

บทที่ 5

การใช้เทคนิค CFD ในการจำลองลักษณะการไหลของลมร้อนในตู้อบ

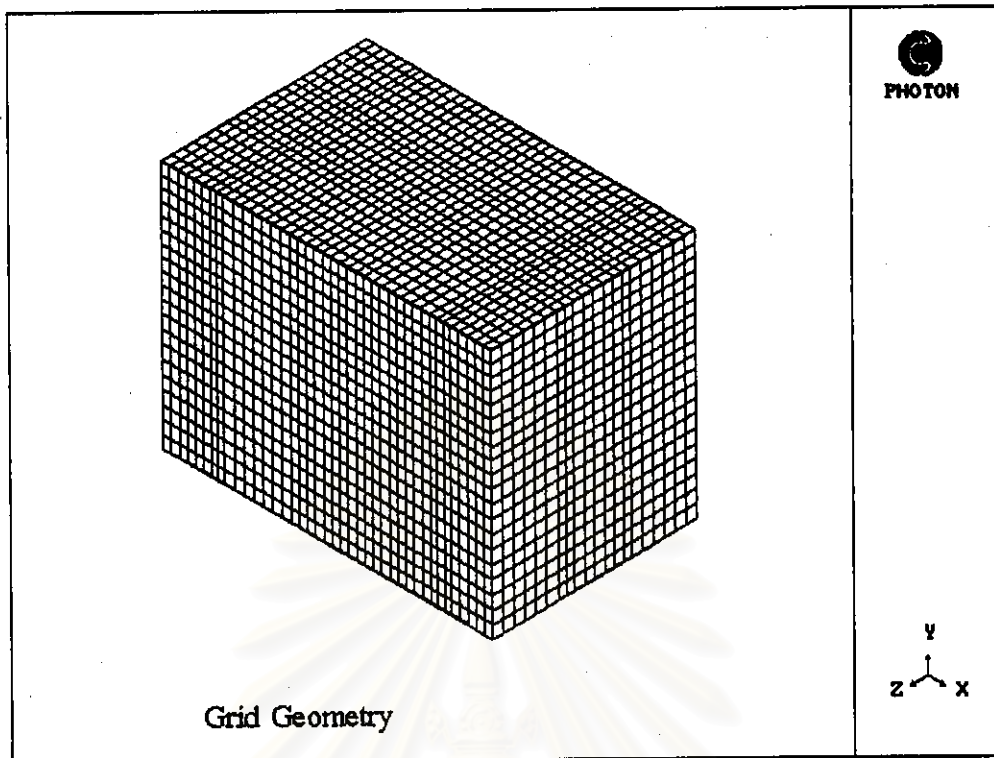
จากความยุ่งยากในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างปริมาณชิ้นงานที่ต้องการอบในตู้อบ กับโครงสร้างภายในและความเร็วลมที่เหมาะสม จึงได้เสนอวิธีการอย่างง่าย ๆ และรวดเร็ว ซึ่งสามารถใช้ในการพยากรณ์แนวโน้มของลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในตู้อบได้อย่างดี อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการทดลองที่ต้องทำเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าว

ในการศึกษานี้ได้ทดลองใช้โปรแกรม PHOENICS 2.1 ซึ่งใช้หลักการของ CFD มาทำการจำลองลักษณะการไหลของลมร้อนในตู้อบ โดยเลือกกรณีของการทดลองในบทที่ 3 ที่เป็นตู้อบที่มีแหล่งให้ความร้อนย่อยอยู่ภายในห้องอบ เนื่องจากเป็นกรณีใกล้เคียงการทำงานจริงในโรงงานผลิตเลนส์แว่นตามากที่สุด และแบ่งชุดการจำลองออกเป็นสองชุดดังนี้ ชุดแรกประกอบด้วยกรณีที่ 8 และ 9 ซึ่งเป็นกรณีที่มีแผ่นเหล็กกันแบ่งตู้อบออกเป็นสองชั้น และมีแหล่งให้ความร้อนย่อยเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์วางอยู่ชั้นละสี่ดวง มีลมร้อนเข้าตู้อบที่อัตราการไหล $0.48 \text{ เมตร}^3/\text{วินาที}$ และ $0.80 \text{ เมตร}^3/\text{วินาที}$ ตามลำดับ ส่วนชุดที่สองประกอบด้วยกรณีที่ 11 และ 12 ซึ่งเป็นกรณีที่มีแผ่นเหล็กกันแบ่งตู้อบออกเป็นสี่ชั้น และมีแหล่งให้ความร้อนย่อยเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์วางอยู่ชั้นละสี่ดวงและปล่อยลมร้อนเข้าสู่ตู้อบที่อัตราการไหล $0.48 \text{ เมตร}^3/\text{วินาที}$ และ $0.80 \text{ เมตร}^3/\text{วินาที}$ ตามลำดับ แล้วจึงนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อดูความเป็นไปได้ในการนำเทคนิค CFD มาพยากรณ์แนวโน้มของลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในตู้อบเพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป

ขอบเขตของการจำลอง

ขอบเขตของการศึกษาทั้งสี่กรณีจะอยู่เฉพาะส่วนของห้องอบและช่องว่างด้านข้าง โดยมีการแบ่งจำนวนกริดในบริเวณที่ทำการศึกษาของทั้งสี่กรณีในลักษณะเดียวกันคือ แบ่งตามแกน X เป็น 40 กริด ตามแกน Y เป็น 20 กริด และตามแกน Z เป็น 20 กริด ดังรายละเอียดในรูปที่ 5-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-1 แสดงรายละเอียดกริดของการจำลอง

สมการที่ใช้ในการจำลอง

ปรากฏการณ์ไหลของลมร้อนในตู้อบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยชุดของสมการอนุพันธ์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในสามมิติตามแกน X, Y, Z โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ลมร้อนมีลักษณะการไหลแบบของไหลนิวโตเนียน
2. การทดลองดำเนินไปที่สถานะคงที่ (Steady state)
3. ความหนาแน่น (ρ) ของลมร้อนมีค่าคงที่
4. ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนสมการอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\phi, \text{eff}} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_{\phi} \quad (5-1)$$

โดยมีรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1

รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในชุดสมการอนุพันธ์

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$
h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	0
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon + G_B$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_B)(1 + C_3 R_f) - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}$

ในสมการโมเมนต์สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงลัทธิ Γ_ϕ คือค่าความหนืดลัทธิ μ_{eff} ซึ่งเป็นผลบวกของค่าความหนืดหมุนวน (Eddy viscosity), μ_t และค่าความหนืดของการไหลแบบราบเรียบ μ

$$\Gamma_\phi = \mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (5-2)$$

ส่วนสมการอื่นอันได้แก่ สมการอนุพันธ์พลังงาน, สมการ k และสมการ ϵ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงลัทธิ Γ_ϕ คือสัมประสิทธิ์ความหนืดลัทธิซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\Gamma_\phi = \frac{\mu}{\sigma_\phi} + \frac{\mu}{\sigma_{\phi,t}} \quad (5-3)$$

โดยที่ σ_ϕ และ $\sigma_{\phi,t}$ คืออัตราส่วนสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวมักจะได้จากการทดลอง

ในแบบจำลอง k-ε ค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนแสดงได้โดย

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5-4)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ใน S_ϕ สำหรับสมการ k-ε เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง และที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงๆ ค่าเหล่านี้จะมีค่าคงที่ ซึ่ง Launder และ Spalding [1972] ได้แสดงไว้ดังนี้

$$\begin{array}{llll} C_1 = 1.44 & C_2 = 1.93 & C_\mu = 0.09 & C_D = 1.0 \\ \sigma_k = 1.0 & \sigma_\varepsilon = 1.0 & \sigma_l = 1.0 & \end{array}$$

ฟังก์ชันผนัง

ในบริเวณใกล้กับพื้นผิวแข็ง, ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงสมบัติการไหลจะสูง, และจะต้องใช้สมการพิเศษเพื่ออธิบายสมบัติการไหล ซึ่งวิธีการฟังก์ชันผนังเป็นวิธีการที่มีการใช้กันมากที่สุด

ฟังก์ชันผนังอยู่บนพื้นฐานของสมการชั้นขอบเขตมิติเดียวที่สภาวะคงที่ และสมมติฐานของระยะผสม (Mixing-length) หลักการของฟังก์ชันผนังก็คือการปรับปรุงเทอมแหล่งกำเนิดในสมการอนุรักษ์สำหรับกริด-เน็ตที่บริเวณใกล้พื้นผิวโดยการใช้โมเมนต์พลักซ์เนื่องจากความเค้นเฉือนและพลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวของแข็ง

ฟังก์ชันผนังที่ใช้คือ

$$u^+ = \frac{\ln(EY^+)}{k} \quad (5-5)$$

และ

$$T^+ = \sigma_l (u^+ + P) \quad (5-6)$$

โดยที่ k คือค่าคงที่ของวอนคาร์มัน ($K=0.435$) E คือสัมประสิทธิ์การหักเหเนื่องจากความขรุขระของผนัง สำหรับผนังเรียบ, ค่าตามทฤษฎีของ E คือ 9.0 ส่วน P สามารถหาได้จากการทดลองหรือประเมินตามทฤษฎี, ซึ่งทำให้ได้ (Launder และ Spalding, 1972) :

$$P = \frac{\pi}{4 \sin(\pi/4)} \left(\frac{A}{k}\right)^{1/2} \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_{h,l}} - 1\right) \left(\frac{\sigma_{h,l}}{\sigma_h}\right)^{1/4} \quad (5-7)$$

ฟังก์ชันของโมเมนต์และความร้อนที่พื้นผิวแข็งถูกกำหนดโดยสมการที่ (5-5) และ (5-6) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น (Lauder และ Spalding, 1972) :

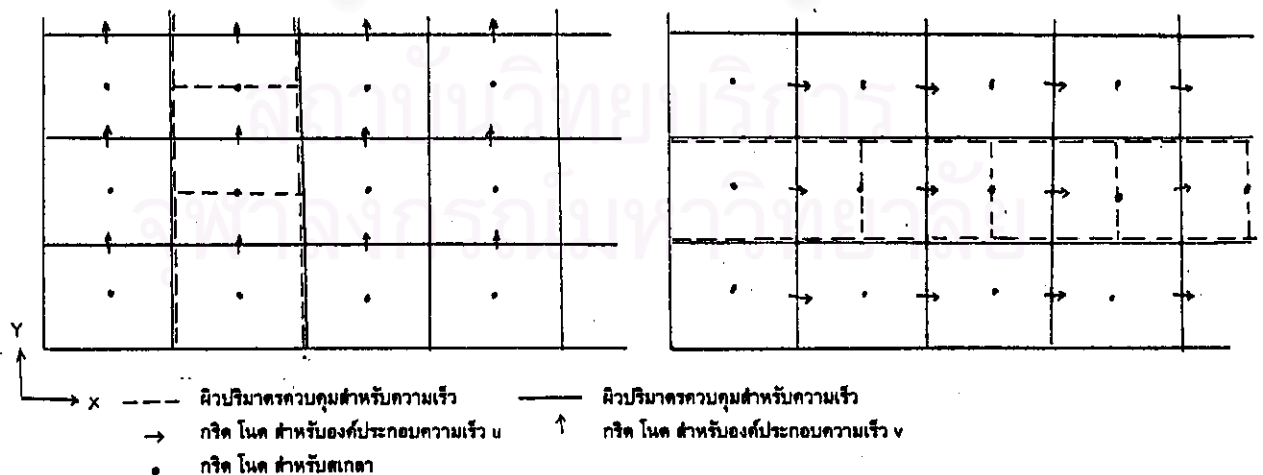
$$\frac{u_p}{\tau_s / \rho} C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} = \frac{1}{k} \ln \left[EY_p \frac{(C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] \quad (5-8)$$

$$\frac{(T_p - T_s) C_p \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{q_s} = \frac{\sigma_{h,t}}{k} \ln \left[EY_p \frac{(C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] + \sigma_{h,t} \frac{\pi}{4 \sin(\pi/4)} \left(\frac{A}{k} \right)^{1/2} \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_{h,t}} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_{h,t}}{\sigma_h} \right)^{1/4} \quad (5-9)$$

อย่างไรก็ตาม, ฟังก์ชันผนังนี้จะใช้ได้เมื่อกริด-โนดที่บริเวณใกล้ผนังจะต้องอยู่ห่างจากผนังมากเพียงพอที่จะให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ $(K^{1/2} 1/\nu)_p$, มีค่ามากกว่า 1 มากๆ และผลจากความหนืดเกือบทั้งหมดจะมาจากความหนืดจากการไหลแบบปั่นป่วน

การคำนวณเชิงตัวเลข

แบบจำลองระบบตาข่ายสามมิติตามแกนมุมฉากในปริมาตรจำกัดในทิศทาง X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-2 แสดงโครงสร้างของระบบตาข่ายสามมิติตามแกนมุมฉาก

ในการคำนวณจะใช้สมมติฐานว่าตัวแปรในปริมาตรควบคุมแต่ละส่วนมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการต่อไปนี้ในการหาค่าจากการอินทิเกรตในแต่ละปริมาตรควบคุมได้

$$\phi_p = \frac{a_w \phi_w + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b}{a_p} \quad (5-10)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y \Delta z + a_p^0 \phi_p^0 \quad (5-11)$$

$$a_p = a_w + a_E + a_N + a_S + a_T + a_B + a_p^0 - S_p \Delta X \Delta Y \Delta Z \quad (5-12)$$

$$a_p^0 = \rho_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (5-13)$$

ผลการจำลอง

จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม Phoenix 2.1 พบว่าได้ผลดังตารางที่ 5-2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 5-2

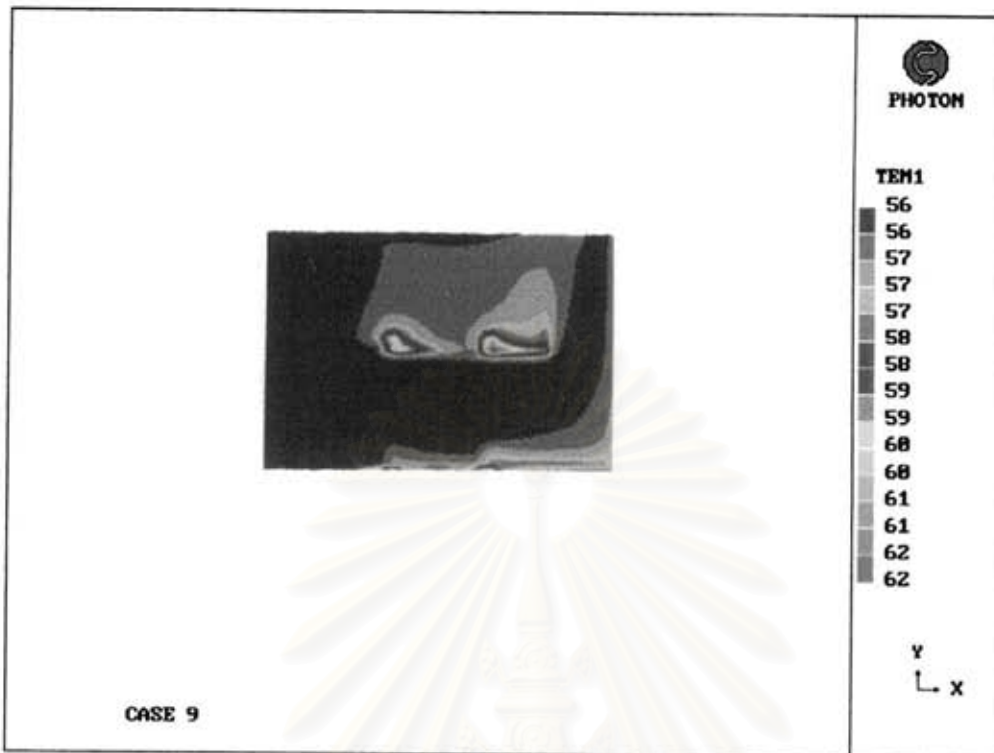
ผลการจำลองในกรณีที่ 8, 9, 11 และ 12

ตำแหน่ง	กรณีที่ 8	กรณีที่ 9	กรณีที่ 11	กรณีที่ 12
1	55.75	55.63	62.00	59.66
2	55.77	55.61	58.09	56.53
3	55.56	55.59	58.15	57.68
4	63.12	59.64	69.14	59.76
5	55.85	55.62	73.28	60.14
6	57.21	56.19	60.90	58.42
7	56.98	56.12	64.89	59.35
8	55.81	55.63	59.97	58.08
9	59.16	56.91	68.32	59.60
10	67.28	58.99	70.86	66.11
11	57.41	56.34	66.92	60.00
12	55.81	55.62	62.02	59.68
13	57.26	56.44	60.67	57.30
14	59.50	56.81	63.28	64.23
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	3.38	1.28	4.82	2.57
พิสัย (Range)	11.72	4.05	15.19	9.58

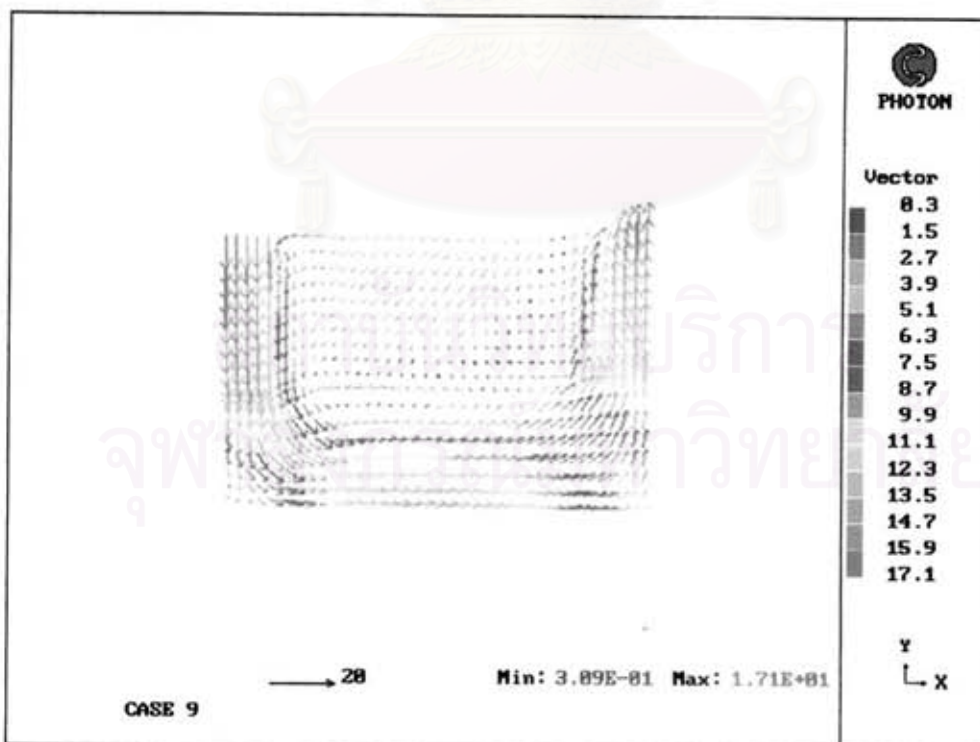
จากผลจากการจำลองพบว่าทั้งในกรณี 8, 9, 11 และ 12 จะมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกัน คือบริเวณตอนล่างของห้องอบ เช่น ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 8, และ 12 จะมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยต่ำกว่าที่บริเวณตอนบน เช่นตำแหน่งที่ 4, 9, 10 และ 14 ดังรูปที่ 5-3 ก. และ 5-5 ก. ซึ่งเนื่องมาจากทิศทางการไหลของลมร้อนเข้าสู่ตู้อบมีทิศทางการไหลจากทางเข้าลงไปสู่ตอนล่างของตู้อบก่อนแล้วจึงหักเหเข้าสู่ห้องอบต่อไป ดังนั้นความเร็วของลมที่บริเวณตอนล่างๆ ของตู้อบจะสูงกว่าตอนบน ซึ่งที่บริเวณตอนบนของส่วนห้องอบมีลักษณะการไหลของลมร้อนเป็นแบบหมุนวน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะสะสมอยู่ที่บริเวณตอนบนของตู้อบ ในขณะที่ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณตอนล่างของตู้อบจะถูกลมร้อนพัดพาออกไปอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 5-3 ข. และ 5-5 ข. ในขณะที่การกระจายตัวของอุณหภูมิที่บริเวณชั้นเดียวกันจะมีความแตกต่างกันไม่มากนักดังรูปที่ 5-4 ก. และ 5-6 ก. ซึ่งเนื่องมาจากลักษณะการไหลของลมร้อนในบริเวณชั้นเดียวกันจะมีความเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 5-4 ข. และ 5-6 ข.



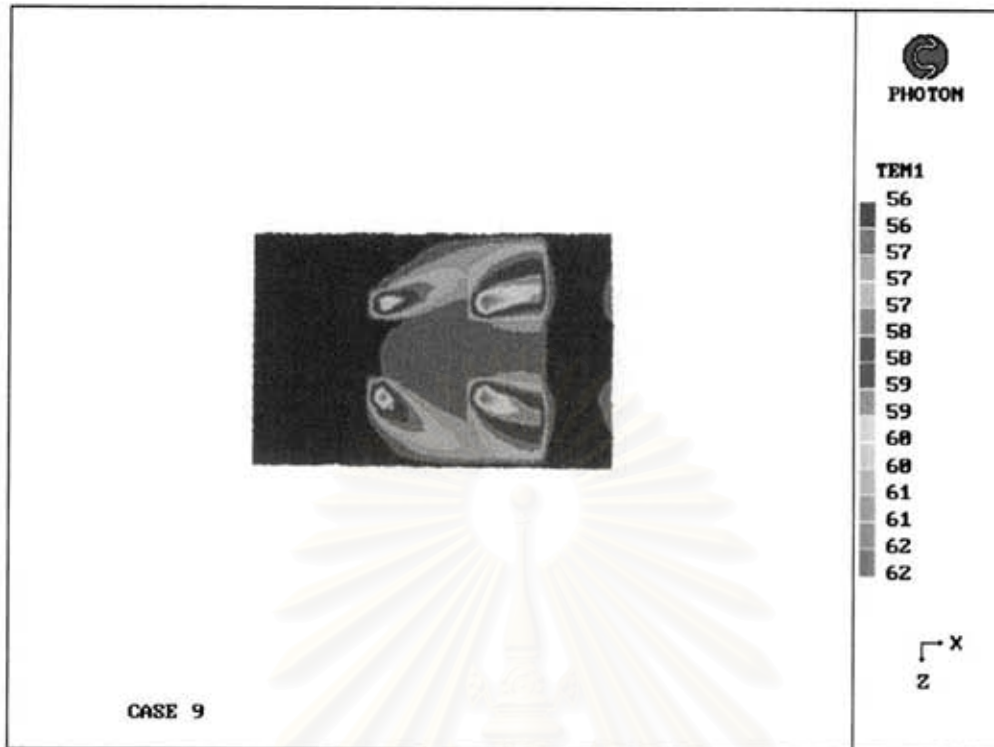
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



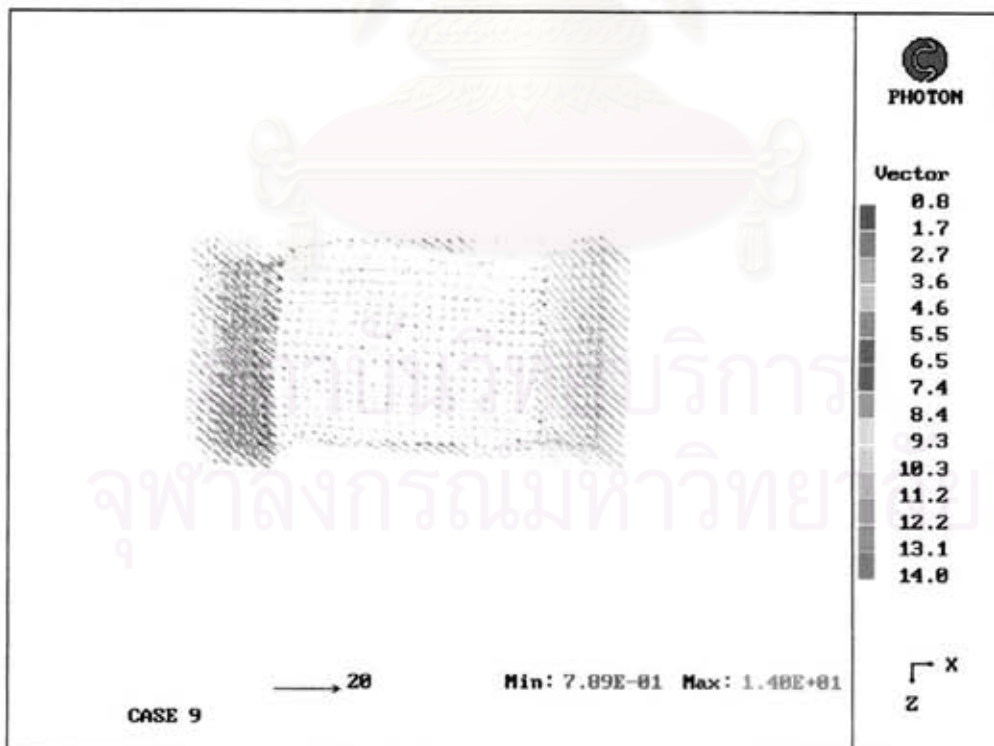
รูปที่ 5-3 ก. แสดงมุมมองด้านหน้าของการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 9



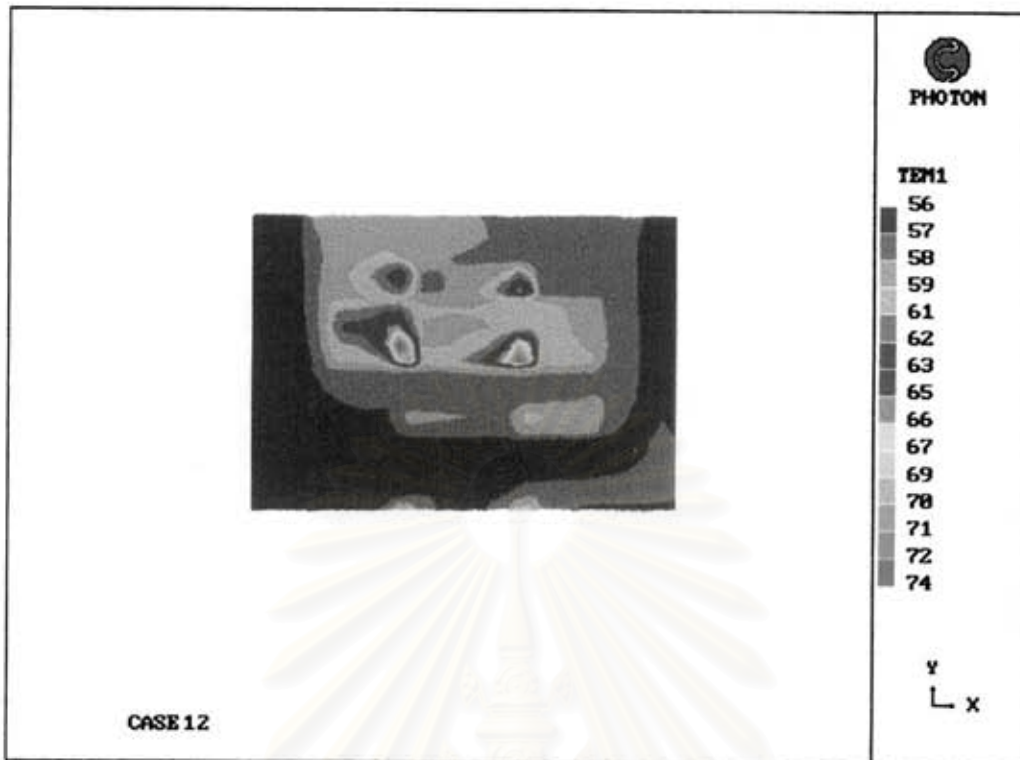
รูปที่ 5-3 ข. แสดงมุมมองด้านหน้าของการกระจายตัวของความเร็วของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 9



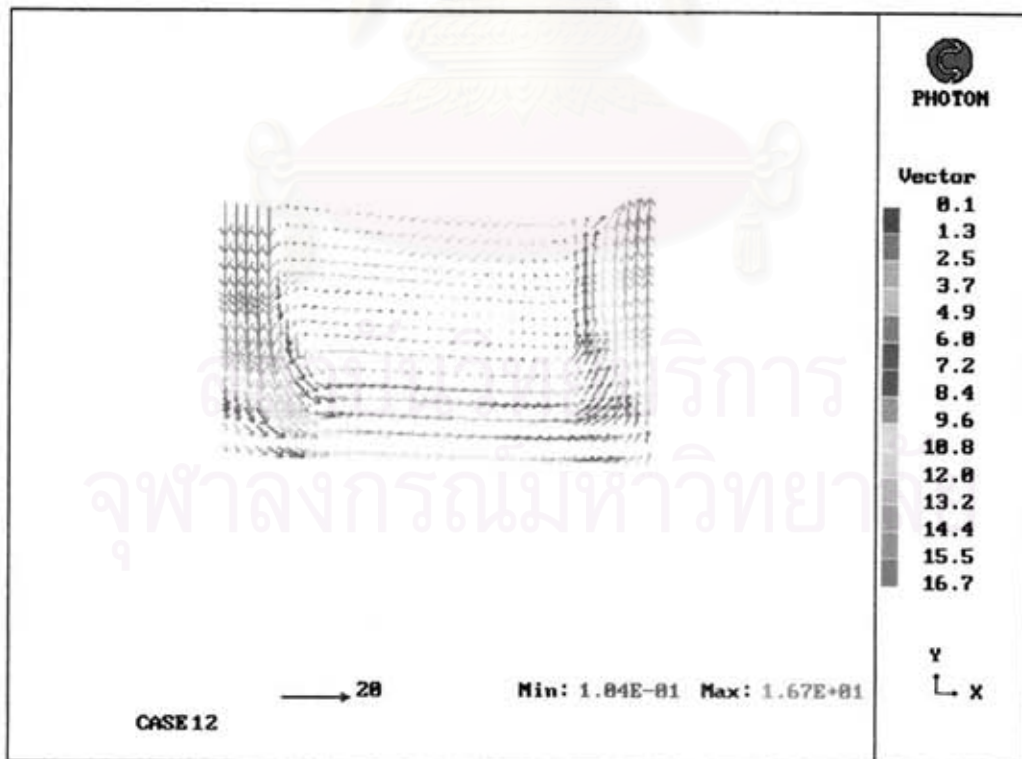
รูปที่ 5-4 ก. แสดงมุมมองด้านบนของการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 9



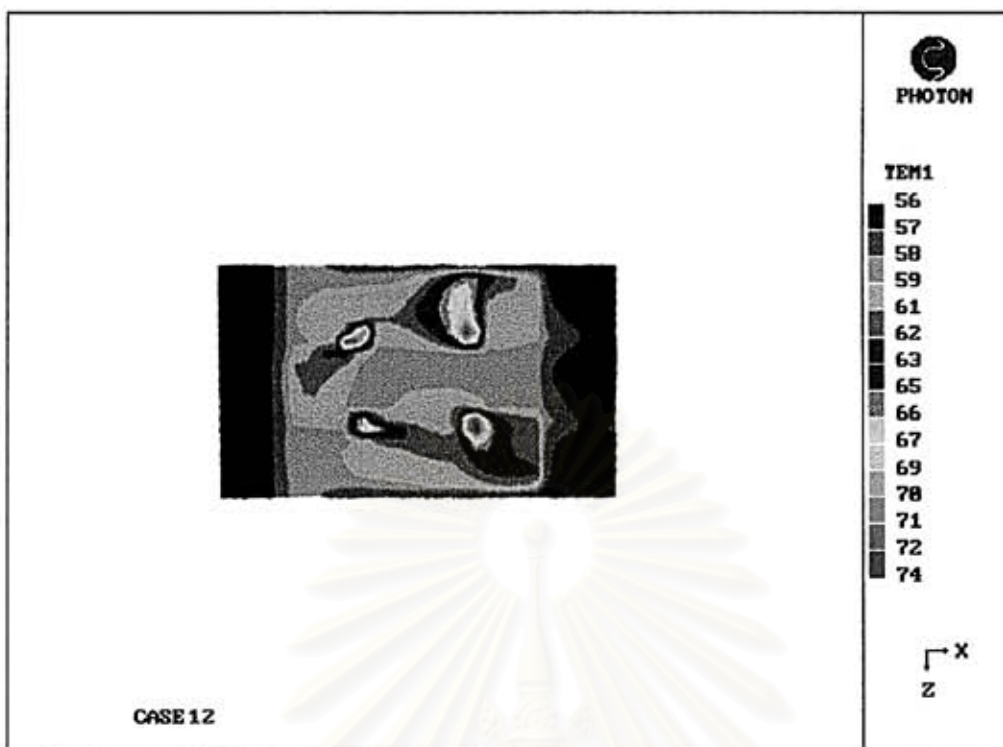
รูปที่ 5-4 ข. แสดงมุมมองด้านบนของการกระจายตัวของความเร็วของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 9



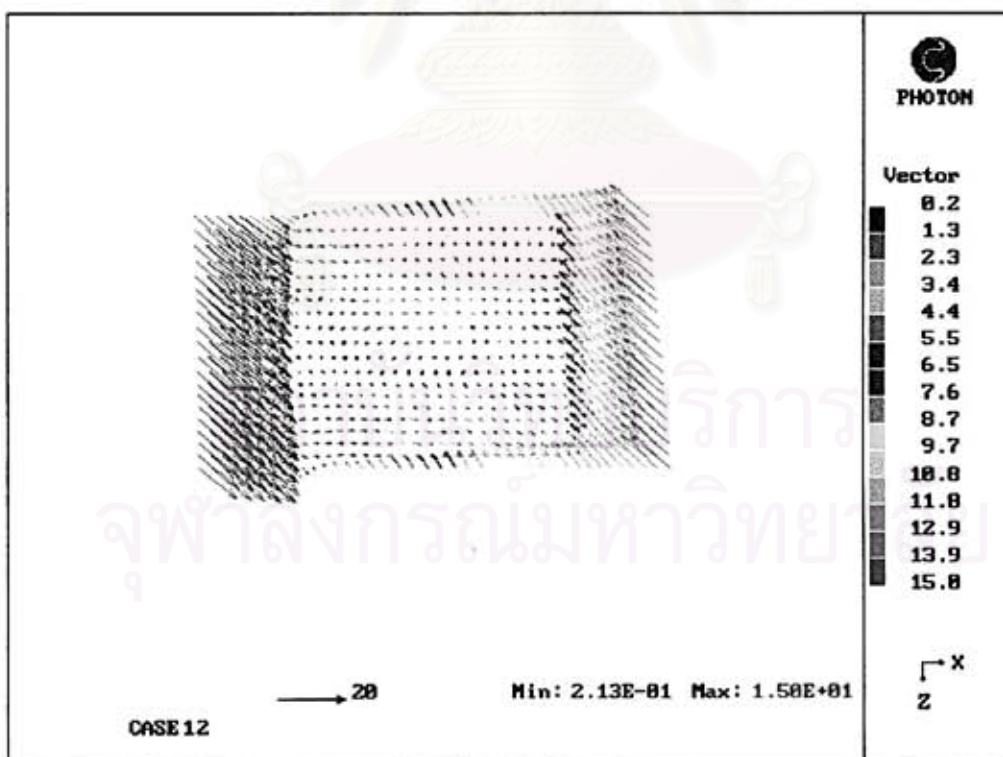
รูปที่ 5-5 ก. แสดงมุมมองด้านหน้าของการกระจายตัวของจุดหนีของลมร้อนในตู้อบกรณีนี้ที่ 12



รูปที่ 5-5 ข. แสดงมุมมองด้านหน้าของการกระจายตัวของความเร็วของลมร้อนในตู้อบกรณีนี้ที่ 12



รูปที่ 5-6 ก. แสดงมุมมองด้านบนของการกระจายตัวของอุณหภูมิของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 12



รูปที่ 5-6 ข. แสดงมุมมองด้านบนของการกระจายตัวของความเร็วของลมร้อนในตู้อบกรณีที่ 12

การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลอง

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง จึงได้ทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากสมการ 5-14 ต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (\%)} = \frac{(T_E - T_S) \times 100}{T_E} \quad (5-14)$$

โดยที่ T_E คือค่าอุณหภูมิจากการทดลอง (องศาเซลเซียส) และ T_S คือค่าอุณหภูมิจากการจำลอง (องศาเซลเซียส)

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองในกรณีที่ 8 และ 9 พบว่ามีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเพียง 18.22 เปอร์เซ็นต์ ในทำนองเดียวกันการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองในกรณีที่ 11 และ 12 ก็มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วงไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเพียง 22.74 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-3

การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองในกรณีที่ 8 และ 9

ตำแหน่ง	กรณีที่ 8			กรณีที่ 9		
	ทดลอง	จำลอง	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)	ทดลอง	จำลอง	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
1	57.77	55.75	3.50	57.20	55.63	2.74
2	57.83	55.77	3.56	57.50	55.61	3.29
3	55.83	55.56	0.48	56.33	55.59	1.31
4	64.00	63.12	1.38	62.10	59.64	3.96
5	57.93	55.85	3.59	59.77	55.62	6.94
6	55.40	57.21	-3.27	57.47	56.19	2.23
7	55.47	56.98	-2.72	57.07	56.12	1.66
8	59.63	55.81	6.41	59.13	55.63	5.92
9	68.13	59.16	13.17	64.27	56.91	11.45
10	71.97	67.28	6.52	72.13	58.99	18.22
11	56.70	57.41	-1.25	57.37	56.34	1.80
12	58.20	55.81	4.11	57.90	55.62	3.94
13	57.20	57.26	-0.10	57.80	56.44	2.35
14	65.63	59.50	9.34	63.93	56.81	11.14

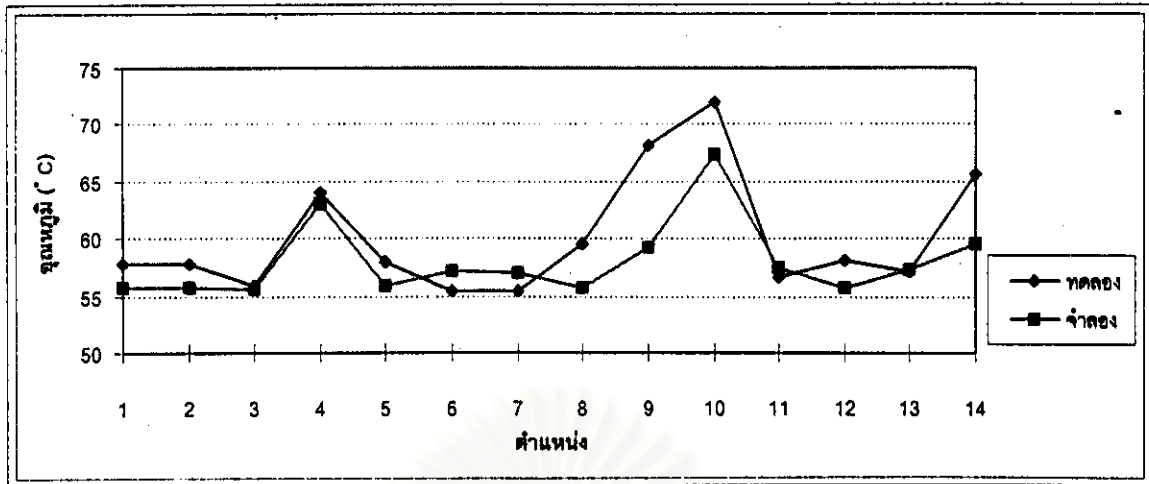
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-4

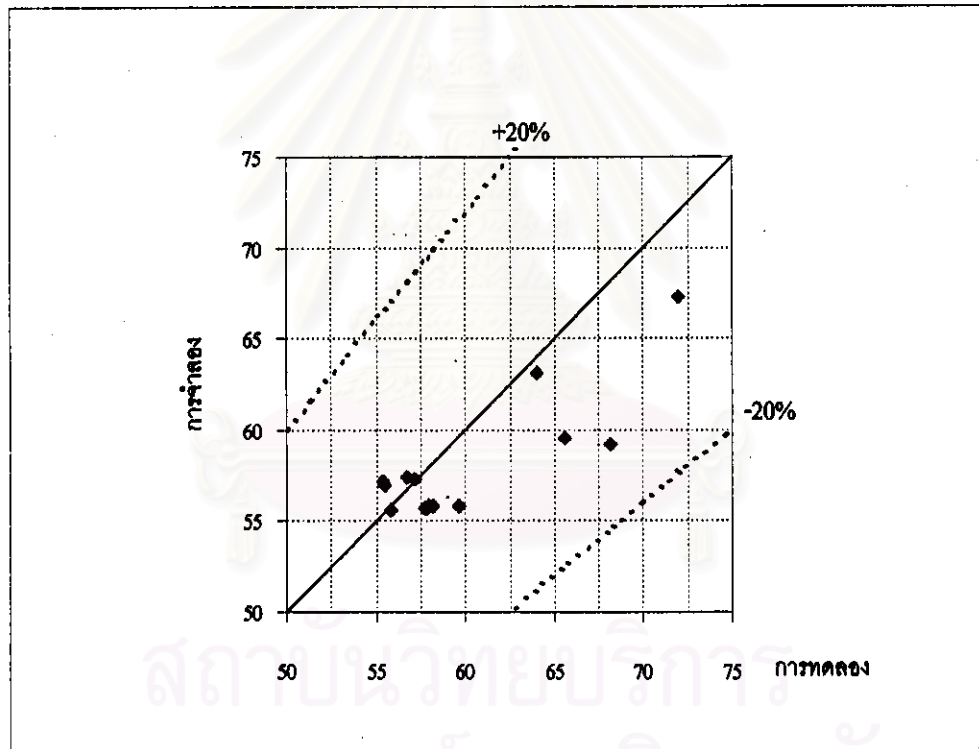
การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองในกรณีที่ 11 และ 12

ตำแหน่ง	กรณีที่ 11			กรณีที่ 12		
	ทดลอง	จำลอง	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)	ทดลอง	จำลอง	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
1	67.50	62.00	8.15	63.70	59.66	6.34
2	66.80	58.09	13.04	64.47	56.53	12.32
3	64.47	58.15	9.80	61.67	57.68	6.47
4	77.83	69.14	11.17	73.07	59.76	18.22
5	80.20	73.28	8.63	74.77	60.14	19.57
6	73.57	60.90	17.22	68.70	58.42	14.96
7	74.23	64.89	12.58	68.80	59.35	13.74
8	77.73	59.97	22.85	72.67	58.08	20.08
9	81.67	68.32	16.35	76.77	59.60	22.37
10	89.33	70.86	20.68	84.50	66.11	21.76
11	75.73	66.92	11.63	70.13	60.00	14.44
12	75.60	62.02	17.96	72.03	59.68	17.15
13	74.30	60.67	18.34	72.30	57.30	20.75
14	81.90	63.28	22.74	77.47	64.23	17.09

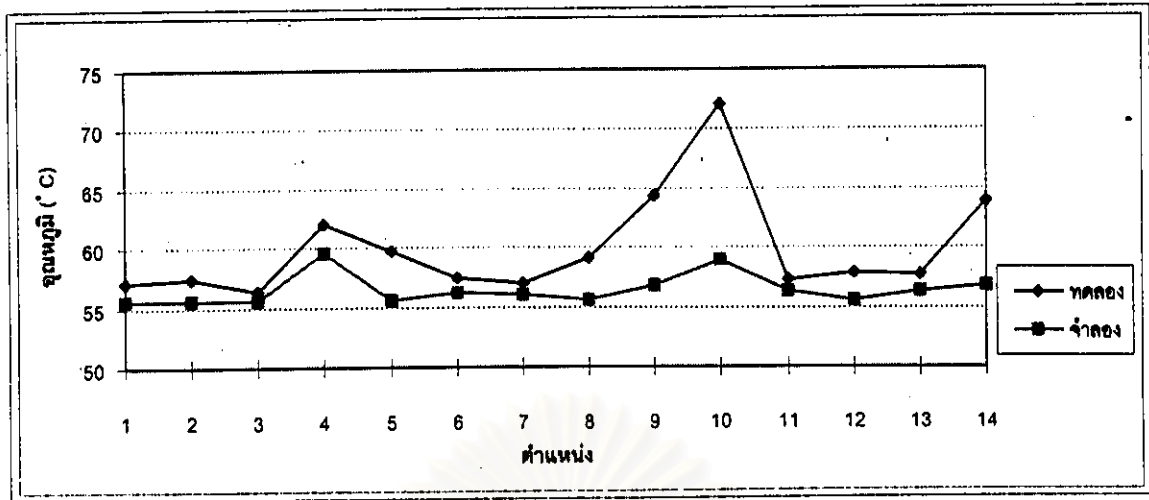
เมื่อพิจารณารูปภาพเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองในแต่ละกรณี พบว่าแม้ค่าที่ได้จากการจำลองจะต่างจากการทดลอง แต่ผลการจำลองก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง จึงเป็นไปได้ที่จะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ หรือปรับปรุงตู้อบเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น



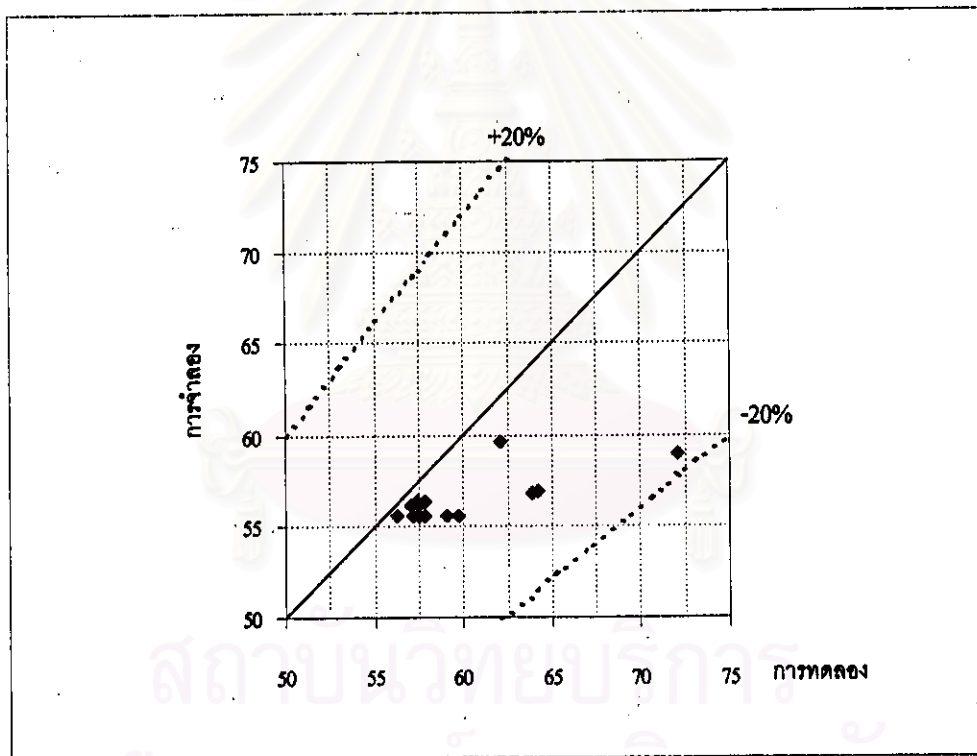
รูปที่ 5-7 ก. การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกรณีที่ 8 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง



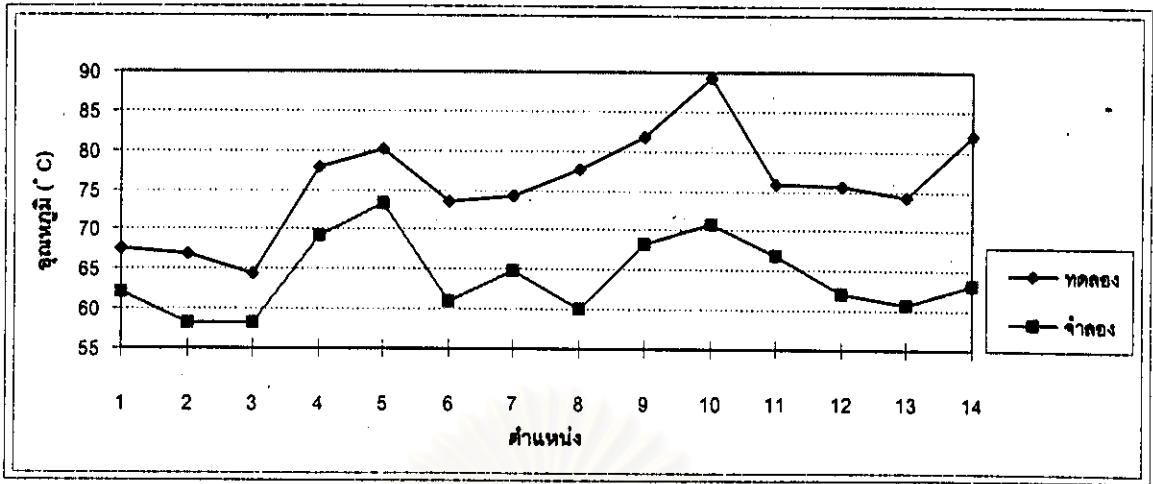
รูปที่ 5-7 ข. แสดงความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองในกรณีที่ 8



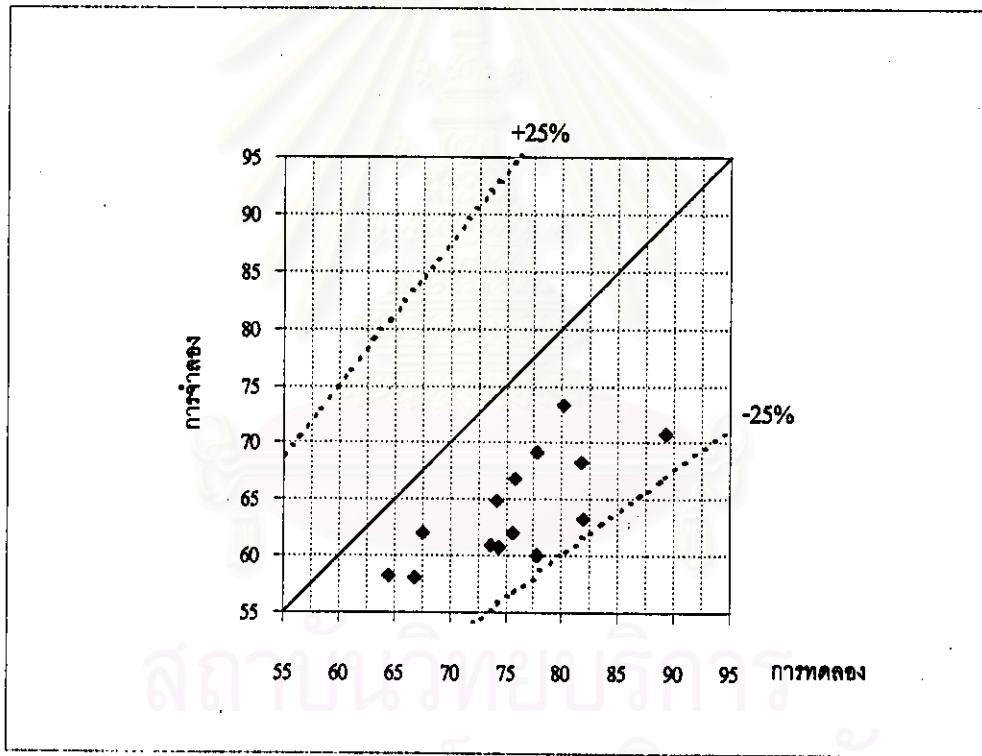
รูปที่ 5-8 ก. การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกรณีที่ 9 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง



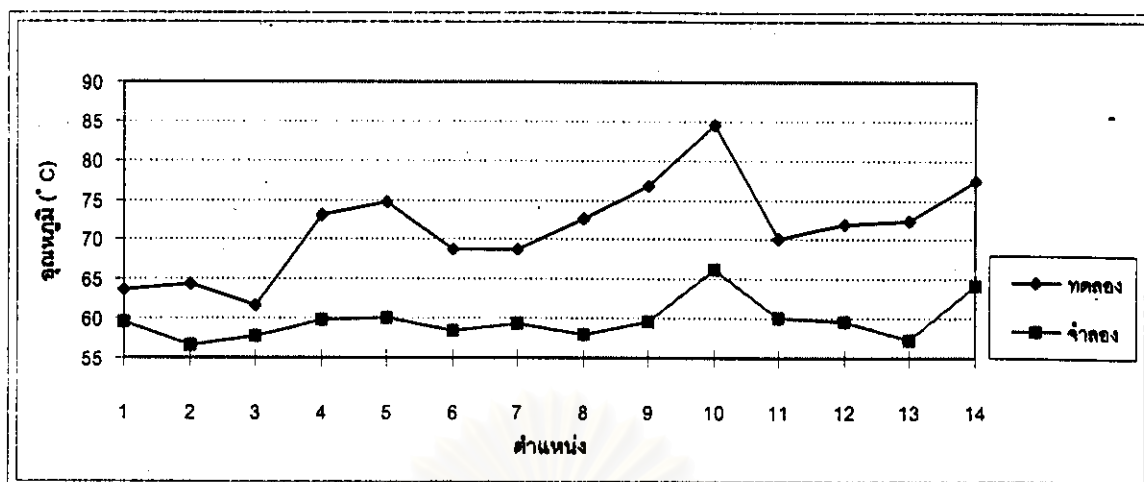
รูปที่ 5-8 ข. แสดงความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองในกรณีที่ 9



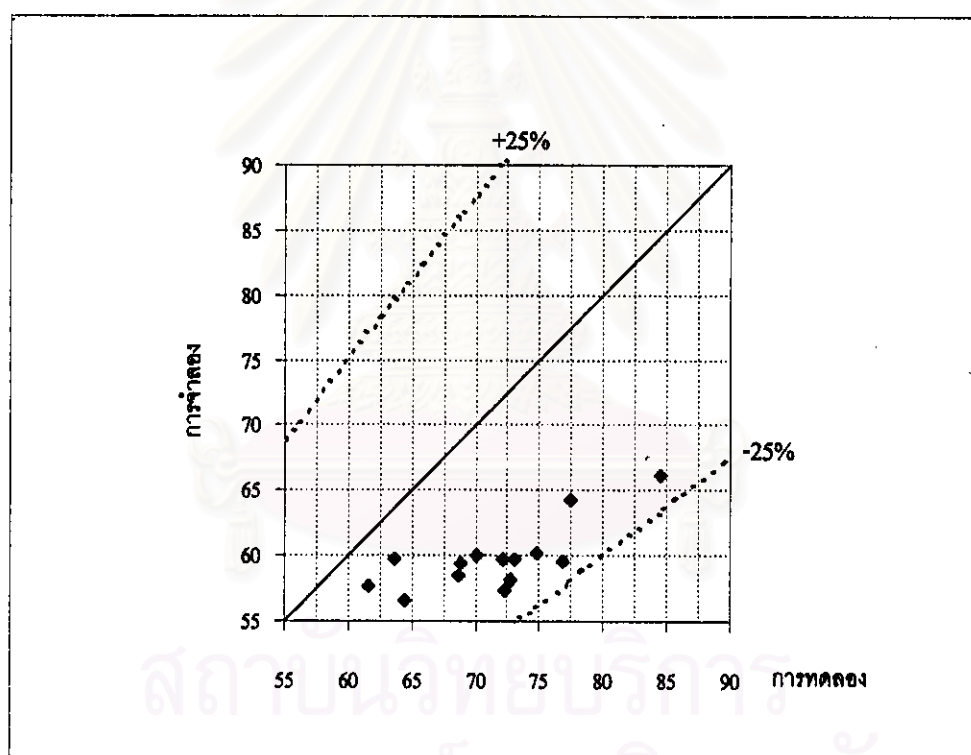
รูปที่ 5-9 ก. การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกรณีที่ 11 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง



รูปที่ 5-9 ข. แสดงความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองในกรณีที่ 11



รูปที่ 5-10 ก. การเปรียบเทียบอุณหภูมิในกรณี 12 ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง



รูปที่ 5-10 ข. แสดงความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองในกรณี 12