่องลม, $\rho AV \frac{V^2}{2}$ กับตัวแปรที่เกี่ยวข้องในรูปของตัวแปรไร้มิติ

ขั้นที่ 1 ให้กำลังงานดังกล่าวขึ้นกับ $\rho, gh_c, \frac{q'''}{c_p}, \beta$ และ $\forall_r$ เมื่อ $\forall_r$ คือ ปริมาตรใต้หลังคาปรับแดด ได้ว่า

$$\rho AV \frac{V^2}{2} = f^n(\rho, gh_c, \frac{q'''}{c_p}, \beta, \forall_r) \quad (1)$$

ขั้นที่ 2 เลือก M, L, T และ Θ เป็นมิติพื้นฐาน (fundamental dimensions)

ขั้นที่ 3 สามารถเขียนแจกแจงมิติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในรูปของมิติพื้นฐานได้ดังนี้

	$\rho AV \frac{V^2}{2}$	ρ	gh_c	$\frac{q'''}{c_p}$	β	$\forall_r$
M	1	1	0	1	0	0
L	2	-3	2	-3	0	3
T	-3	0	-2	-1	0	0
Θ	0	0	0	1	-1	0

ขั้นที่ 4 จากขั้นที่ 3 จะเห็นว่ามิติพื้นฐานของตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีทั้งสิ้นมิติตามวิธีการในเอกสารอ้างอิงหมายเลข 6 ได้ว่าต้องมีตัวแปรทอน(scaling variable) จำนวน 4 ตัว จึงเลือก ρ, gh_c, β และ $\forall_r$ เป็นตัวแปรทอน

ขั้นที่ 5 หามิติพื้นฐานจากตัวแปรทอนได้ดังนี้

$$L = \forall_r^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\Theta = \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

$$T = \frac{\forall_r^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{gh_c}} \quad (4)$$

$$M = \rho \forall_r \quad (5)$$

ขั้นที่ 6 นำมิติเหล่านี้ไปทอนตัวแปรที่เหลือได้ตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{AV \frac{V^2}{2}}{\forall_r^{\frac{2}{3}} (gh_c)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

และ

$$\Pi_2 = \frac{q''' \beta \forall_r^{\frac{1}{3}}}{\rho c_p \sqrt{gh_c}} \quad (7)$$

ดังนั้น ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{AV \frac{V^2}{2}}{\nabla_{r^{\frac{2}{3}}} (gh_c)^{\frac{3}{2}}} = f^n \left(\frac{q'' \beta \nabla_{r^{\frac{1}{3}}}}{\rho c_p \sqrt{gh_c}} \right) \quad (8)$$

หรือ $\Pi_1 = f^n(\Pi_2)$

ซึ่งอาจตีความหมายเชิงกายภาพของ Π_1 ได้ว่าเป็นกำลังคุณลักษณะเนื่องจากพลังงานจลน์ของอากาศ และ Π_2 เป็นกำลังคุณลักษณะเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่อากาศใต้หลังคารับแดดได้รับ

การสร้างแบบจำลอง ในที่นี้จะคำนวณขนาดของแบบจำลองขนาดเล็กเมื่อใช้กระจกสีชาและกระจกใส เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่, q'' มีค่าเท่ากันทั้งในโรงงานต้นแบบและแบบจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างปล่องลมแดด จะสร้างในพื้นที่กลางแจ้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ค่าเดียวกันทั้งในโรงงานต้นแบบและแบบจำลอง ในที่นี้กำหนดให้ q'' มีค่า 800 W/m²

พิจารณาตัวแปรคุณลักษณะตามสมการที่ (7) เพื่อให้เกิดความเหมือนทางพลศาสตร์ได้ว่า

$$\left[\frac{q'' \beta \nabla_{r^{\frac{1}{3}}}}{\rho c_p \sqrt{gh_c}} \right]_m = \left[\frac{q'' \beta \nabla_{r^{\frac{1}{3}}}}{\rho c_p \sqrt{gh_c}} \right]_p \quad (9)$$

โดยในที่นี้ เมื่อเขียนตัวแปรแล้วมีตัวห้อย m จะหมายถึงตัวแปรนั้นเป็นของแบบจำลอง และเมื่อใช้ตัวห้อย p จะหมายถึงตัวแปรนั้นเป็นของโรงงานต้นแบบ จาก (9) หากกำหนดให้ของไหลทำงานเป็นอากาศเหมือนกันได้ว่า

$$\frac{q_p''}{q_m''} = \left[\frac{\nabla_{r_{pm}}}{\nabla_{r_{pm}}} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{h_{cp}}{h_{cm}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{q_p''}{q_m''} = \left[\frac{h_{rp}}{h_{rm}} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{r_{rm}}{r_{rp}} \right]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{h_{cp}}{h_{cm}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

กำหนดให้ กระจกสีชายอมให้พลังงานแสงแดดผ่านได้ 50% และกระจกใสยอมให้ผ่านได้ 100% จากนั้นได้กำหนดขนาดของโรงงานต้นแบบที่จะสร้าง และใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (10) ในการออกแบบโรงงานขนาดเล็ก 1 ขนาดที่ใช้กระจกสีชา และจำนวน 3 ขนาดที่ใช้กระจกใส ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่1 ข้อมูลประกอบกรณีที่จะคำนวณโดยโปรแกรม CFX

กรณี	กระจก	พลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (W/m ²)	ความสูงปล่อง (m)	ความสูงหลังคา (m)	รัศมีปล่อง (m)	รัศมีหลังคา (m)
โรงงานต้นแบบ	ใส	800	20	0.4	0.8	10
แบบจำลอง 1	สีชา	400	5	0.1	0.2	2.5
แบบจำลอง 2	ใส	800	5	0.2	0.4	1.768
แบบจำลอง 3	ใส	800	2.5	0.1	0.2	0.526
แบบจำลอง 4	ใส	800	10	0.4	0.8	5.946

ในที่นี้จะเห็นว่า มีเพียงแบบจำลอง 1 ที่มีความเหมือนทางรูปทรง(geometric similarity)กับโรงงานต้นแบบ ส่วนแบบจำลองที่ 2-4 ซึ่งกำหนดขนาดจากสมการที่ (10) นั้น เป็นแบบจำลองที่ย่อขนาดลงแบบบิดเบี้ยวไป(distorted model) ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ 2-4 น่าจะไม่มี ความเหมือนทางพลศาสตร์กับโรงงานต้นแบบ แต่ด้วยผู้วิจัยต้องการจะใช้กระจกใสเป็นวัสดุสำหรับหลังคารับแดดในการสร้างแบบจำลองขนาดเล็ก จึงได้พยายามหาความสัมพันธ์ที่จะได้ความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยในการกำหนดขนาดของแบบจำลองที่ 2-4 ด้วยสมการที่ (10) นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดจากแบบจำลองที่มีความเหมือนทางรูปทรงกับโรงงานต้นแบบไว้ก่อน และเนื่องจากผู้วิจัยเชื่อว่าค่าความสูงปล่องเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในกลุ่มตัวแปรขนาดของปล่องลมแดด จึงไม่เปลี่ยนค่านี้ แต่จะใช้สมการที่ (10) ในการปรับแก้ค่าอื่น ซึ่งขนาดของแบบจำลองที่มีความเหมือนทางรูปทรงกับโรงงานต้นแบบ ที่เป็นต้นแบบให้แบบจำลอง 2-4 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

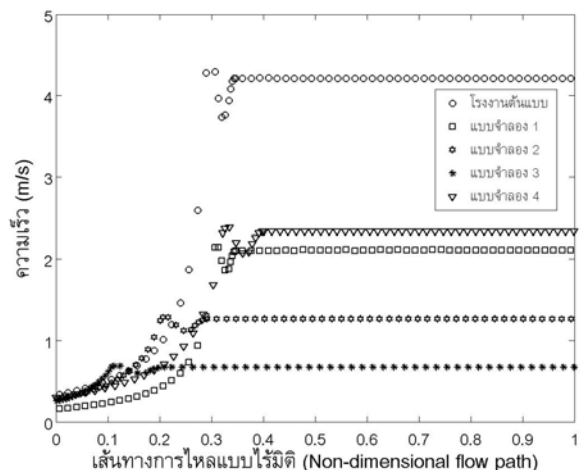
ตารางที่2 ข้อมูลต้นแบบของแบบจำลองที่ 2-4

กรณี	ความสูงปล่อง (m)	ความสูงหลังคา (m)	รัศมีปล่อง (m)	รัศมีหลังคา (m)	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรใต้หลังคารับแดด (%)
ต้นแบบของแบบจำลอง 2	5	0.1	0.2	2.5	4.482
ต้นแบบของแบบจำลอง 3	2.5	0.05	0.1	1.25	69.510
ต้นแบบของแบบจำลอง 4	10	0.2	0.4	5	179.5082

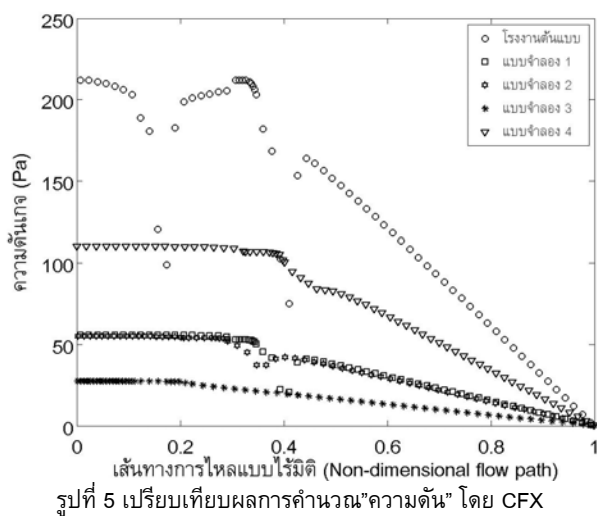
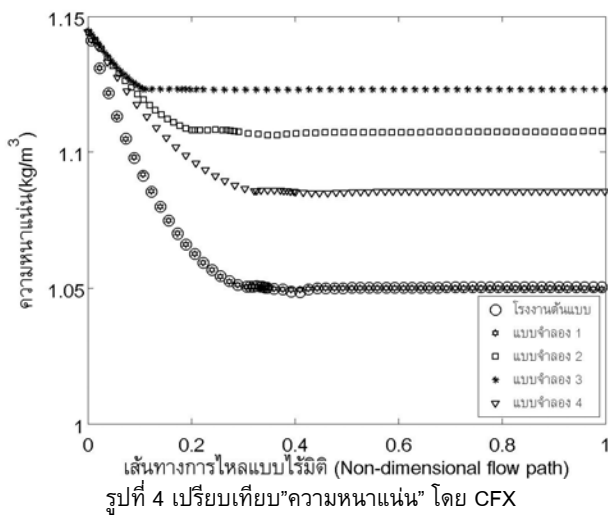
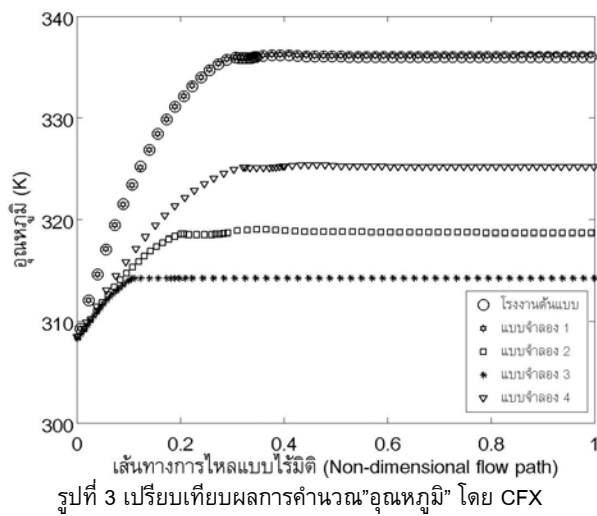
ในตารางที่ 2 นี้ “ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรใต้หลังคารับแดด” คำนวณจากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างปริมาตรใต้หลังคารับแดดของแบบจำลองนั้นๆกับปริมาตรใต้หลังคารับแดดของต้นแบบ เช่น สำหรับแบบจำลอง 2 ก็คำนวณจากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปริมาตรระหว่างแบบจำลอง 2 กับปริมาตรของต้นแบบของแบบจำลอง 2

3. ผลการคำนวณ

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFX คำนวณผลเฉลยเชิงตัวเลขของการไหลในปล่องลมแดดทั้งห้าตามตารางที่ 1 ได้ผลดังรูปที่ 2 - 5



รูปที่ 2 เปรียบเทียบผลการคำนวณ“ความเร็ว” โดย CFX



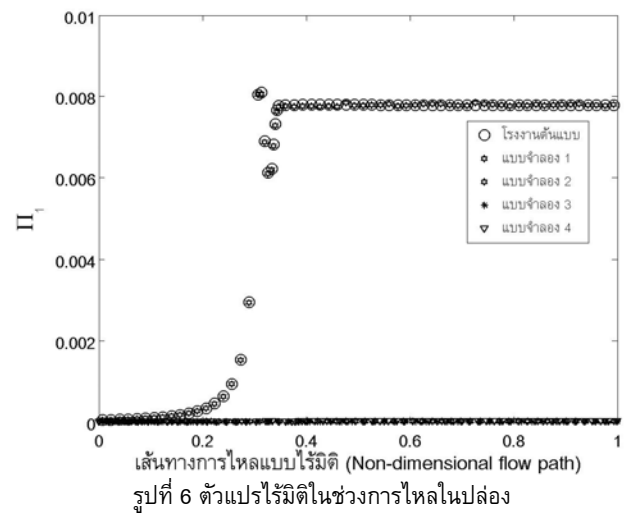
ในที่นี้ "เส้นทางการไหลแบบไร้มิติ" คือ ตัวแปรไร้มิตินำมาคำนวณจาก ระยะทางที่โมเลกุลอากาศเคลื่อนที่ไปหารด้วยขนาดของรัศมีหลังการรวม

กับความสูงปล่อง โดยค่า 0 จะเป็นตำแหน่งที่ขอบนอกสุดของหลังคา รับแดด และ 1 คือตำแหน่งบนสุดของปล่อง จะเห็นว่า ที่บริเวณใกล้ รอยต่อระหว่างหลังคา รับแดดกับปล่อง ค่าความเร็วและความดันที่คำนวณได้ของโรงงานต้นแบบและแบบจำลองทั้งหลาย จะมีการ กระโดด(overshoot)จากค่าที่ควรจะเป็นจริงเมื่อดูแนวโน้มจากค่าก่อนหน้าและหลังผ่านรอยต่อไปแล้ว พบว่าเป็นผลเนื่องจากการไหลแบบ หมุนวน(circulation)ที่เกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าว

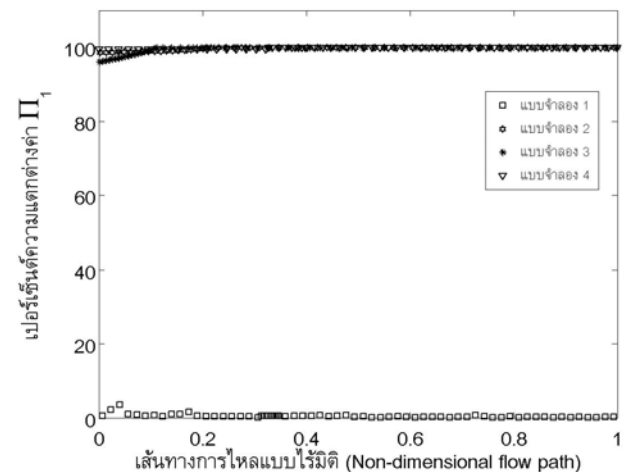
การศึกษาความเสมือนทางพลศาสตร์ของโรงงานต้นแบบกับแบบจำลอง

เมื่อนำผลที่ได้จาก CFX ไปคำนวณหาตัวแปรไร้มิติ $\frac{AV \frac{V^2}{2}}{V_r^2 (gh_c)^{\frac{3}{2}}}$

ตลอดเส้นทางการไหลในช่วงปล่องทั้งของโรงงานต้นแบบและแบบจำลองได้ผลดังรูป



ซึ่งสามารถแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของตัวแปรไร้มิติระหว่างแบบจำลองกับต้นแบบได้ดังรูป



ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ Π_1 ระหว่างโรงงานต้นแบบกับแบบจำลองต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 11 นั้น ได้นำมาหาค่าเฉลี่ยและแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่า Π_1 ระหว่างแบบจำลองกับโรงงานต้นแบบ ซึ่งคำนวณจากผลของโปรแกรม CFX

	แบบจำลอง 1	แบบจำลอง 2	แบบจำลอง 3	แบบจำลอง 4
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่า Π_1	0.469	99.58	99.25	99.72

สำหรับความแตกต่างขนาด 0.469 ระหว่างโรงงานต้นแบบกับแบบจำลอง 1 ซึ่งมีความเหมือนทางรูปทรงนั้น น่าจะเกิดจากความผิดพลาดเชิงตัวเลข เนื่องจากระบบกริดที่มีขนาดแตกต่างกันหรือจากการตัดทอนค่า(round-off error) เนื่องจากในแบบจำลองมีความสูงน้อย ทำให้ค่าความแตกต่างของความดัน, Δp น้อยมาก จึงได้รับผลกระทบจากการตัดทอนค่ามากกว่าระบบต้นแบบซึ่งมีขนาดใหญ่

ส่วนในแบบจำลองที่ 2-4 นั้นจะเห็นว่า ค่าความแตกต่างมีขนาดใหญ่ อาจเป็นเพราะ แบบจำลองที่ 2-4 ไม่มีความเหมือนทางรูปทรงกับโรงงานต้นแบบ จึงไม่มีความเหมือนทางพลศาสตร์กับโรงงานต้นแบบด้วย และจะเห็นว่า ค่าความแตกต่างของแบบจำลองที่ 2-4 นี้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่แบบจำลองที่ 2-4 ถูกกำหนดขนาดโดยสมการเดียวกันคือ สมการที่ (10)

4. สรุป

จากการศึกษาข้างต้น จะเห็นว่า ความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มิติสามารถใช้ในการออกแบบแบบจำลองขนาดเล็กที่ใช้วัสดุทำหลังคาปรับแดดที่แตกต่างจากโรงงานต้นแบบที่มีความเหมือนทางพลศาสตร์ระหว่างกันได้ แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่เหมาะสมนักที่จะนำมาใช้ในการออกแบบแบบจำลองที่ใช้วัสดุทำหลังคาที่เหมือนกันกับโรงงานต้นแบบ โดยงานวิจัยที่จะได้ทำในลำดับถัดไปจะเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ที่สามารถใช้ออกแบบแบบจำลองขนาดเล็กที่ใช้วัสดุทำหลังคาปรับแดดชนิดเดียวกับโรงงานต้นแบบได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ผู้สนับสนุนทุนวิจัย และศาสตราจารย์ ดร. Frank M. White ศาสตราจารย์กิตติคุณ(professor emeritus)แห่งมหาวิทยาลัย Rhode Island ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์มิติของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทวีช จิตรสมบูรณ์, "กลศาสตร์ของไหล", พิมพ์ครั้งที่ 1, ทอปป/แมคกรอ-ฮิล, ปี พ.ศ. 2546
- [2] Chitsomboon, T., "Numerical Simulation of Flow in Solar Chimney with Turbine," paper presented at the First Regional

Conference on Energy Towards a Clean Environment (RCETCE), Chiangmai, Thailand, Dec. 2000.

- [3] Chitsomboon, T. and Tongbai, P., "The Effect of Chimney-Top Convergence on Efficiency of a Solar Chimney," Proceedings of the 13th National Mechanical Engineering Conference, Vol. 1, pp. 263-268, Dec. 1999.

[4] Chitsomboon, T., "Potential and Efficiency of Solar Chimney in the Production of Electrical Energy," Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand, Vol.11, No.3, pp.38-44, 2000.

- [5] Chitsomboon, T., "A Validated Analytical Model for Flow in Solar Chimney," International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 3, No. 2, 2001.

[6] Chitsomboon, T., "Construction and Interpretation of Dimensionless Variables in a New Way," Proceedings of the 15th ME-NETT Conference, Vol. 1, pp. TF39-TF45, Nov. 2001.

- [7] Koonsrisuk, A. and Chitsomboon, T., "Dimensional Analysis for the Flow Through a Solar Chimney," Proceedings of the 17th ME-NETT Conference, 2003.

[8] Koonsrisuk, A. and Chitsomboon, T., "Dynamic Similarity in Model Testing of the Flow in Solar Chimney," Proceedings of the 15th International Symposium on Transport Phenomena, 2004.

- [9] Schlaich, J., "The Solar Chimney: Electricity from the Sun," Axel Menges, Stuttgart, 1995.