การศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์

A study of temperature distribution in commercial textile-oven

มงคลเทพ จันทร์กลัด[1*], ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง [2], สนธยา เพชรล้ำ [3]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
[1,2,3]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*E-mail: tss@kmitnb.ac.th[2]

Mongkoltep Junklud[1*], Thanakom Soontornchainacksaeng [2], Sonthaya Petlum[3]
[1,2,3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkarm Rd., Bangsue, Bangkok 10800
*E-mail: tss@kmitnb.ac.th[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์ขนาดความกว้าง 4.10 m ความยาว 10.45 m และความสูง 3.55 m โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Fluent 6.0 หลักการทำงานของตู้อบผ้าใช้ความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัวและไอร้อนยวดยิ่ง สามารถอบผ้าได้ 6 ถึง 60 m/min โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบใน 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่ง อบผ้าด้วยไอน้ำอิ่มตัวอุณหภูมิต่ำ 104 °C กรณีที่สอง ไอร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิสูง 180 °C ผลการจำลองแบบของระบบโดยเปรียบเทียบกับการทดลองเมื่อใช้ความเร็วในการกระจายความร้อนเท่ากับ 1.5 m/s ที่ระนาบบน (สูง 2.90 m), ระนาบกลาง(สูง 1.92 m) และระนาบล่าง(สูง 0.7 m) พบว่ามีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 4.94 %, 8.51 % และ 8.99 % ตามลำดับ

คำสำคัญ: การกระจายอุณหภูมิ, การจำลอง, การทดลอง, ไอน้ำอุณหภูมิต่ำ-สูง, ตู้อบ

Abstract

This research concerns a study of temperature distribution in commercial textile-oven. The inside dimension of the oven is 4.10 m in width, 10.45 m in length and 3.55 m in height with a total drying capacity of 6-60 m/min. By comparison the experiment and system simulation of the textile oven with the Fluent 6.0 computer program. The principle of the textile-oven is to generate heat by using saturated steam and superheated steam. The study and comparison can be classified into 2 cases. The first case is the use of low temperature saturated steam of 104 °C and the second case is the use of high temperature superheated steam of 180 °C. The results of simulation comparatively with experimented when the thermal distribution velocity is 1.5 m/s. It was found that the average temperature different is 4.94 % for top plane (2.9 m height), 8.51 % for middle plane (1.92 m height) and 8.99 % for bottom plane(0.7 m height), respective.

Keywords: Temperature Distribution, Simulation, Experiment, Low and high temperature steam, textile-oven

1. บทนำ

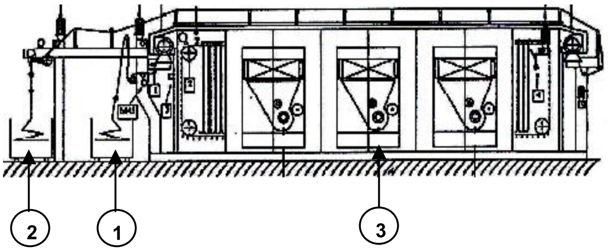
ในกระบวนการพิมพ์ผ้าเชิงพาณิชย์ มีขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญคือการอบผ้า ใช้เพื่ออบสีบนผ้าที่ผ่านขั้นตอนการพิมพ์แล้ว ให้ติดแน่นคงทนและมีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ในขั้นตอนนี้มีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณความร้อนภายในตู้อบผ้า ที่มักเป็นสาเหตุของปัญหาทางด้านคุณภาพ และการแข่งขันในตลาดสินค้าเพื่อการส่งออก ดังนั้นการศึกษาเพื่อพัฒนาศักยภาพของตู้อบผ้าจึงเป็นประเด็นที่สำคัญยิ่งต่ออุตสาหกรรมการพิมพ์ผ้า ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย ธนาคม สุนทรชัยนาคแสงและคณะฯ,2548 [1] ได้ทำการศึกษาและวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ตัวแปร จำลองแบบระบบและปรับปรุงตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์ โดยทำการศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิกับความเร็วในการอบที่มีผลต่อคุณภาพของผ้า ฤทธิชัย ตันจตุรงค์, ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง, 2548 [2] ได้ทำการศึกษาเรื่องการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมตู้อบเชิงพาณิชย์ด้วย PLC โดยทำการศึกษา การควบคุมความเร็วในการป้อนผ้าเข้าตู้อบที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่กำหนดตามชนิดของผ้า จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้าเป็นตัวแปรที่

สำคัญที่มีผลกระทบทั้งการติดแน่นและคุณภาพของสี คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้อบผ้า โดยการจำลองแบบและทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

2. ทฤษฎีและหลักการของตู้อบผ้า

2.1 การทำงานของตู้อบผ้า

ตู้อบผ้าที่ทำการศึกษาวิจัย เป็นตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์รุ่น MINIG BV สามารถอบผ้าได้ด้วยความเร็ว 6 ถึง 60 m/min มีขนาดความกว้าง 4.10 m ความยาว 10.45 m และความสูง 3.55 m ซึ่งมีลักษณะของตู้อบดังรูปที่ 1 [3],[4]



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์

หมายเลข 1 แสดงถึงผ้าที่ถูกดึงเข้าตู้อบ
หมายเลข 2 แสดงถึงผ้าที่ออกจากตู้อบหลังผ่านการอบ
หมายเลข 3 แสดงถึงชุดผลิตไอน้ำที่อยู่ภายในตู้อบ ซึ่งมีทั้งหมด 6 ชุด แบ่งเป็นด้านละ 3 ชุด

การทำงานของตู้อบผ้า เริ่มจากการที่ชุดดึงผ้าทำงานโดยใช้มอเตอร์หมุนขับลูกกลิ้งให้ดึงผ้าที่ต้องการอบเข้าตู้อบทางด้านซ้ายมือ เมื่อผ้าเข้าไปภายในตู้ จะเคลื่อนตัวด้วยชุดลูกกลิ้งและมอเตอร์ขับ จนผ้าออกจากตู้อบทางด้านหลังตู้แล้วจึงถูกดึงกลับมาทางด้านบนหลังคาตู้อบเพื่อนำไปสู่ภาชนะที่รองรับผ้าหลังจากผ่านการอบ โดยขณะที่ผ้าเคลื่อนที่อยู่ภายในตู้อบจะมีการถ่ายเทความร้อนและมวลของไอน้ำให้แก่ผ้า โดยในการอบสามารถใช้ได้ทั้งไอน้ำอิ่มตัวและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าแต่ละชนิด โดยความเร็วที่ใช้ในการแพร่กระจายความร้อนมีค่าเท่ากับ1.5 m/s โดยไอน้ำที่ใช้ภายในตู้อบจะถูกผลิตมาจากชุดผลิตไอน้ำที่ติดตั้งอยู่ภายในตู้อบ

2.2 สมการการไหลและการถ่ายเทความร้อน

การจำลองแบบการกระจายอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการสภาวะการปั่นป่วน[1],[8] โดยการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น แล้วคำนวณด้วยสมการทั้งหมด

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \bar{u}_i\right) = 0 \qquad (1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่น, $\bar{u}$ คือ ความเร็วเฉลี่ย

สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \overline{u_j u_i}\right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \rho \overline{u_i' u_j'}\right] - \rho g_i \beta\left(\bar{T} - \bar{T}_{ref}\right) \qquad (2)$$

โดยที่ $\overline{u'}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของการกระเพื่อม, $\bar{P}$ คือ ความดันเฉลี่ย, β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial \rho \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho \overline{u_i T}\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho \overline{u_j' T'}\right] \qquad (3)$$

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, μ คือ ตัวแปรของความหนืด, $\bar{T}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ย, $\overline{T'}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของการกระเพื่อม, $\bar{T}_{ref}$ คือ อุณหภูมิอ้างอิง

สมการในสภาวะการไหลปั่นป่วน (k - ε turbulence model)

k Equation:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + P + G + \rho\varepsilon \qquad (4)$$

ε Equation:

$$\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_1\frac{\varepsilon}{k}\left(P + C_3 G\right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (5)$$

โดยที่ P คือ เทอมของ Shear production, G คือ เทอมของ Buoyancy production และ $\rho\varepsilon$ คือ เทอมของ Destruction rate ซึ่ง P และ G สามารถหาได้จากสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$P = \mu_i \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial x_i}\right) \qquad (6)$$

$$G = g_i \beta \frac{\mu_i}{\partial_i}\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}\right) \qquad (7)$$

โดยที่ μ_i คือ turbulence viscosity ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (8)

$$\mu_i = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (8)$$

โดยโมเดล k - ε มีค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ คือ

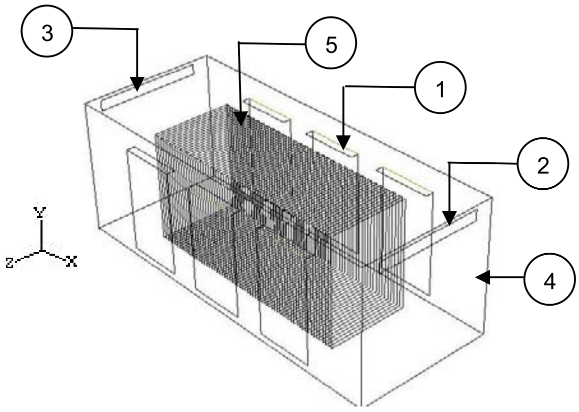
$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 1.0, \sigma_k = 1.0, \sigma_c = 1.217$$

3. การจำลองแบบระบบ

การพิจารณาศึกษาพฤติกรรมของความร้อนภายในตู้อบผ้าด้วยการจำลองแบบระบบมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อจำลองแบบการกระจายอุณหภูมิภายในระบบตู้อบผ้า
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้า
3. เพื่อนำผลการจำลองแบบเปรียบเทียบกับการทดลอง

โดยการจำลองแบบการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้า ได้นำโปรแกรม Fluent 6.0 มาช่วยในการคำนวณ โดยแบบจำลองของตู้อบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมจะมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของแบบจำลองตู้อบผ้า

จากรูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของตู้อบผ้าจากแบบจำลองได้ดังต่อไปนี้
หมายเลข 1 ช่องสำหรับปล่อยไอน้ำเข้าตู้อบผ้า ซึ่งมีทั้งหมด 6 ช่อง
หมายเลข 2 และ 3 ช่องสำหรับปล่อยไอน้ำออกจากตู้อบผ้า ซึ่งอยู่บริเวณด้านหน้าและท้ายตู้อบ
หมายเลข 4 ผนังตู้อบซึ่งมีทั้งหมด 6 ด้าน
หมายเลข 5 ปริมาณผ้าที่อยู่ภายในตู้อบ

การจำลองแบบใช้จำนวนกริดในการคำนวณทั้งหมดเท่ากับ221,602 เซลล์ โดยการคำนวณสมการทั้งหมดได้เลือกใช้วิธีการของ QUICK ซึ่งใช้กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE และการคำนวณภายใต้สภาวะไม่คงตัวเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลาใช้วิธี One order implicit [5],[8]

การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตและเริ่มต้นของแบบจำลองมีดังนี้

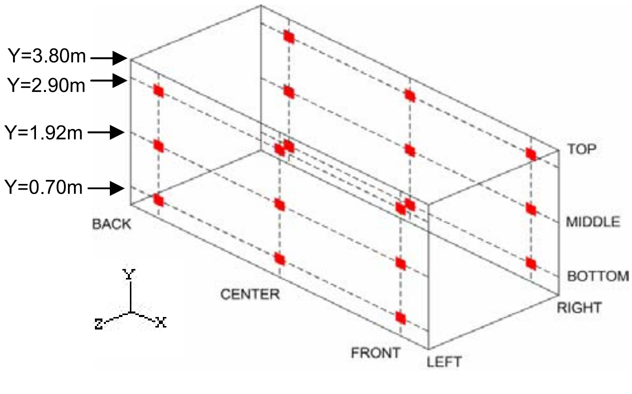
1. ความเร็วของการแพร่กระจายไอน้ำทั้ง 6 ช่องมีค่าเท่ากับ 1.5 m/s
2. กำหนดบริเวณทางออกของไอน้ำมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ
3. กำหนดค่าคุณสมบัติให้กับผนังของตู้อบทั้ง 6 ด้าน ซึ่งมีการป้องกันการถ่ายเทความร้อนโดยการหุ้มฉนวนด้วยใยแก้ว ที่มีค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 1
4. กำหนดให้ผ้าที่อยู่ภายในตู้อบมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 28°C และมีคุณสมบัติทางกายภาพของผ้าดังตารางที่ 1
5. กำหนดให้ไอน้ำภายในตู้อบ กรณีอบผ้าที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 104 °C และกรณีอบผ้าที่อุณหภูมิสูงมีค่าเท่ากับ 180 °C โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพของไอน้ำดังตารางที่1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	คุณสมบัติ		
	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg.K$)	สภาพการนำความร้อน ($W/m.K$)
ใยแก้ว	220	--	0.035
ผ้า	80	1300	0.06
ไอน้ำ	0.5542	2014	0.0261

4.ตำแหน่งและการติดตั้งอุปกรณ์วัด

การวัดค่าของอุณหภูมิเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์ โดยใช้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำการทดลอง คือ 1)ตัววัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor Thermocouple) แบบ K มีพิสัยอุณหภูมิสูงสุด – 270 ถึง 1370 °C ความผิดพลาด 0.4 % จำนวน 18 ตัว 2)เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) รุ่น DX100 ของ YOKOGAWA มีสัญญาณทางเข้าได้ 12 ช่อง จำนวน 2 เครื่อง โดยทำการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในตู้อบจำนวน 18 ตัว ซึ่งห่างจากผนังประมาณ 260 mm. ที่ระดับบน(TOP), กลาง(MIDDLE), ล่าง(BOTTOM) และบริเวณด้านหน้า(FRONT), กลาง(CENTER) และท้าย(BACK) ของตู้อบ ซึ่งสามารถแสดงตำแหน่งของการติดตั้งและวัดอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 3

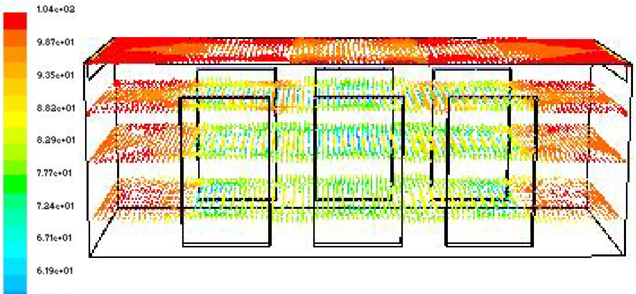


รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งและวัดอุณหภูมิ

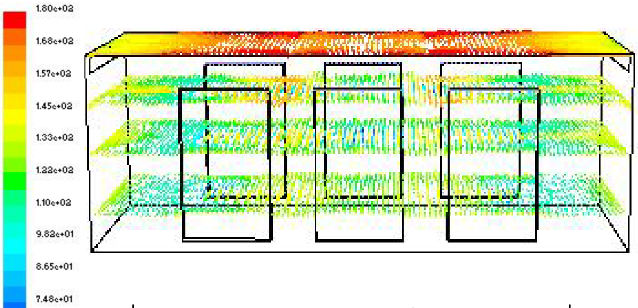
5. สรุปผลการจำลองแบบและเปรียบเทียบผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการจำลองแบบ

ผลการจำลองแบบที่ได้จากโปรแกรม Fluent 6.0 สามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบผ้าในลักษณะของระนาบ XZ ตามแนวแกนความสูงของตู้อบ (แกน Y) โดยแสดงตามระดับความสูงของตู้อบที่ Y = 3.84 m, Y = 2.9 m, Y = 1.92 m และ Y = 0.70 m จากการจำลองแบบสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4 และ 5 ในกรณีของการอบผ้าที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงตามลำดับ



รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบ กรณีอบผ้าที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 5 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบกรณีอบผ้าที่อุณหภูมิสูง

พิจารณาผลจากรูปที่ 4 และ 5 การกระจายอุณหภูมิที่ระดับความสูง Y = 3.84 m, Y=2.90 m, Y=1.92, Y=0.70 ในกรณีการอบผ้าที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 101.17 ^{o}C, 89.00 ^{o}C, 86.09 ^{o}C และ 86.01 ^{o}C ตามลำดับ โดยที่ระดับบนที่ Y = 3.84 m มีอุณหภูมิสูงที่สุดเนื่องจากไอน้ำที่ปล่อยเข้าตู้อบจะพุ่งเข้าชนบริเวณหลังคาด้านบนโดยตรง แล้วจึงแพร่กระจายความร้อนภายในตู้อบ ส่วนบริเวณในระดับอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิลดต่ำลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำกับผ้าที่นำเข้าไปอบ สำหรับการอบผ้าที่อุณหภูมิสูงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 162.09 ^{o}C, 124.30 ^{o}C, 117.08 ^{o}C และ 115.73 ^{o}C ตามลำดับ โดยจะมีพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิเหมือนกับในกรณีของการอบผ้าที่อุณหภูมิต่ำเพียงแต่มีระดับของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับการทดลอง

ในการทดลองมีการติดตั้งตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 3 ระดับ ประกอบด้วยที่ระดับความสูง Y = 2.9 m, Y = 1.92 m และY = 0.70 m จึงทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบได้จำนวน 3 ระดับดังกล่าว โดยผลการเปรียบเทียบพบว่ามีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันเฉลี่ยประมาณ 4.94 %, 8.51 % และ 8.99 % ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยตู้อบเชิงพาณิชย์ ซึ่งสำเร็จลุล่วงได้ ต้องขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา(สกอ.) กระทรวงศึกษาธิการ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนเชิงพาณิชย์ ขอขอบคุณ บริษัท เท็กซ์มาสเตอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณวิจัยบางส่วน รวมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่ บุคลากร ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องและตู้อบผ้า เพื่อทำการวิจัย รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและศูนย์วิจัยการคำนวณขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรม Fluent 6.0 เพื่อใช้ในการจำลองแบบของระบบ ตลอดจนท่านอื่นๆ ที่มิได้กล่าวนามในที่นี้ จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสงและคณะฯ, 2548. การวิเคราะห์ตัวแปรจำลองแบบระบบ และปรับปรุงตู้อบผ้าเชิงพาณิชย์. รายงานผลงานวิจัย โครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชน.

[2] ฤทธิชัย ตันจตุรงค์ และ ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง, 2548. การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมตู้อบเชิงพาณิชย์ด้วย PLC. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, หน้า 1145-1150.

[3] Ariol& c.srl, 1994. Steam Agers, Instruction Manual for MINI G.

[4] ARIOLI & c.srl, 1981. Steam now.

[5] Fluent incorporated, 1998. Fluent 6.0 User's Guide.

[6] Patanka, C.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, Washington,D.C.

[7] Stanley Middleman, 1998. An Introduction to mass and heat transfer. John Wiley & Sons, New York..

[8] Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., 1995. An introduction to computational fluid dynamics. John Wiley & Sons Inc, New York.

[9] Ferziger Joel H., and Milovan Peric, 1996. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, New York.