

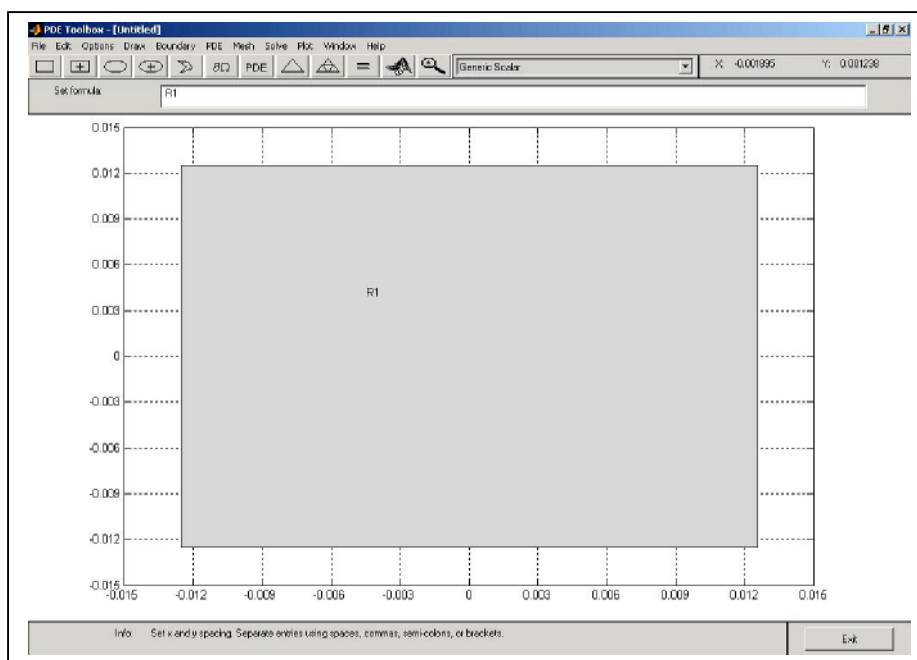
บทที่ 4

แบบจำลองคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวล

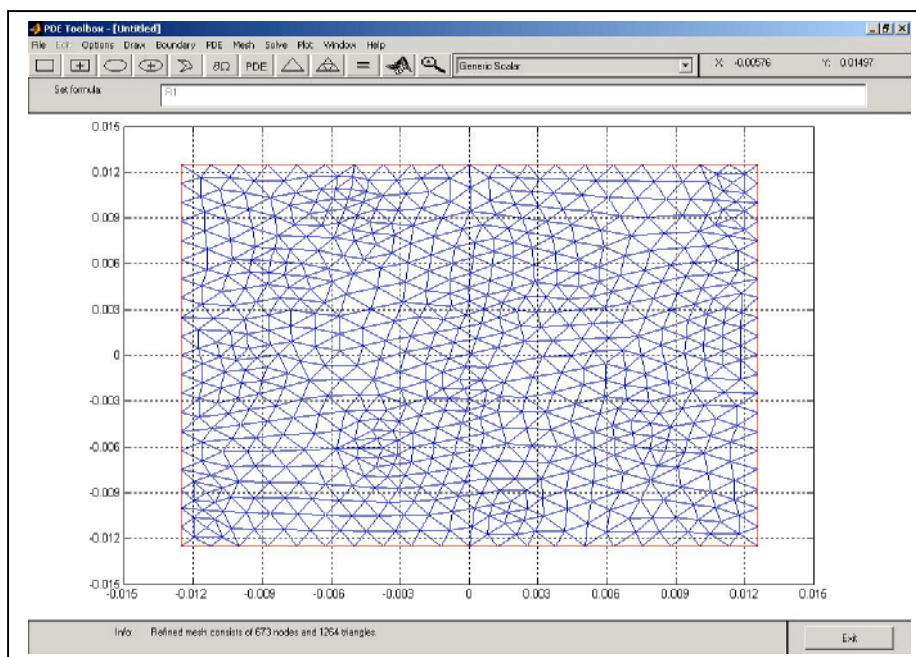
1. ขอบเขตการศึกษาและสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.1 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาศมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร (Heat Transfer and Mass Transfer Equation) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab 6.1) แล้วประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวในแบบ Finite Element 2 มิติ (2-D Finite Element Model) โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการทอด และอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด เพื่อแสดงการดูดซึมน้ำมันของเต้าหู้ปลาในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ



ภาพประกอบที่ 4-1 ภาพแสดงภาพจำลองผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ในลักษณะตัดขวาง



ภาพประกอบที่ 4-2 ภาพแสดงการสร้างไฟในเอลิเมนต์ภายในภาพจำลองผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

จากภาพประกอบที่ 4-1 และภาพประกอบที่ 4-2 เป็นการแสดงขั้นตอนการทำงานเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม โดยการสร้างรูปจำลองของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในลักษณะตัดขวาง ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร และใส่ไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาพ ซึ่งการสร้างแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไปจะดำเนินการในขั้นตอนดังกล่าวนี้เช่นเดียวกัน คือ จะต้องสร้างรูปจำลองของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และใส่ไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาพขึ้นมา ก่อน หากแต่ขั้นตอนต่อไปซึ่งได้แก่การเลือกใช้สมการ และการคำนวณค่าคงที่เพื่อใช้ในการดำเนินการ จะแตกต่างกันตามแต่ความต้องการของงาน

1.2 สมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะใช้สมมุติฐานในการศึกษา ได้แก่

1. ในการศึกษาจะศึกษาการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยอาหารจะจมอยู่ภายใต้ น้ำมันที่ใช้ในการทอดและสัมผัสกับน้ำมันทุกทิศทาง ที่อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอด 120 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้ในการทอด 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ ในระบบปิด

2. ภายใต้สภาวะสุญญากาศอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำลดลงจากสภาวะบรรยากาศปกติที่ 100 องศาเซลเซียส เหลือเพียง 62 องศาเซลเซียส มีผลให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

3. การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ การพาความร้อน (convection) ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำมันที่ใช้ในการทอดสุญญากาศของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และการนำความร้อน (conduction) ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนภายในเนื้ออาหาร

4. ความร้อนจากน้ำมันจะถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของความชื้นในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา สู่อุณหภูมิจุดเดือดและทำให้เกิดการระเหยออกจากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีผลโดยตรงมาจากอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอด

5. เมื่อผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่มีการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จะทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอยู่ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำจนกระทั่งน้ำระเหยออกไปมากขึ้นการเพิ่มของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จึงจะเพิ่มขึ้น

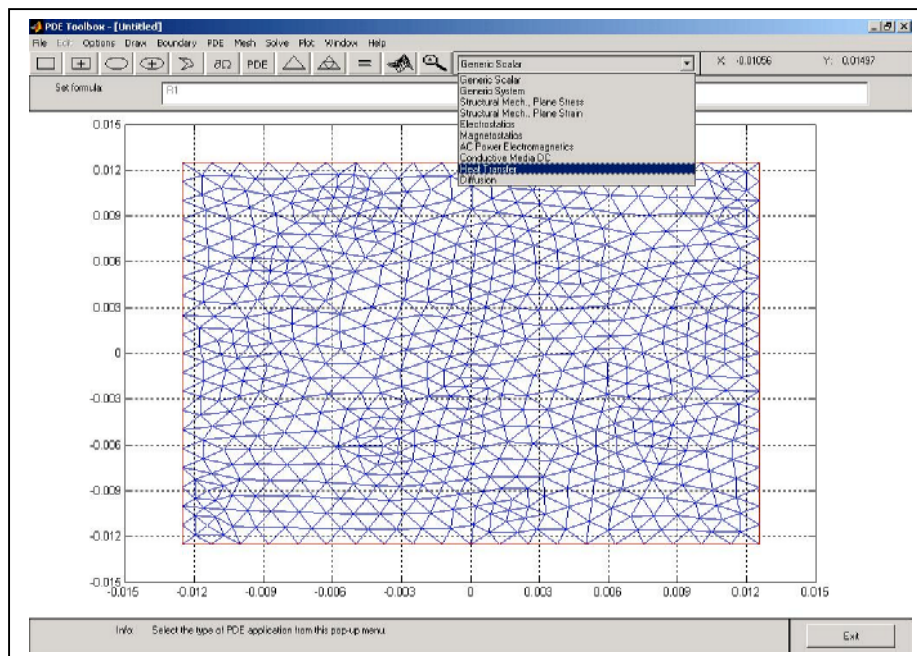
6. การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนน้ำมัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง constant period และ falling period โดยแบ่งเป็นช่วงเวลา 0-15 วินาที และ 0-60 วินาที ของการทอด สำหรับ constant period ของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนน้ำมันตามลำดับ และ ช่วงเวลา 16-150 วินาที และ 61-150 วินาที ของการทอด สำหรับ falling period ของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนน้ำมันตามลำดับ ในขณะที่การถ่ายโอนความร้อน จะมีเฉพาะช่วง constant period ตั้งแต่เวลา 0-150 วินาที ของการทอด โดยที่แต่ละช่วงจะมีความจำเพาะในการใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ ในการหาผลเฉลยของการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวล

7. ระหว่างช่วง constant period น้ำที่ระเหยจะเป็น free water โดยการระเหยเป็นไอและการแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ส่วนช่วง falling period จะเกิดการแพร่ของ bound water การเกิด crust จะเริ่มเกิดระหว่างช่วง constant period หรือมีการระเหยของน้ำเกิดขึ้นแล้วและเกิดการสร้างตัวสมบูรณ์ของ crust ในช่วง falling period

8. อัตราการดูดซึมน้ำมันจะขึ้นกับอัตราการสูญเสียความชื้น ในระหว่าง constant period และ crust ที่เกิดขึ้น รวมทั้งความดันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซึมน้ำมันและอัตราการสูญเสียน้ำของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

9. การถ่ายโอนความร้อนจะใช้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนทอดและอุณหภูมิที่วัดได้ที่วินาทีที่ 150 เป็นสภาวะขอบเขต ขณะที่การถ่ายโอนความร้อนจะใช้ความเข้มข้นความชื้นที่คำนวณได้ที่วินาทีที่ 150 เป็นสภาวะขอบเขต และใช้ความเข้มข้นน้ำมันมากที่สุดที่คำนวณได้ในช่วง constant period และที่วินาทีที่ 150 เป็นสภาวะขอบเขต

2. การถ่ายโอนความร้อน



ภาพประกอบที่ 4-3 ภาพแสดงการเลือกใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer)

ในการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab 6.1 นั้น จากภาพประกอบที่ 4-3 สมการการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Equation) ในลักษณะ Parabolic ศึกษาความสัมพันธ์อ้างอิงกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 8 ของบทที่ 3 ดังแสดงในรูปสมการ 4-1

$$\rho \cdot C \cdot T' - \text{div}[k \cdot \text{grad}(T)] = Q + h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad (4-1)$$

ซึ่งรูปทั่วไปของสมการดังกล่าวได้แก่

$$\rho \times C_p \times \frac{dT}{dt} - \text{div}[k \times \nabla(T)] = \dot{Q}_{\text{heat}} + h \times (T_{\text{ext}} - T) \quad (4-2)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/m^3)

C_p = ความร้อนจำเพาะ ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)

dT/dt = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}/\text{s}$)

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m^{\circ}C$)

\dot{Q}_{heat} = การระเหยที่ผิวหน้า (J/m^3s)

$$h^* = h \times \frac{A_s}{V} \quad (4-3)$$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2^{\circ}C$)

A_s = พื้นที่ผิว (m^2)

V = ปริมาตร (m^3)

T_{ext} = อุณหภูมิภายนอก ($^{\circ}C$)

T = อุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในตัวอย่าง ($^{\circ}C$)

โดยใช้ค่าคงที่ในการดำเนินการสำหรับสมการ 4-2 ดังแสดงในตารางที่ 4-1 โดยจะแบ่งช่วงในการใส่ค่าคงที่เป็น 2 ช่วง ได้แก่

Constant Period = 0-15 วินาทีแรกของการทอดซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง

Falling Period = 16-150 วินาทีของการทอดซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับสมการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Equation)

Properties	Values	
	Constant Period	Falling Period
ρ (kg/m^3)	876	728
C_p ($J/kg^{\circ}C$)	3124	4687
k ($W/m^{\circ}C$)	0.38	2.28
\dot{Q}_{heat} (J)	-27309	-40963
h ($W/m^2^{\circ}C$)	0.0000362	0.0000362
A_s (m^2)	0.0051566	0.0051566
V (m^3)	0.0000252	0.0000252
T_{ext} ($^{\circ}C$)	120	120

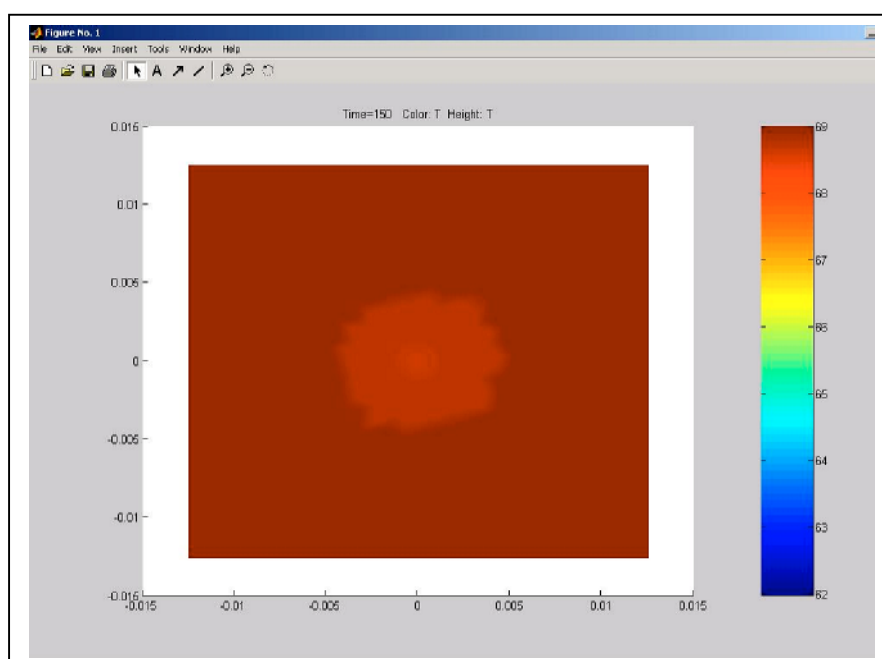
นอกจากนี้ค่าคงที่ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับ Boundary Condition และ Solve Parameter ดังแสดงในตารางที่ 4-2 โดยเลือกใช้ Boundary Condition ในแบบ Dirichlet เนื่องจากระบบที่ศึกษานี้ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากที่สภาวะสูญญากาศอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำจะลดลงจาก 100 องศาเซลเซียส เหลือเพียง 62 องศาเซลเซียส และผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลานั้น พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ที่ได้ผิวของผลิตภัณฑ์ 1 มิลลิเมตรนั้น มีค่า 68 องศาเซลเซียส ความคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอีกประมาณ 2-5 องศาเซลเซียส จึงประมาณค่าที่ Boundary Condition เท่ากับ 69 องศาเซลเซียส และใช้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนทอดที่ 27 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะขอบเขตเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงผลจากการทดลองจริง

ตารางที่ 4-2 ตารางแสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับ Boundary Condition และ Solve Parameter สำหรับการถ่ายโอนความร้อน

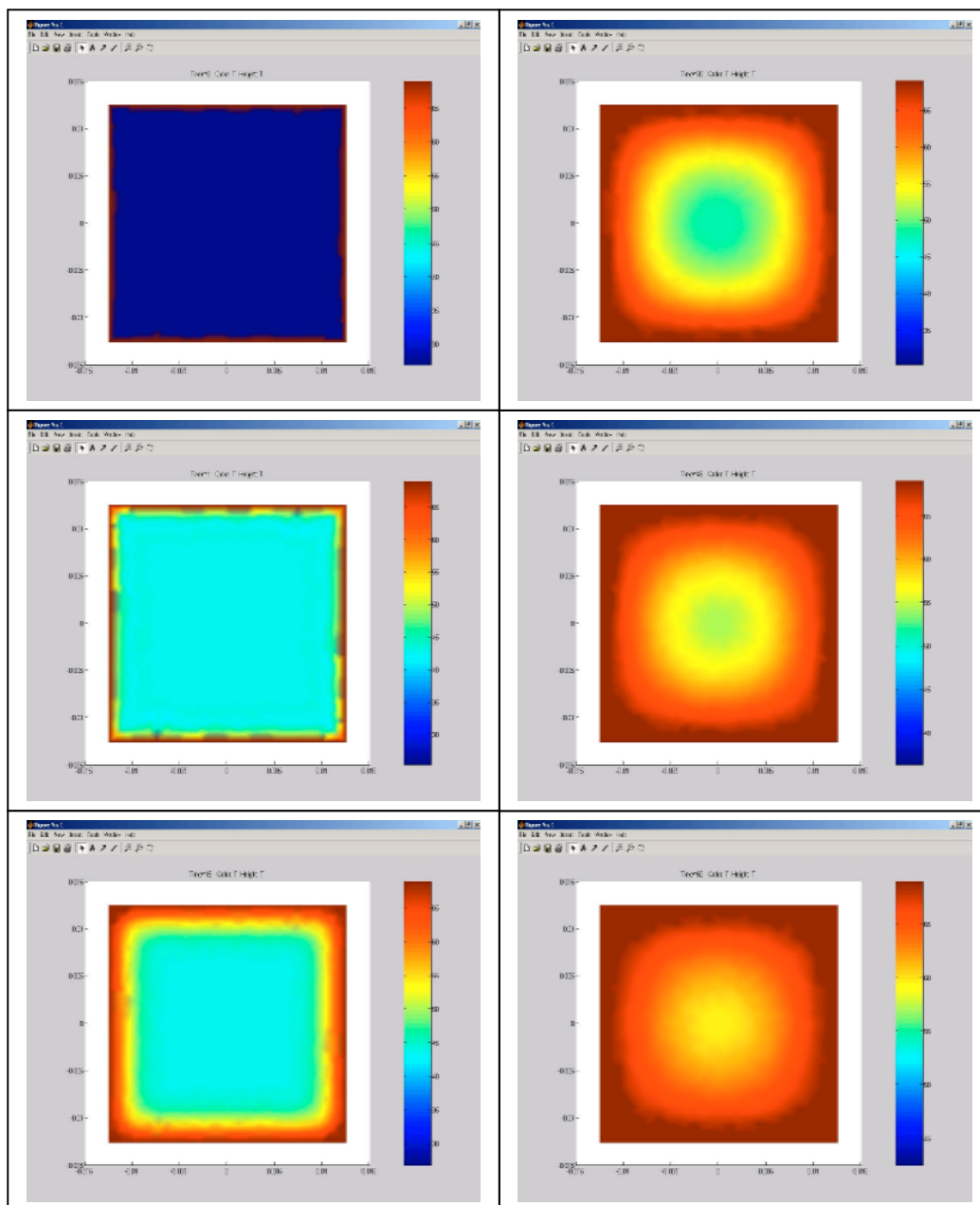
ค่าคงที่สำหรับ	ค่าคงที่	สัญลักษณ์	ค่าที่ใช้
Boundary Conditions	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	t	69
Solve Parameter	อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ ($^{\circ}\text{C}$)	U(t0)	27
	เวลา (s)	Time	0:150

ในภาพประกอบที่ 4-4 แสดงการประยุกต์ใช้โปรแกรม Matlab 6.1 ในการแสดงภาพนิ่งในลักษณะสองมิติของการถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์เข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ ในลักษณะภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่เวลาในการทอด 150 วินาที ส่วนในภาพประกอบที่ 4-5 และภาพประกอบที่ 4-6 นั้น แสดงภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ ที่เวลาในการทอด 0 ถึง 60 และ 75 ถึง 150 วินาที ตามลำดับ พบว่าภาพนิ่งสองมิติที่ได้ สามารถแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศที่เปลี่ยนไปตามเวลาในการทอด ภาพนิ่งที่ได้สามารถใช้สีในการบอกถึงระดับสูงต่ำของอุณหภูมิ โดยที่บริเวณอุณหภูมิต่ำจะแสดงเป็นสีน้ำเงินเข้มและไล่ระดับไปจนกระทั่งถึงสีแดงเข้มที่บ่งบอกถึงระดับอุณหภูมิสูง ตาม Colorbar บอกระดับอุณหภูมิที่แสดงไว้ทางขวามือของภาพ โดยระดับความร้อนจะเริ่มมีการถ่ายโอนจากผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งสัมผัสกับน้ำมันเป็นเป็นตัวกลางการถ่ายโอนความร้อนในระหว่างการทอด ที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นนั้นการถ่ายโอนความร้อนสู่ภายในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นแปรผันตามเวลาในการทอด ซึ่งจะสังเกตการถ่ายโอนของ

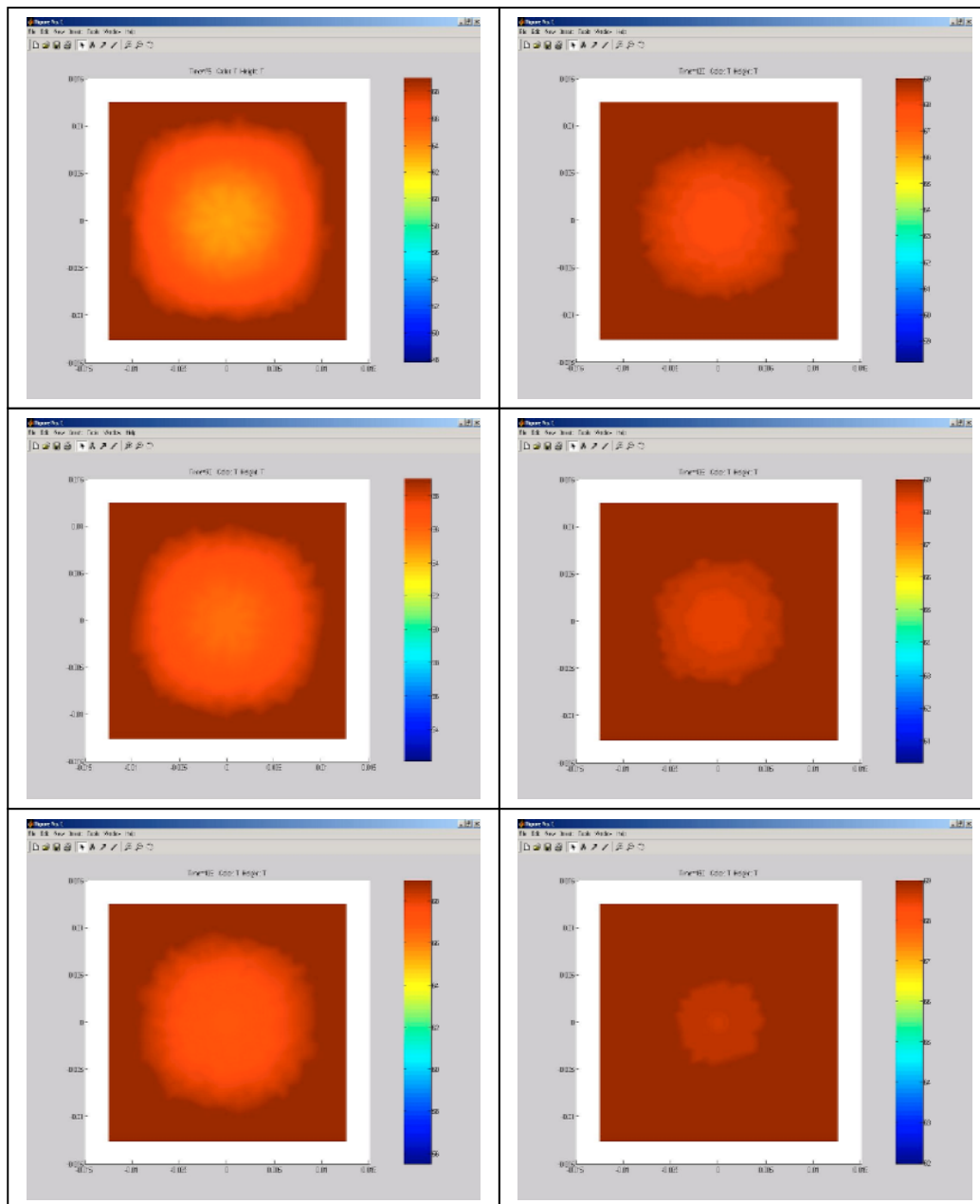
ความร้อนดังกล่าวได้ดีตลอดระยะเวลาในการทอด หากแต่การกระจายของความร้อนภายในการทอดที่มากขึ้นมีระดับสูงใกล้เคียงกันทั่วทั้งชิ้นผลิตภัณฑ์ การถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา นั้นจะมีระดับอุณหภูมิสูงโดดเด่นอย่างชัดเจนบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากที่บริเวณผิวนั้นสัมผัสโดยตรงกับน้ำมันซึ่งเปรียบเสมือนกับแหล่งความร้อนในการถ่ายโอนนั่นเอง ดังนั้นจากภาพประกอบจึงปรากฏสีแดงเข้มในระดับบนสุดของ Colorbar ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิสูงสุดของ Boundary Condition ในทุกภาพภาพประกอบหากแต่จะแตกต่างกันที่ระยะขอบเขตของอุณหภูมิในระดับสูงนั้นจะค่อย ๆ มีมากขึ้นในภาพประกอบที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้น การถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังแสดงในภาพประกอบแสดงว่าการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์นั้นมีลักษณะการแพร่เข้าไปเป็นระดับชั้นเช่นเดียวกับกราฟที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 8 ของบทที่ 3 ซึ่งน่าจะยืนยันความเป็นไปได้ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การแพร่หรือการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเป็นระดับชั้นนั้น จะเริ่มจากเมื่อบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจนกระทั่งถึงระดับหนึ่ง ก็จะมีการแพร่ของความร้อนเข้าสู่บริเวณถัดไปซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่ความร้อนจากภายนอกก็จะมี การแพร่เข้าสู่บริเวณที่สูญเสียความร้อนในการถ่ายเทอย่างต่อเนื่อง ในลักษณะต่อเนื่องเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งสิ้นสุดเวลาในการทอด



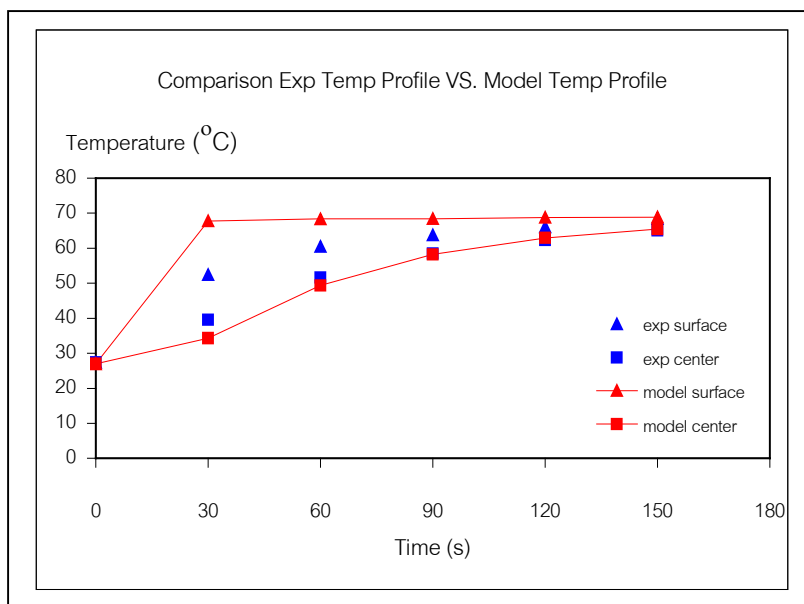
ภาพประกอบที่ 4-4 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 150 วินาที



ภาพประกอบที่ 4-5 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 0, 1, 15, 30, 45 และ 60 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ



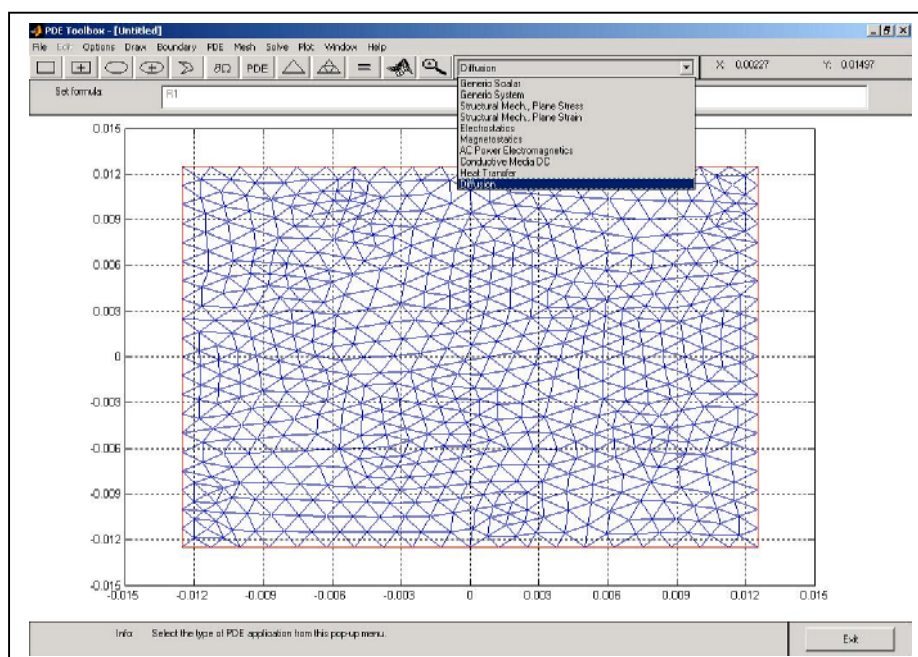
ภาพประกอบที่ 4-6 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 75, 90, 105, 120, 135 และ 150 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความชื้นที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 4-5 และภาพประกอบที่ 4-6 มาทำการแสดงด้วยกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่อ่านได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองที่เวลาที่ใช้ในการทอด 0-150 วินาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-7 พบว่า การเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน โดยอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจากการทดลอง ในขณะที่อุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนึ่ง 1 มิลลิเมตรนั้น ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าที่อ่านได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากในช่วงแรก และมีค่าในระดับใกล้เคียงกันภายหลังจากวินาทีที่ 90 ของการทอด จนกระทั่งสิ้นสุดการทอด

3. การถ่ายโอนมวลสาร



ภาพประกอบที่ 4-8 ภาพแสดงการเลือกใช้ฟังก์ชันการแพร่ (Diffusion)

ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab 6.1 นั้น จากภาพประกอบที่ 4-37 สมการการถ่ายโอนมวล หรือสมการการแพร่ (Diffusion Equation) ในลักษณะ Parabolic ศึกษาความสัมพันธ์อ้างอิงกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 1 และ 2 ของบทที่ 3 จะแสดงในรูป

$$c' - \text{div}(D * \text{grad}(c)) = Q \quad (4-3)$$

ซึ่งรูปทั่วไปของสมการดังกล่าวได้แก่

$$\frac{dc}{dt} - \text{div}[D \times \nabla(c)] = Q_{\text{mass}} \quad (4-4)$$

เมื่อ dc/dt = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ($\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)

c = ความเข้มข้น (kg/m^3)

Q_{mass} = การระเหยหรือการดูดซึมที่ผิวหน้า ($\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$)

โดยใช้ค่าคงที่ในการดำเนินการสำหรับสมการ 4-4 ดังแสดงในตารางที่ 4-3 โดยจะแบ่งช่วงในการใส่ค่าคงที่เป็น 2 ช่วง ได้แก่

Constant Period = 0-60 วินาทีแรกของการทอดซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง

Falling Period = 60-150 วินาทีของการทอดซึ่งมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับสมการ Diffusion

สัญลักษณ์	ค่าที่ใช้		
	การถ่ายโอน ความชื้น	การถ่ายโอนน้ำมัน	
		Constant Period	Falling Period
D (m ² /s)	2.0x10 ⁻¹⁰	2.0x10 ⁻¹⁰	2.0x10 ⁻¹⁰
Q _{mass} (kg/m ² s)	-0.484	2.065	0.221

โดยแบ่งช่วงในการดำเนินการของการถ่ายโอนน้ำมันออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง 0-60 วินาทีแรก และ ช่วง 60-150 วินาที เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 2 ของบทที่ 3 กราฟที่แสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีอัตราการดูดซึมน้ำมันสูงมากในช่วง 0-30 วินาทีแรก มีอัตราการดูดซึมน้ำมันลดลงในเวลาต่อมา และมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วและมากขึ้นภายหลังจากวินาทีที่ 60 ของการทอด นอกจากนี้ค่าคงที่ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับ Boundary Condition และ Solve Parameter มีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-4 โดยเลือกใช้ Boundary Condition ในแบบ Dirichlet เนื่องจากระบบที่ศึกษานี้ขึ้นกับความเข้มข้น การถ่ายโอนความชื้นจะใช้ความเข้มข้นความชื้นที่คำนวณได้ที่วินาทีที่ 150 เป็นสภาวะขอบเขต ส่วนการถ่ายโอนน้ำมันจะใช้ความเข้มข้นน้ำมันมากที่สุดที่คำนวณได้ในช่วง constant period และความเข้มข้นน้ำมันที่วินาทีที่ 150 เป็นสภาวะขอบเขต

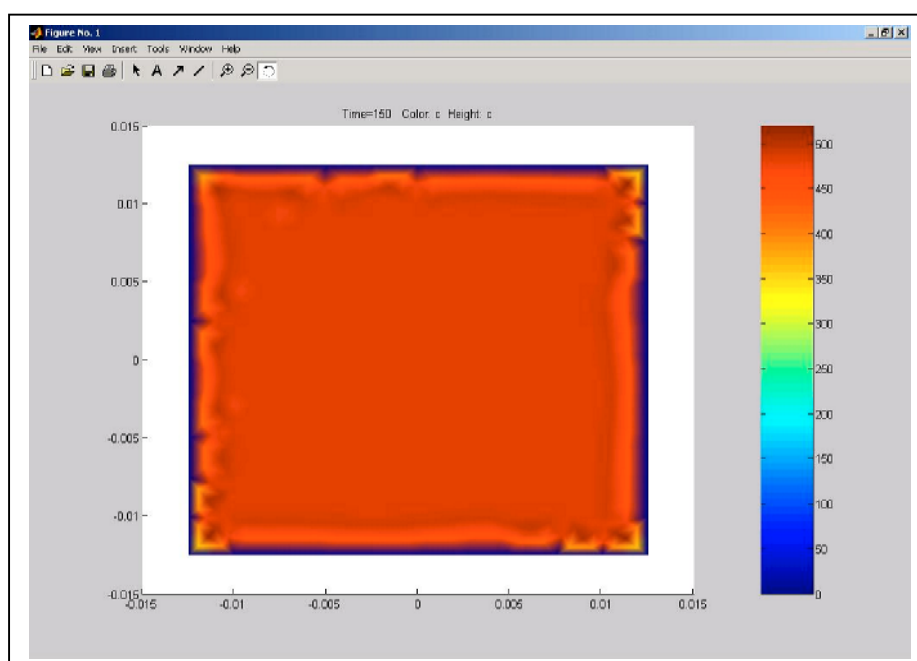
ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินการสำหรับ Boundary Condition และ Solve Parameter สำหรับการถ่ายโอนมวล

ค่าคงที่สำหรับ	ค่าคงที่	สัญลักษณ์	ค่าที่ใช้สำหรับการถ่ายโอน	
			ความชื้น	น้ำมัน
Boundary Conditions	ความเข้มข้น (kg/m ³)	c	0	800 หรือ 270
Solve Parameter	ความเข้มข้นเริ่มต้น (kg/m ³)	U(t0)	556	0
	เวลา (s)	Time	0:150	0:150

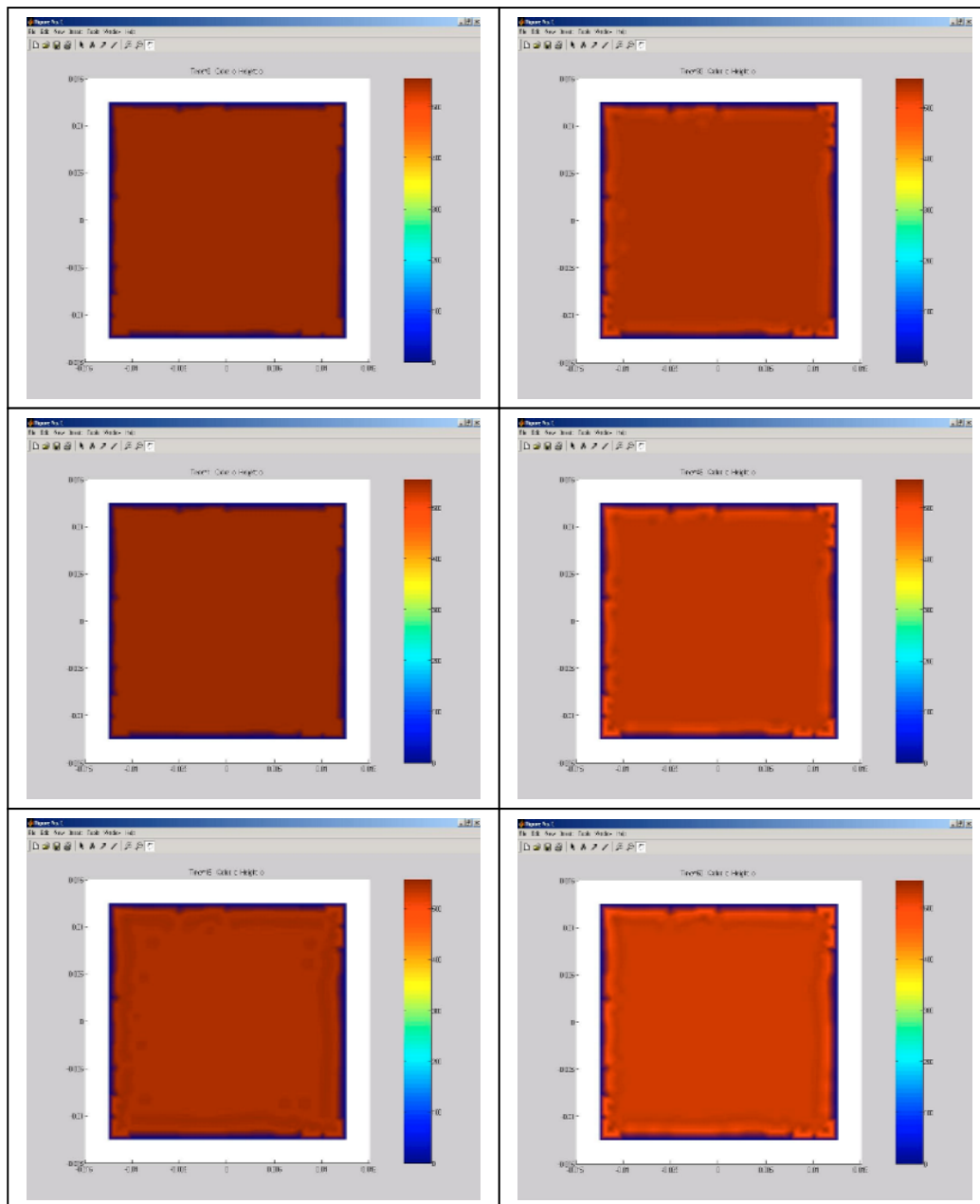
3.1 การถ่ายโอนความร้อน

จากภาพประกอบที่ 4-9 แสดงการประยุกต์ใช้โปรแกรม Matlab 6.1 ในการแสดงภาพนิ่งในลักษณะสองมิติของการถ่ายโอนมวลของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในลักษณะภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่เวลาในการทอด 150 วินาที ภาพประกอบที่ 4-10 และภาพประกอบที่ 4-11 แสดงภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 0 ถึง 60 และ 75 ถึง 150 วินาที ตามลำดับ พบว่าภาพนิ่งสองมิติที่ได้สามารถแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศแปรผันตามเวลาได้ ภาพนิ่งที่ได้สามารถใช้สีในการบอกถึงระดับสูงต่ำของความเข้มข้นของความชื้น โดยที่บริเวณความเข้มข้นระดับต่ำจะแสดงเป็นสีน้ำเงินเข้มและไล่ระดับไปจนกระทั่งถึงสีแดงเข้มที่บ่งบอกถึงความเข้มข้นระดับสูง ตาม Colorbar บอกระดับความเข้มข้นที่แสดงไว้ทางขวามือของภาพเช่นเดียวกับแบบจำลองคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความร้อน โดยระดับความเข้มข้นจะเริ่มมีการถ่ายโอนจากภายในผลิตภัณฑ์สู่ภายนอกผลิตภัณฑ์ซึ่งสัมผัสกับน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงในระหว่างการทอด ที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นนั้นการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นแปรผันตามเวลาในการทอดเช่นเดียวกับการถ่ายโอนความร้อน การสังเกตการถ่ายโอนของความร้อนดังกล่าวในระยะเวลาการทอดจะทำได้ยากกว่าการสังเกตการถ่ายโอนความร้อนในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์สู่ภายนอกนั้น มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของความชื้นในแต่ละบริเวณภายในเนื้อผลิตภัณฑ์แตกต่างกันน้อยกว่าระดับอุณหภูมิที่แสดงความแตกต่างของระดับชัดเจนมากกว่า การกระจายของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์จะสังเกตได้ชัดเจนจากบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์และลึกเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ไม่มากนัก เมื่อเวลาในการทอดมากขึ้นความเข้มข้นของโทนสีจะลดขึ้น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวสัมผัสโดยตรงกับน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าผลิตภัณฑ์มาก และบริเวณดังกล่าวสามารถถ่ายโอนมวลสารได้อิสระกว่าบริเวณถัดเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่บริเวณพื้นที่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่การแสดงผลจะออกมาเป็นระดับความเข้มข้นสีในโทนสีใกล้เคียงกันมากจึงอาจสังเกตได้ยาก ดังนั้นจากภาพประกอบจึงปรากฏสีน้ำเงินเข้มในระดับล่างสุดของ Colorbar ซึ่งแสดงถึงระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ในทุกภาพประกอบหากแต่จะแตกต่างกันที่ความเข้มของโทนสีแดงในบริเวณเนื้อผลิตภัณฑ์โดยส่วนนั้นจะค่อย ๆ ลดระดับความเข้มลงที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปในระหว่างการทอด

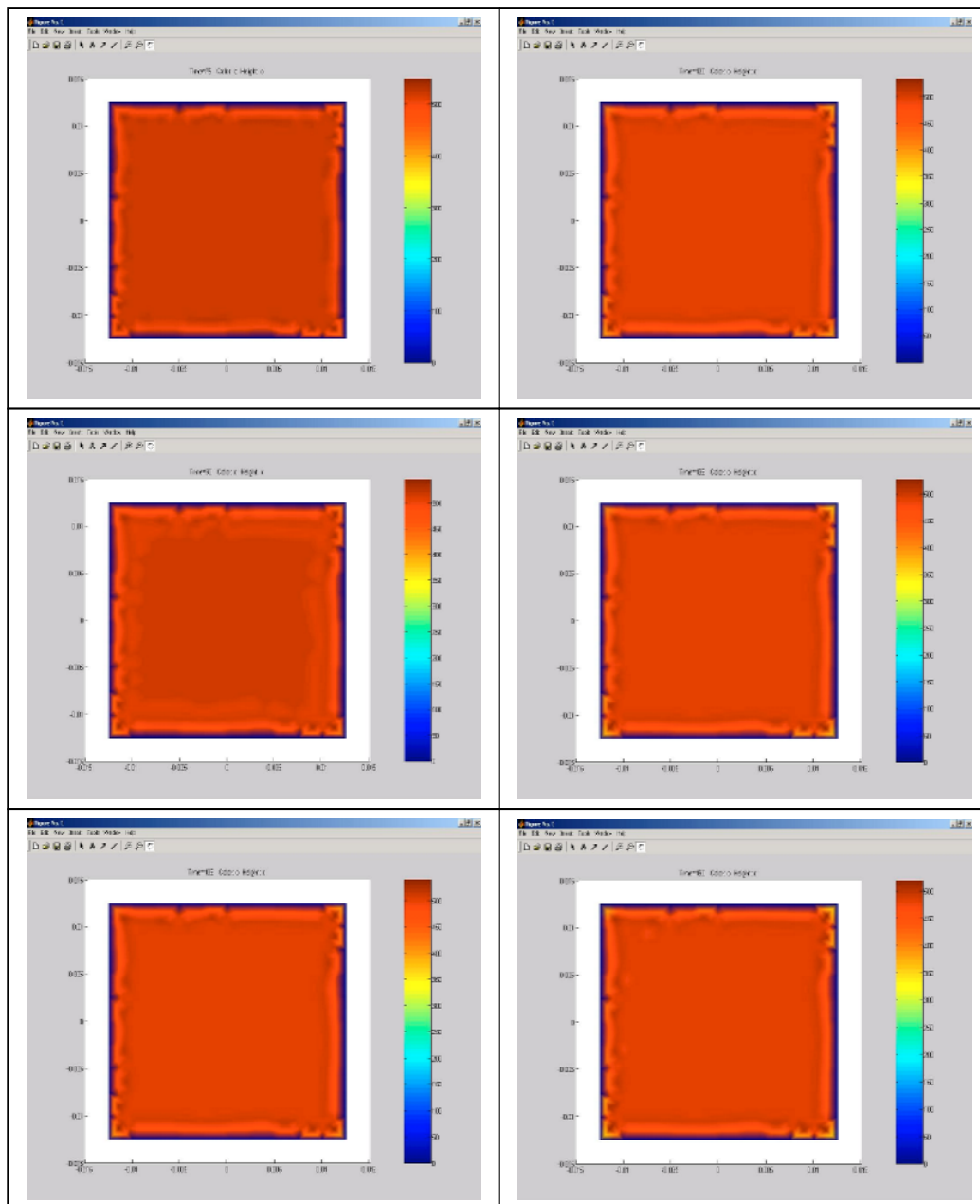
การถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศดังแสดงในภาพประกอบแสดงว่าการถ่ายโอนความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์นั้นมีอัตราสูงและเกิดอย่างรวดเร็วเฉพาะที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งน่าจะเป็นเหตุผลของการเกิดผิวแข็งหรือการไหม้ที่เรียกว่า crust บริเวณผิวผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผิวแข็งหรือ crust นั้น จากการทดลองและจากภาพถ่ายจะพบว่ามีความหนาไม่มากนัก ประมาณ 1 มิลลิเมตรจากผิว ซึ่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์บริเวณดังกล่าวจะมีสีน้ำเงินเข้มตั้งแต่เริ่มแรกในการทอด ซึ่งน่าจะแสดงได้ว่าส่วนที่มีการสูญเสียความร้อนอย่างรวดเร็วในการทอดนั้นน่าจะมีการเปลี่ยนไปเป็น crust ที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารเข้าออกในการทอดเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 4-9 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 150 วินาที

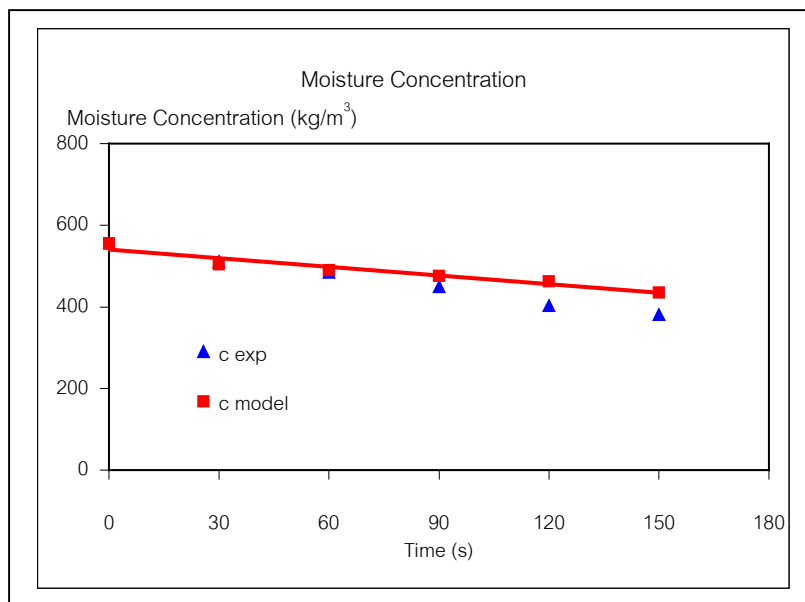


ภาพประกอบที่ 4-10 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 0, 1, 15, 30, 45 และ 60 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-11 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนความร้อนขึ้นภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 75, 90, 105, 120, 135 และ 150 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ

เมื่อนำค่าเฉลี่ยความชื้นที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 4-10 และภาพประกอบที่ 4-11 มาทำการแสดงด้วยกราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยกับผลที่ได้จากการทดลองที่เวลาที่ใช้ในการทอด 0-150 วินาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-12 พบว่าการเปลี่ยนแปลงไปของความเข้มข้นความชื้นเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และความเข้มข้นความชื้นเฉลี่ยที่คำนวณได้จากผลการทดลองมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเดียวกันและใกล้เคียงกันมาก ค่าความชันกราฟความเข้มข้นของความชื้นจากการทดลอง เท่ากับ -0.708 ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความชันเท่ากับ -1.176 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้น่าจะสามารถแสดงการถ่ายโอนความชื้นแทนผลที่ได้จากการทดลองได้ โดยจะให้ค่าที่ใกล้เคียงในช่วง 0-60 วินาที แรกของการทอด ภายหลังจากวินาทีที่ 60 จนกระทั่งสิ้นสุดการทอดทอดนั้น ค่าความเข้มข้นของความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้นของความชื้นที่ได้จากการทดลอง การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้นค่าที่ได้จะแสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังนั้นเมื่อจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องคำนวณแปลงค่าไปเป็นค่าของความเข้มข้นความชื้นเนื่องจากข้อจำกัดในการป้อนข้อมูลของแบบทางคณิตศาสตร์

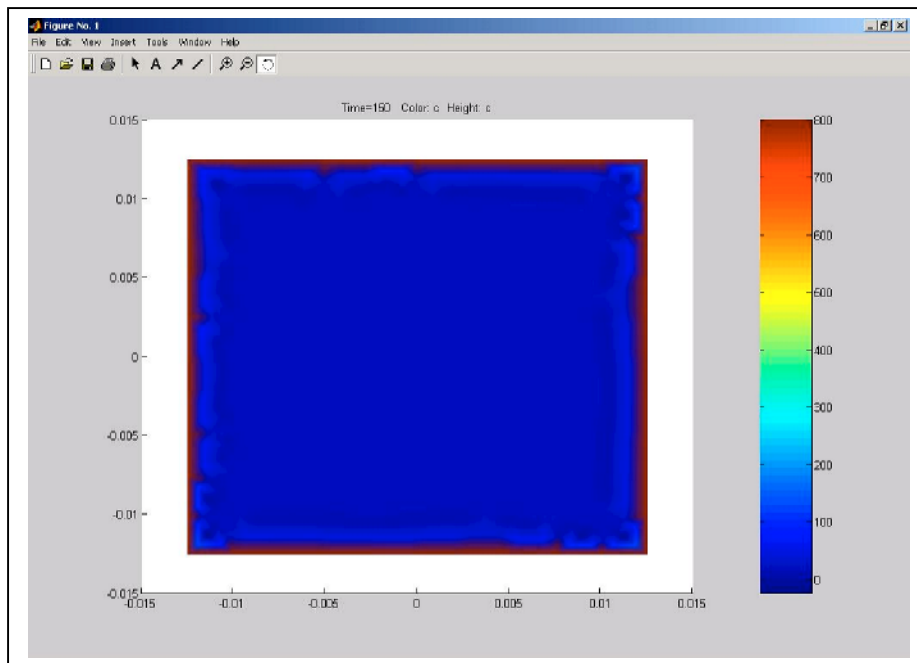


ภาพประกอบที่ 4-12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยระหว่างผลจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

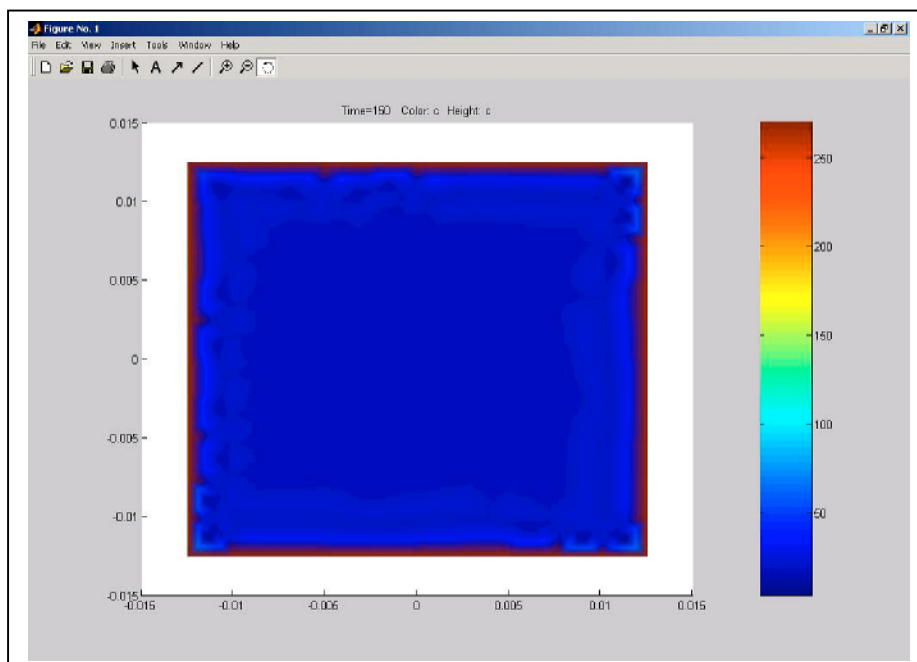
3.2 การถ่ายโอนน้ำมัน

จากภาพประกอบที่ 4-13 และภาพประกอบที่ 4-14 แสดงภาพนิ่งในลักษณะสองมิติของการถ่ายโอนน้ำมันที่ใช้ในการทอดเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในลักษณะภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่เวลาในการทอด 150 วินาที ที่ Boundary Condition ของน้ำมันที่มีมวลผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 และ 270 kg/m^3 โดยคำนวณจากความเข้มข้นน้ำมันมากที่สุดที่คำนวณได้ในช่วง constant period และความเข้มข้นน้ำมันที่วินาทีที่ 150 ตามลำดับ

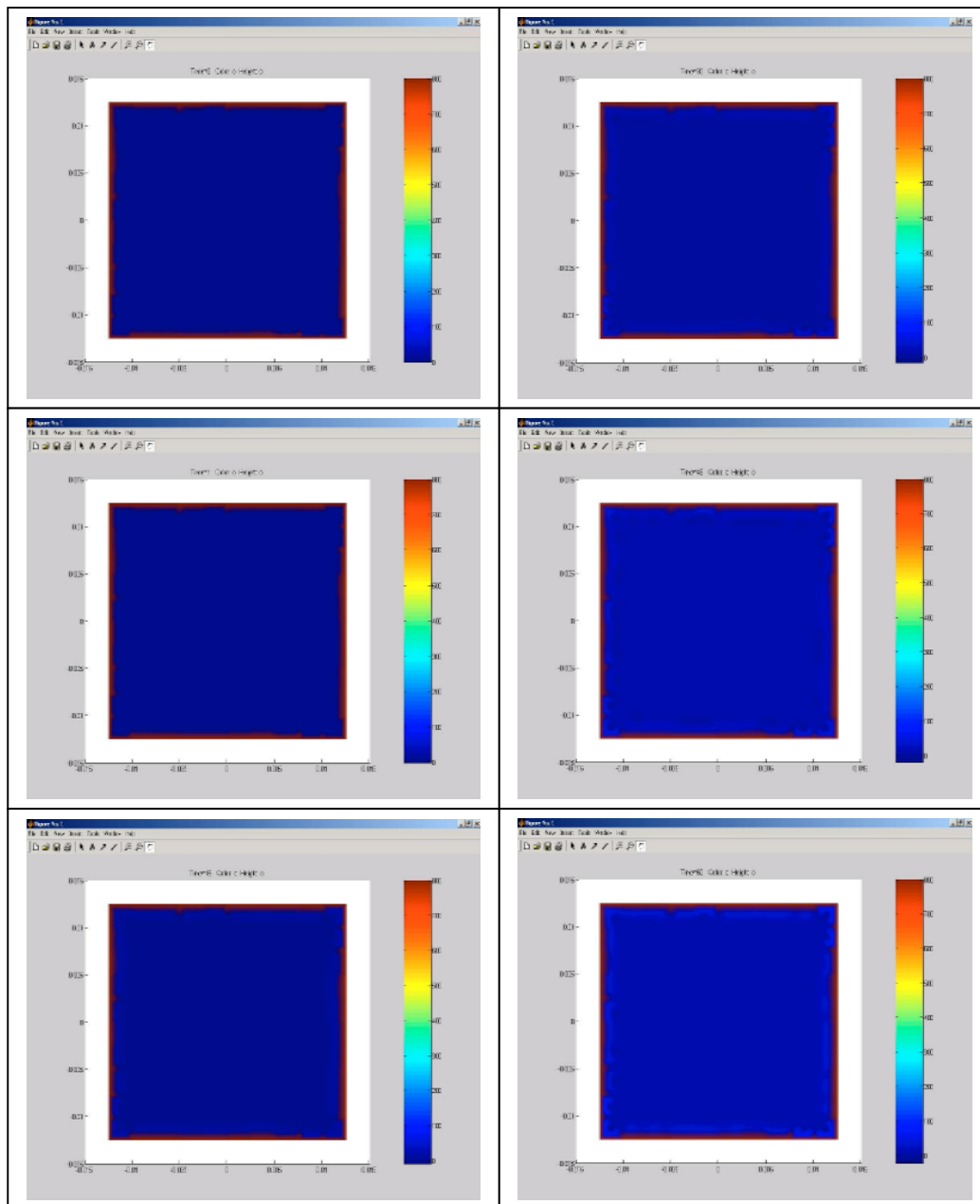
จากภาพประกอบที่ 4-15 และภาพประกอบที่ 4-16 แสดงภาพนิ่งในลักษณะสองมิติของการถ่ายโอนน้ำมันที่ใช้ในการทอดเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในลักษณะภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่ Boundary Condition ของน้ำมันที่มีมวลผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 0 ถึง 60 และ 75 ถึง 150 วินาที ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 4-18 และภาพประกอบที่ 4-19 แสดงภาพนิ่งในลักษณะสองมิติของการถ่ายโอนน้ำมันที่ใช้ในการทอดเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในลักษณะภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่ Boundary Condition ของน้ำมันที่มีมวลผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 0 ถึง 60 และ 75 ถึง 150 วินาที ตามลำดับ



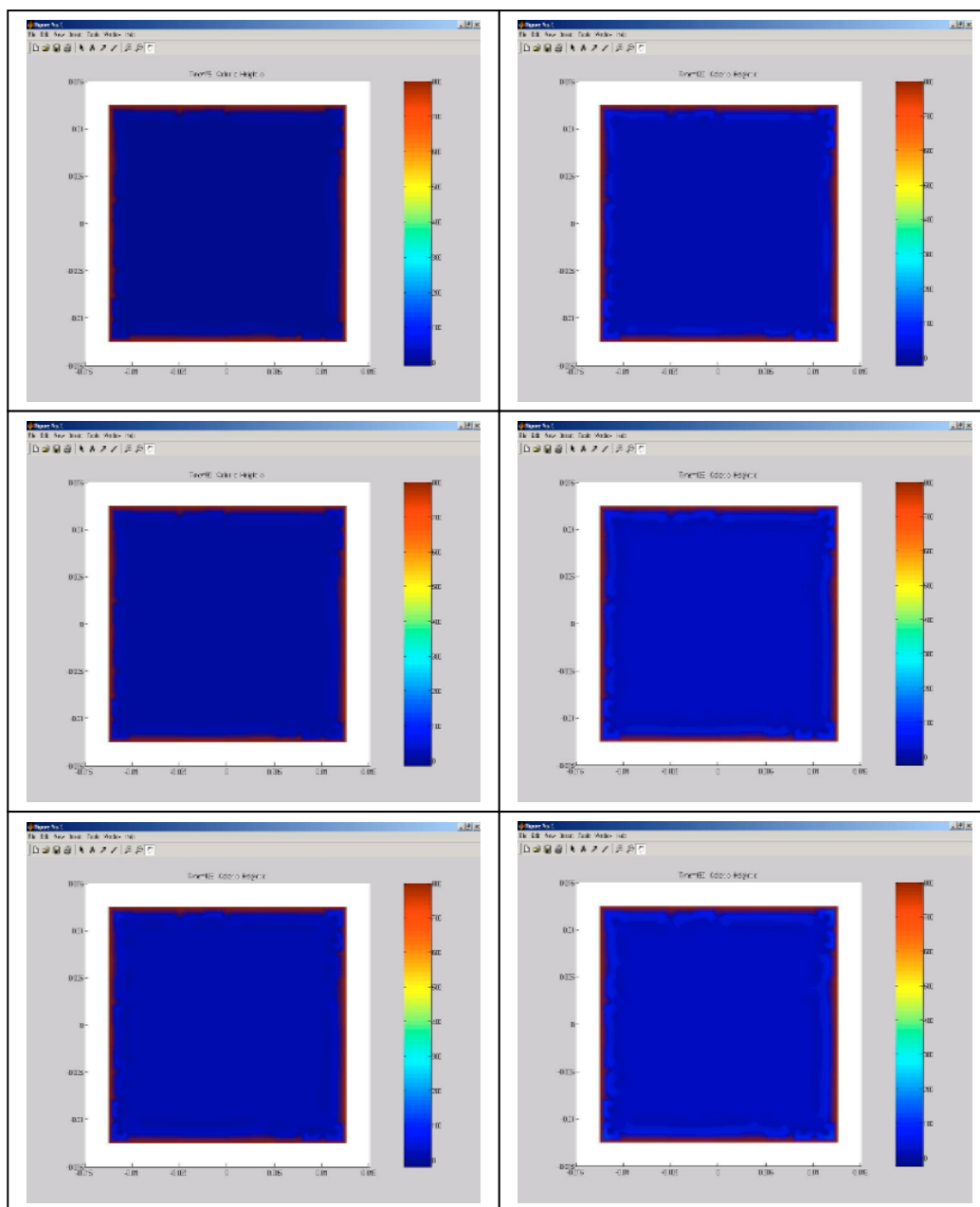
ภาพประกอบที่ 4-13 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 150 วินาที Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3



ภาพประกอบที่ 4-14 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่เวลาในการทอด 150 วินาที Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3

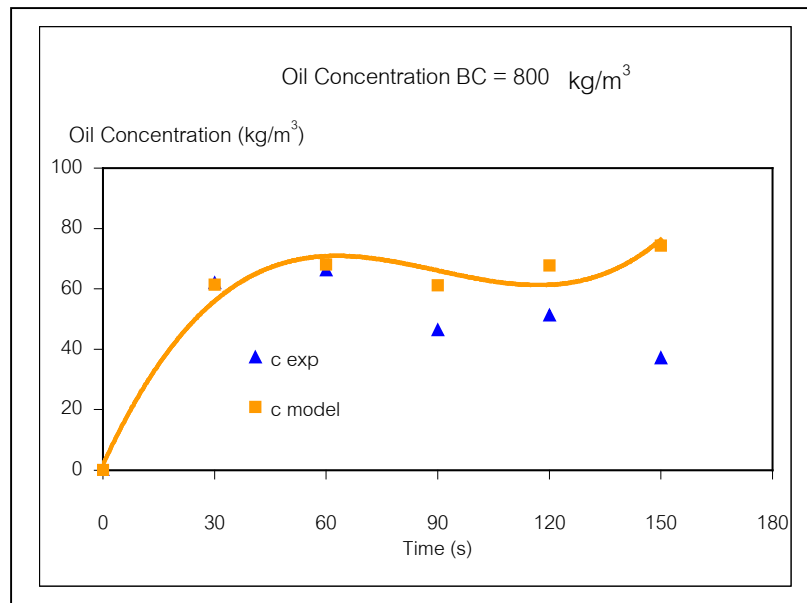


ภาพประกอบที่ 4-15 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 0, 1, 15, 30, 45 และ 60 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ

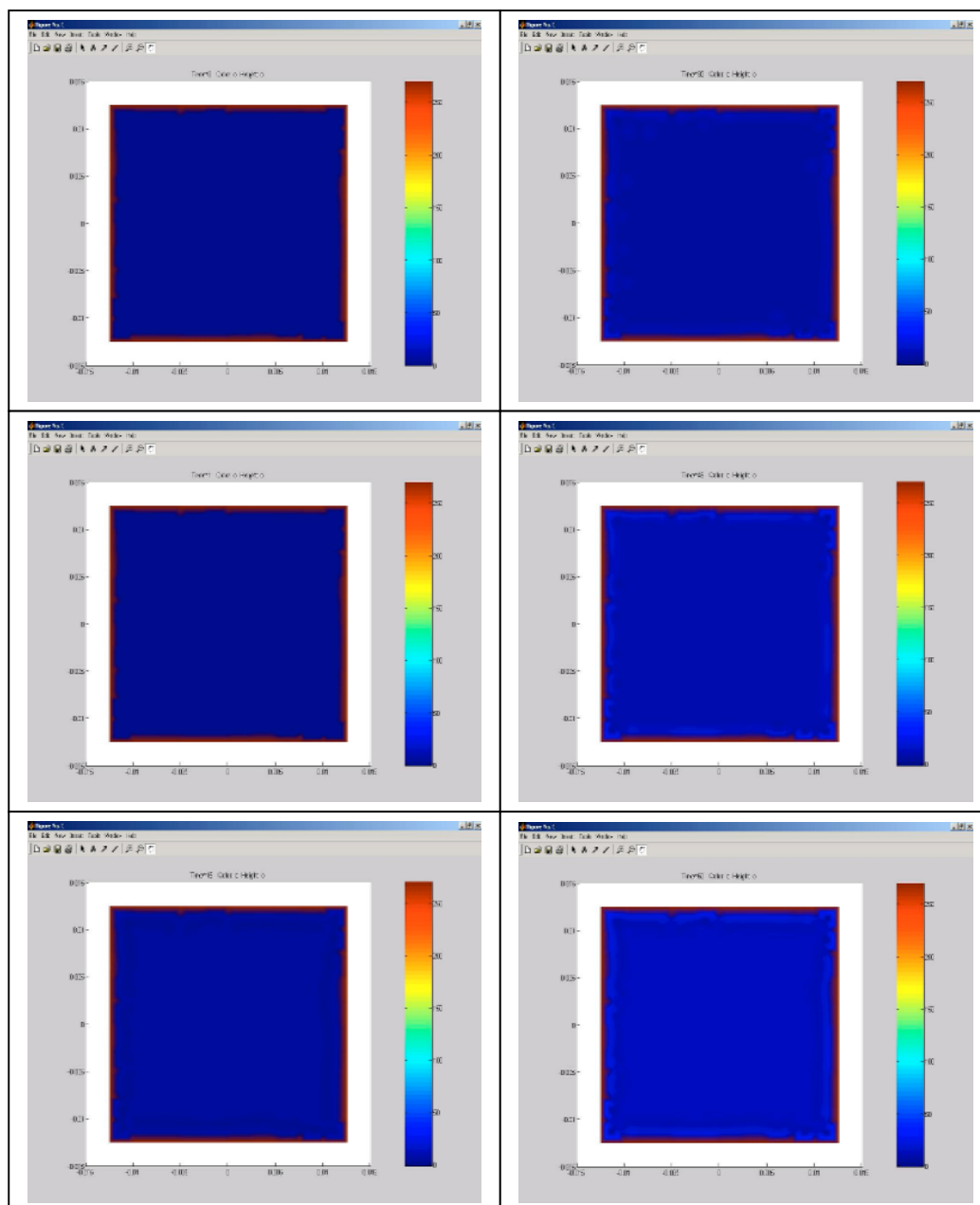


ภาพประกอบที่ 4-16 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 75, 90, 105, 120, 135 และ 150 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ

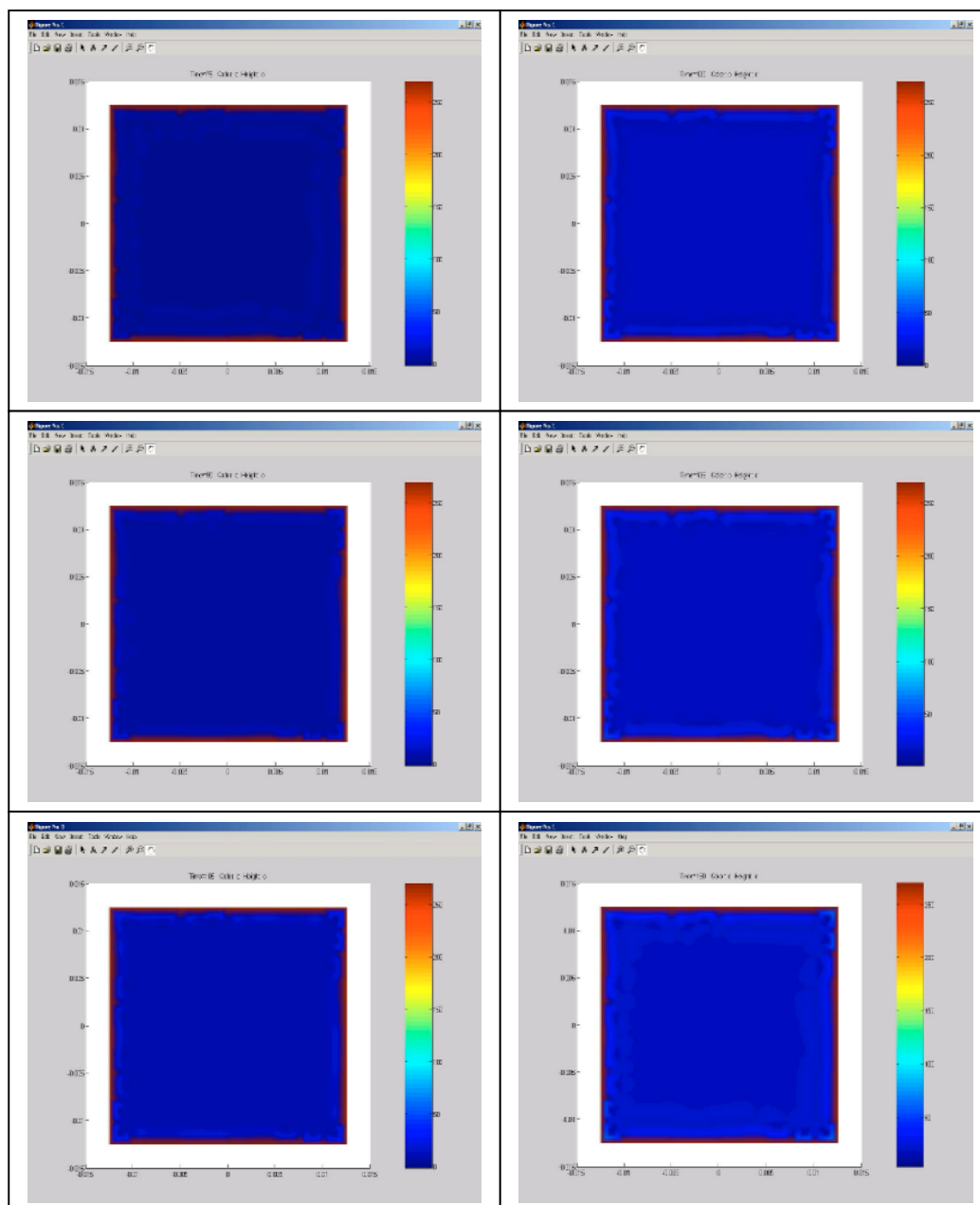
เมื่อนำค่าเฉลี่ยน้ำมันที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 4-15 และ ภาพประกอบที่ 4-16 มาทำการแสดงด้วยกราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยกับผล ที่ได้จากการทดลองที่เวลาที่ใช้ในการทอด 0-150 วินาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-17 พบว่า การเปลี่ยนแปลงไปของความเข้มข้นน้ำมันเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 ซึ่งเปรียบเสมือนใช้น้ำมันที่ใช้ในการทอด เป็นสภาวะขอบเขต และความเข้มข้นน้ำมันเฉลี่ยที่คำนวณแปลงค่าจากผลการทดลองมีแนวโน้ม ลดลงในลักษณะเดียวกันและใกล้เคียงกันในช่วง 0-120 วินาทีของการทอด ภายหลังจากการ ทอดผ่านไป 30 วินาที กราฟแสดงผลความเข้มข้นของน้ำมันที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการดูดซึมน้ำมันของผลิตภัณฑ์เข้าสู่ปลาที่จะเกิดไ การดูดซึมน้ำมันอย่างรวดเร็วและปริมาณความเข้มข้นสูงในช่วง 30 วินาทีแรกของการทอด แต่เมื่อทำการทอด จนกระทั่งครบ 150 วินาทีนั้นปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันจะมีค่าต่ำลงอย่างมาก น่าจะเป็น สาเหตุมาจากความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ระหว่างการทอด 0-60 วินาทีนั้นมีค่าสูง โดยเฉพาะ ความชื้นบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งสัมผัสกับน้ำมันที่ใช้ในการทอด ความชื้นบริเวณผิวนี้จะจับตัว กับน้ำมันทำให้ปริมาณน้ำมันที่บริเวณผิวมีค่าสูง นอกจากนี้ผิวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ระหว่างการทอด 0-60 วินาที น่าจะยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเป็นผิวแข็งหรือ crust อย่างเต็มที่ เมื่อเปลี่ยนแปลง ความดันกลับสู่สภาวะบรรยากาศแรงกดดันอากาศจะขับดันน้ำมันที่ผิวดังกล่าวเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้ ง่ายและมากขึ้น ภายหลังจากการทอดผ่านไป 30 วินาที ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันจากกราฟที่ได้มีค่า ลดลงเรื่อย ๆ จึงน่าจะเป็นผลจากเริ่มมีการเกิดผิวแข็งหรือ crust ขึ้นแล้วบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ เข้าสู่ปลานั้นเอง กราฟที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงน่าจะแสดงการถ่ายโอนมวลตลอด ระยะเวลาในการทอดโดยไม่คำนึงถึงการเกิดผิวแข็งหรือ crust ของผลิตภัณฑ์เข้าสู่ปลา



ภาพประกอบที่ 4-17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำมันเฉลี่ยระหว่างผลจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Boundary Condition ของน้ำมันที่มีมวลผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m³

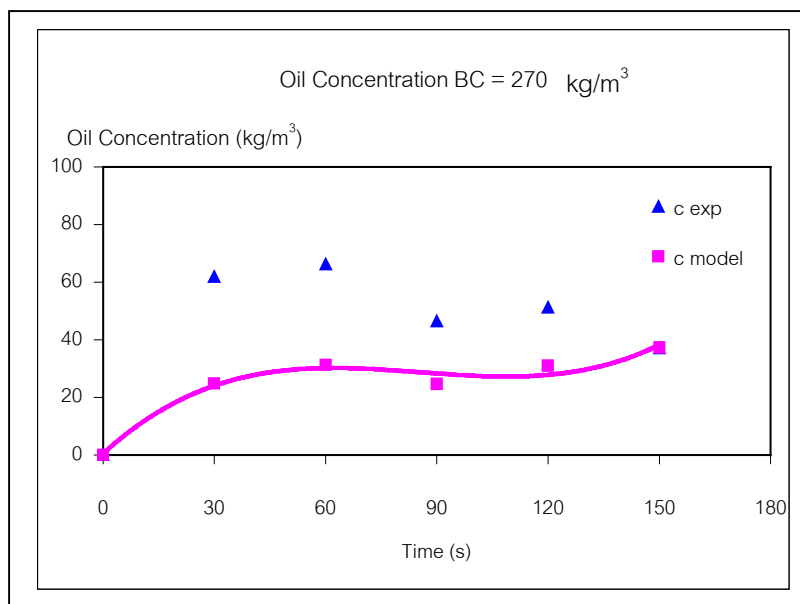


ภาพประกอบที่ 4-18 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 0, 1, 15, 30, 45 และ 60 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-19 ภาพสองมิติแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 ที่เวลาในการทอด 75, 90, 105, 120, 135 และ 150 วินาที เรียงลำดับจากบนลงล่างและซ้ายไปขวาตามลำดับ

เมื่อนำค่าเฉลี่ยน้ำมันที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ภาพประกอบที่ 4-18 และภาพประกอบที่ 4-19 มาทำการแสดงด้วยกราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของความชื้นเฉลี่ยกับผลที่ได้จากการทดลองที่เวลาที่ใช้ในการทอด 0-150 วินาที ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-20 พบว่า กราฟการเปลี่ยนแปลงไปของความเข้มข้นน้ำมันเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นน้ำมันในระดับต่ำกว่ากราฟที่แสดงความเข้มข้นน้ำมันที่ได้จากการทดลองมาก หากแต่ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันสุดท้ายที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากการใช้ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 ซึ่งเป็นความเข้มข้นน้ำมันที่ผิวของผลิตภัณฑ์เตาหู่ปลาที่ 150 วินาที ซึ่งได้จากการคำนวณเป็นสภาวะขอบเขตกราฟที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Boundary Condition 270 kg/m^3 จึงน่าจะแสดงปริมาณความเข้มข้นของน้ำมันเฉลี่ยที่ผลิตภัณฑ์ดูดซึมไว้ระหว่างการทอดตลอดการทอดเป็นระยะเวลา 150 วินาทีได้โดยกราฟที่ได้นี้น่าจะแสดงถึงการถ่ายโอนน้ำมันเฉพาะที่มีการถ่ายโอนระหว่างการทอดโดยไม่รวมปริมาณน้ำมันที่จับตัวกับความชื้นที่ผิวที่ถูกดูดซึมหรือมีถูกขั้บตันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เตาหู่ปลาภายหลังเปลี่ยนแปลงความดันจากสภาวะสุญญากาศเป็นสภาวะบรรยากาศเนื่องด้วยกราฟที่ได้แสดงการถ่ายโอนน้ำมันแปรผันตามเวลาจนกระทั่งสิ้นสุดการทอด ดังนั้นผลต่างของระดับความสูงของเส้นกราฟความเข้มข้นน้ำมันเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและกราฟความเข้มข้นน้ำมันเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงน่าจะใช้บ่งบอกถึงปริมาณน้ำมันที่จับตัวกับความชื้นที่ผิวที่มีถูกขั้บตันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เตาหู่ปลาภายหลังเปลี่ยนแปลงความดันที่เวลาในการทอดต่าง ๆ ได้

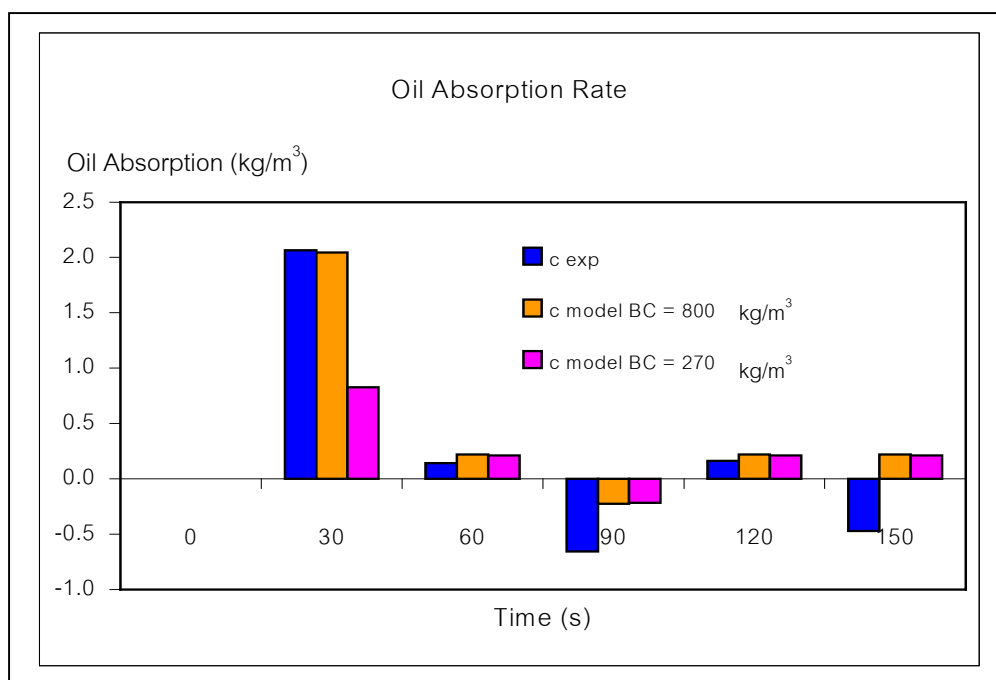


ภาพประกอบที่ 4-20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำมันเฉลี่ยระหว่างผลจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m³

ในภาพประกอบที่ 4-15, ภาพประกอบที่ 4-16, ภาพประกอบที่ 4-18 และภาพประกอบที่ 4-19 นั้น พบว่าภาพนิ่งสองมิติที่ได้สามารถแสดงการถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสูญญากาศได้ในระดับหนึ่งเช่นเดียวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนความชื้น เนื่องจากลักษณะภาพที่ได้ใกล้เคียงกันมีความเป็นไปได้ในลักษณะเดียวกัน ภาพนิ่งที่ได้ใช้สีในการบอกถึงระดับสูงต่ำของความเข้มข้นของน้ำมันที่ใช้ในการทอดที่ถ่ายโอนสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา โดยที่บริเวณความเข้มข้นหรืออุณหภูมิระดับต่ำจะแสดงเป็นสีน้ำเงินเข้มและไล่ระดับไปจนกระทั่งถึงสีแดงเข้มที่บ่งบอกถึงความเข้มข้นหรืออุณหภูมิระดับสูง ตาม Colorbar บอกระดับความเข้มข้นที่แสดงไว้ทางขวามือของภาพเช่นเดียวกับแบบจำลองคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนความชื้น โดยระดับความเข้มข้นจะเริ่มมีการถ่ายโอนจากภายนอกผลิตภัณฑ์สู่ภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งสัมผัสกับน้ำมันในระหว่างการทอด ที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นนั้นการถ่ายโอนน้ำมันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นแปรผันตามเวลาในการทอดเช่นเดียวกับการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนความชื้น การสังเกตการถ่ายโอนน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา จะทำได้ยากเช่นเดียวกับการถ่ายโอนความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และยากกว่าการสังเกตการถ่ายโอนความร้อนในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

เนื่องจากการถ่ายโอนน้ำมันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์นั้น มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำมันในแต่ละบริเวณภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ในระดับต่ำ การกระจายของน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์จะสังเกตได้ชัดเจนที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์และลึกเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ไม่มากนัก เมื่อเวลาในการทอดมากขึ้น ความเข้มข้นของโทนสีจะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับการถ่ายโอนความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวสัมผัสโดยตรงกับน้ำมันซึ่งเกิดการถ่ายโอนสูงกว่าภายในผลิตภัณฑ์มาก และบริเวณดังกล่าวสามารถถ่ายโอนมวลสารได้อิสระกว่าบริเวณถัดเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่บริเวณพื้นที่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่การแสดงผลจะออกมาเป็นระดับความเข้มข้นในโทนสีใกล้เคียงกันมากจึงอาจสังเกตได้ยาก ดังนั้นจากภาพประกอบจึงปรากฏสีน้ำเงินเข้มในระดับกลางสุดของ Colorbar ซึ่งแสดงถึงระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่บริเวณเนื้อของผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่ในทุกภาพประกอบหากแต่จะแตกต่างกันที่ความเข้มของโทนสีแดงในบริเวณผิวผลิตภัณฑ์ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จะค่อย ๆ ลดระดับความเข้มลงที่เวลาในการทอดเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงปริมาณน้ำมันที่แพร่เข้าสู่ผลิตภัณฑ์ในระหว่างการทอด

การถ่ายโอนน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-15, ภาพประกอบที่ 4-16, ภาพประกอบที่ 4-18 และภาพประกอบที่ 4-19 นั้น แสดงว่าการถ่ายโอนน้ำมันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์นั้นมีอัตราสูงและเกิดอย่างรวดเร็วเฉพาะที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา เนื่องจากบริเวณผิวดังกล่าวมีการถ่ายโอนมวลออกจากผลิตภัณฑ์ในอัตราสูงและรวดเร็วเช่นกัน การถ่ายโอนน้ำมันเข้าแทนที่ความชื้นที่สูญเสียไปที่บริเวณผิวซึ่งมีความอิสระในการถ่ายโอนสูงนั้นน่าจะเกิดได้ง่ายและรวดเร็ว เหตุผลของการเกิดผิวแข็งหรือ crust บริเวณผิวผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไป น่าจะเป็นเหตุผลที่ทำให้การถ่ายโอนน้ำมันเกิดช้าลงและน้อยลง จากแบบจำลองคณิตศาสตร์บริเวณดังกล่าวจะมีสีแดงเข้มซึ่งน่าจะบ่งบอกว่าการถ่ายโอนน้ำมันจะมีการถ่ายโอนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ที่บริเวณผิวเป็นส่วนใหญ่ มีการแพร่เข้าสู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์น้อย สาเหตุน่าจะมาจากอัตราการถ่ายโอนความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์จากบริเวณภายในผลิตภัณฑ์น้อยน้ำมันจึงสามารถถ่ายโอนเข้าแทนที่บริเวณภายในได้น้อยเช่นกัน นอกจากนี้การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาน้ำมันภายในผลิตภัณฑ์นั้นค่าที่ได้จะแสดงในลักษณะเปอร์เซ็นต์น้ำมัน ดังนั้นเมื่อจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องคำนวณแปลงค่าไปเป็นค่าของความเข้มข้นน้ำมันเนื่องจากข้อจำกัดในการป้อนข้อมูลของแบบทางคณิตศาสตร์



ภาพประกอบที่ 4-21 กราฟแสดงอัตราการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

จากภาพประกอบที่ 4-21 ซึ่งเป็นกราฟแสดงอัตราการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งแบบ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 800 kg/m^3 และ Boundary Condition ของน้ำมันที่ผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 270 kg/m^3 สามารถแบ่งออกเป็นช่วงและอธิบายได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 ช่วง 0-30 วินาที แรกของการทอด กราฟที่ได้จะมีอัตราการดูดซับน้ำมันสูง ซึ่งเป็นช่วงที่แสดงถึงช่วงที่มีอัตราการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในอัตราสูงและรวดเร็ว ทำให้มีการดูดซับน้ำมันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและรวดเร็ว

ช่วงที่ 2 ช่วง 30-60 วินาทีของการทอด อัตราการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะลดลง เนื่องจากเริ่มมีการเกิด crust ของผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ช่วงที่ 3 ช่วง 60-90 วินาทีของการทอด อัตราการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะลดลงอย่างมาก เนื่องจาก crust ที่เกิดขึ้น ค่าอัตราการดูดซับน้ำมันที่ได้มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าทิศทางการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์มีทิศสวนทางหรือมีการไหลออกของน้ำมันจากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา อันเนื่องมาจากผลของความดันไอบนผิวของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูง ความดันไอดังกล่าวจะเป็น

ตัวผลิตภัณฑ์ให้น้ำมันซึ่งถูกดูดซึมเข้ามาและยังไม่สามารถเกาะติดผิวของผนังรูพรุนภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาถูกขับดันออกสู่ผิวของผลิตภัณฑ์อีกครั้ง

ช่วงที่ 4 ช่วง 90-150 วินาทีของการทอด อัตราการดูดซึมน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีค่าต่ำและมีอัตราการดูดซึมน้ำมันในลักษณะคงที่ เนื่องจากการเกิด crust ของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและความดันไอบนผิวในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาซึ่งเป็นอุปสรรคในการถ่ายโอนมวลของน้ำมัน