

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

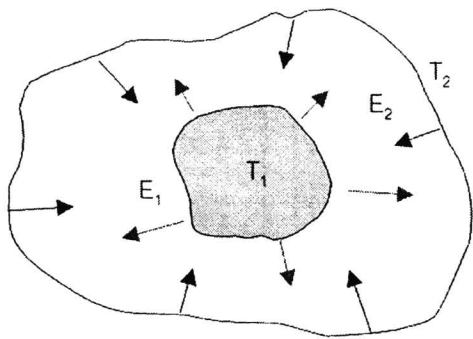
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด

ในปี ค.ศ. 1800 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir William Herschel เป็นผู้ค้นพบคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) หรือคลื่นรังสีความร้อน ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งแผ่มาจากดวงอาทิตย์ ค้นพบโดยการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึม โดยเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีม่วงไปยังแถบสีแดงพบว่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่แถบสีแดง ขอบเขตดังกล่าวเรียกว่า “อินฟราเรด” (ขอบเขตต่ำกว่าแถบสีแดง) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 0.75 ถึง 100 μm มีความถี่ในช่วง 1011 – 1014 Hz และมีคุณสมบัติไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อความถี่สูงขึ้นพลังงานจะสูงขึ้นตามไปด้วย และเนื่องจากย่านรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วงคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของแสงสีแดง มนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดแต่สามารถรู้สึกถึงความร้อนได้ โดยวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero หรือ -273.15°C หรือ 0 K) จะมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา ซึ่งวัตถุที่ร้อนจะแผ่รังสีออกมามากกว่าวัตถุที่เย็น (ประวิทย์, 2553)

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับพลังงานที่สสารแผ่ออกมา ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับพลังงาน เนื่องจากการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือเคลื่อนที่มากส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูง กล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับสภาพทางความร้อนภายในสสาร โดยก๊าซและของแข็งชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent) เช่น กระจก การแผ่รังสีจะเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร (volumetric phenomenon) คือการแผ่รังสีความร้อนจากสสารเป็นผลรวมของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่จุดใดๆ ของสสารนั้นตลอดทั้งปริมาตร ซึ่งในที่นี้จะเน้นไปที่การแผ่รังสีอินฟราเรดในลักษณะที่เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) กล่าวคือในของแข็งและของเหลวส่วนใหญ่ รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาโดยโมเลกุลภายในจะถูกโมเลกุลที่ติดกันดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมดจึงเป็นผลให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากของแข็งหรือของเหลว สามารถคิดได้ว่ารังสีอินฟราเรดแผ่ออกมาจากโมเลกุลบริเวณใกล้พื้นผิวหรือเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนจะแผ่ออกมาจากพื้นผิววัตถุในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะทะลุผ่าน

ออกไป (Transmitted) โดยกำหนดความสามารถในการดูดซับ (Absorbitivity) การสะท้อน (Reflectivity) และการส่งผ่าน (Transmissivity) คือ α ρ และ τ ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำคือวัตถุทางอุดมคติที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. วัตถุดำจะดูดซับ (absorb) รังสีที่มาจากทุกทิศทางบนพื้นผิวทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นที่ความยาวคลื่นและทิศทางใด
2. ที่ความยาวคลื่นและอุณหภูมิหนึ่งๆ ไม่มีวัตถุใดสามารถแผ่รังสีได้เท่ากับวัตถุดำ
3. แม้ว่ารังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุดำเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง นั่นคือวัตถุดำเป็น “diffuse emitter”

เนื่องจากวัตถุดำสามารถดูดซับและแผ่รังสีอินฟราเรดได้โดยสมบูรณ์ จึงใช้วัตถุดำเป็นวัตถุมารฐานสำหรับเปรียบเทียบปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวจริงใด ๆ กับปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากวัตถุดำ แม้ว่าจะมีพื้นผิวบางชนิดที่สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นวัตถุดำแต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิวใดที่มีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยแท้จริง

การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)

จากคำกล่าวที่ว่าไม่มีพื้นผิวใดสามารถแผ่รังสีอินฟราเรดได้มากกว่าวัตถุดำ ดังนั้นจึงใช้วัตถุดำเป็นสิ่งที่เปรียบเทียบความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวจริง ซึ่งความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวหรือค่า ϵ เป็นคุณสมบัติของวัตถุเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนโดยเป็นส่วนหนึ่งของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงต่อรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจะสัมพันธ์กับทิศทางและความคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา

Total hemispherical emissivity เป็นค่าเฉลี่ยของ Emissivity ตลอดทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น มีค่าจำกัดความเป็น

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

(2.1)

จากสมการต่าง ๆ ข้างต้นเห็นได้ว่าหากรู้ค่า ε ของพื้นผิวก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่าง ๆ ของพื้นผิวได้

ตารางที่ 2. 1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด

Material's Surface	Wavelength (λ : μm)	Temperature (K)	Emissivity (ε)	Reference
Stainless Steel; Types 304		489	0.44	Fogiel, 1992.
Stainless Steel; Types 316; Polished			0.28	Amidon, 1999.
Stainless Steel	1-1,000		0.60	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Bread	10		> 0.80	Kress-Rogers and Brimelow, 2005.
Chocolate	10		0.85	Kress-Rogers and Brimelow, 2005.
Coke	8 - 13		0.95-1.00	Bentley, 1998.
Dough	1-1000		0.85	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Fat beef	1-1000		0.78	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Ice; Rough		300	0.99	Brewster, 1992.
Ice; Smooth		300	0.97	Brewster, 1992.
Lean beef	1-1000		0.74	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Paper		300	0.90-0.98	Brewster, 1992.
Vegetation		300	0.92-0.96	Brewster, 1992.
Water	9.3		0.96	Rao (2010)

2.2 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ (Radiosity: J) (Incropera, et al.,2005)

รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง (Radiosity: J) ประกอบด้วยรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (Emission: E) และรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อม (Irradiation, G) ที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากวัตถุอื่นมากระทบ

Irradiation (G) เป็นรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากการแผ่รังสีของวัตถุอื่นมากระทบกับวัตถุ โดยรังสีดังกล่าวอาจมีต้นกำเนิดมาจากหลายแหล่งและอาจมาจากทุกทิศทาง ซึ่ง Irradiation จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา โดย

Spectral irradiation (G_λ) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิววัตถุหนึ่งหน่วยจากรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่น λ

Total irradiation (G) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิวหนึ่งหน่วยตลอดทุกความยาวคลื่น

Irradiation ที่มาตกกระทบวัตถุบางส่วนจะถูกวัตถุดูดซับไว้ (Absorption: A or $G_{\lambda,abs}$) บางส่วนจะสะท้อนออกจากวัตถุ (Reflection: R or $G_{\lambda,ref}$) และบางส่วนจะทะลุผ่านวัตถุไป (Transmission: T or $G_{\lambda,tr}$)

$$G = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,tr}$$

หรือ $G = A + R + T$ (2.2)

Irradiation (G) = $A + R + T$ (สมการ 16) หากนำ G หาค่าตลอด จะได้

$$1 = \frac{A}{G} + \frac{R}{G} + \frac{T}{G}$$

ซึ่ง A/G คือความสามารถในการดูดซับ (Absorptivity: α) ส่วน R/G คือความสามารถในการสะท้อน (Reflectivity: ρ) และ T/G คือ ความสามารถในการส่งผ่าน (Transmissivity: τ) หากเขียนสมการใหม่จะได้

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$
 (2.3)

โดยที่ค่าทั้งสามของวัตถุใด ๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆของวัตถุ

จากที่เคอร์ชอฟฟ์ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับของวัตถุ (α) จะเท่ากับความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุเอง (ϵ) หรือ $\alpha = \epsilon$ และหากวัตถุเป็นวัตถุทึบแสง (Opaque) วัตถุจะไม่มีคุณสมบัติการส่งผ่าน ($\tau=0$) ดังนั้นจากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$\epsilon + \rho = 1$$
 (2.4)

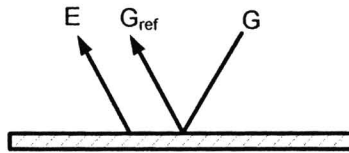
ส่วนวัตถุที่เป็น Black body จะดูดซับรังสีที่มากกระทบวัตถุไว้ทั้งหมดจึงไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อน ($\rho=0$) จะได้

$$\epsilon = 1$$
 (2.5)

ดังนั้นพลังงานรังสีที่แผ่จาก Black body จึงมีเฉพาะพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีของวัตถุเอง (Perfect Reflector)

รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง (Radiosity: J) ประกอบด้วยรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (Emission: E) และ Irradiation ที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากวัตถุอื่นมากระทบและสะท้อนออกจากวัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) ดังนั้น Radiosity ที่ออกมาจากวัตถุจึงเป็น

$$J = E + G_{\lambda,ref}$$
 (2.6)



รูปที่ 2.2 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง

การดูดซึมและการสะท้อนของพื้นผิวเป็นตัวเลขสำคัญในการมองเห็นสี ส่วนการแผ่รังสี (Emission) มักไม่มีผล ทั้งนี้เพราะวัตถุทั่วไปมีอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 K และการแผ่รังสีจึงหนาแน่นอยู่ในช่วง Infrared ซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ดังนั้นสีที่ปรากฏต่อสายตาจึงขึ้นอยู่กับว่าวัตถุจะดูดซึมและสะท้อน (Irradiation) ในช่วงความคลื่นใด เช่น เห็นว่าเสื้อมีสีแดงเพราะเสื้อได้ดูดซึมรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีอื่นๆ ไว้และสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีแดง และเห็นว่าพื้นผิวมีสีดำเพราะพื้นผิวได้ดูดซึมรังสีที่ตกกระทบในย่านการมองเห็นทั้งหมด ส่วนพื้นผิวที่เห็นเป็นสีขาวก็เพราะพื้นผิวสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาให้ถี่ถ้วนเกี่ยวกับการมองเห็นสีนี้ สำหรับค่า Irradiation หนึ่งๆ สีของพื้นผิวอาจไม่แสดงถึงการตอบรับรังสีทั้งหมดของพื้นผิวก็ได้ ทั้งนี้เพราะ Irradiation ส่วนใหญ่อาจอยู่ในย่านที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น หิมะที่มองเห็นเป็นสีขาวนั้น เพราะสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด แต่ดูดซึมรังสีส่วนใหญ่ในย่าน Infrared และสามารถประมาณได้เสมือนเป็นวัตถุดำในย่าน Infrared (คลื่นยาว) นี้

2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว (Radiation Exchange between Surfaces)

รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 1 (q_1 : w) มีค่าเป็น

$$q_1 = J_1 A_1 \quad (2.7)$$

ส่วนรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 2 (q_2 : w) มีค่าเป็น

$$q_2 = J_2 A_2 \quad (2.8)$$

โดย J_1 และ J_2 คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 (Radiosity1: w/m²) และรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 (Radiosity2: w/m²) ตามลำดับ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ 1 และวัตถุ 2 ที่มีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา (m²)

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุ 2 วัตถุ พบว่ามีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกันระหว่างวัตถุทั้งสอง โดยรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 บางส่วนไปตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ 2 ($q_1 \rightarrow 2$: w/m²) ในขณะเดียวกันรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 บางส่วนจะไปตกกระทบบนวัตถุ 1 ($q_2 \rightarrow 1$: w/m²)

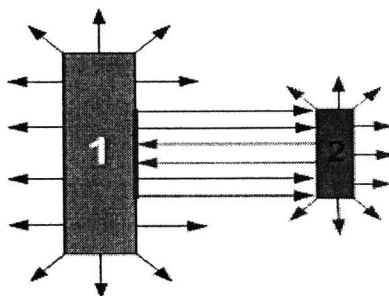
สัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 1 ไปตก 2 เรียกว่า View Factor F_{12} หรือ

$$F_{12} = \frac{q_{1 \rightarrow 2}}{J_1 A_1} \quad (2.9)$$

ในทำนองเดียวกันสัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 2 ไปตก 1 เรียกว่า View Factor F_{21} หรือ

$$F_{21} = \frac{q_{2 \rightarrow 1}}{J_2 A_2} \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณารังสีที่แผ่จากวัตถุ 1 ตกกระทบบนวัตถุ 2 พบว่า รังสีที่วัตถุ 2 ได้รับเป็นรังสีจากวัตถุ 1 ที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของวัตถุ 2 (Field of view) ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณารังสีที่แผ่จากวัตถุ 2 ตกกระทบบนวัตถุ 1 พบว่า รังสีที่วัตถุ 1 ได้รับเป็นรังสีจากวัตถุ 2 ที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของวัตถุ 1 (Incropera, et al., 2005)



รูปที่ 2.3 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ

2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุจริงและวัตถุดำ

โดยทั่วไปการกระจายของรังสีตามความยาวคลื่น (Spectral distribution) ของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงนั้นแตกต่างจาก Planck distribution เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้น ϵ ที่ความยาวคลื่นและทิศทางต่างๆ จึงอาจมีค่าต่างกันออกไป (Incropera, 2005)

จากกฎของ Stefan-Boltzmann $E_b(T) = \sigma T^4$ (W/m²) ซึ่งเป็นการหาค่าวัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำเท่านั้น ดังนั้นหากวัตถุเป็นวัตถุจริง ต้องใส่ค่า Emissivity (ϵ) ในสมการด้วย ซึ่งจะได้

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.11)$$

ซึ่ง ϵ เป็นคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุกับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งวัตถุดำจะมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวดำมันเองทั้งหมดและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทุกทาง แต่วัตถุจริงจะมีค่า ϵ ไม่คงที่ และต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจริงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ชนิดและลักษณะผิวของวัตถุ ความยาวคลื่น (Wave

Length) และมุมของการแผ่รังสี (Emission angle) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยวัตถุจริงจะมีความเข้มของการแผ่รังสีสูงสุดที่มุม θ เท่ากับ 0 องศา (มนตรี, 2548)

2.5 กระบวนการเกิดขนมปัง

2.5.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของขนมปัง

ส่วนผสมของโดพร้อมอบประกอบด้วย แป้งสาลีชนิดแข็ง (Hard Wheat Flour) ยีสต์ เนยขาว น้ำตาลและน้ำ โดยน้ำและแป้งเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญที่สุดในการทำขนมปัง ซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสและความชื้นของเนื้อด้านในขนมปัง (crumb) โดยทั่วไปมักจะมีน้ำมีส่วนประกอบในสูตร ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ (Arpita et al., 2007) ในระหว่างเติมน้ำลงไป แป้งสาลีและนวดผสมกันนั้น ไกลอะดินและกลูเทนนินจะอุ้มน้ำทำให้เกิดสารที่สลับซับซ้อนเรียกว่ากลูเตน (Gluten) การทำการผสมดังกล่าวจะทำให้ส่วนผสมเป็นเกิดกลูเตนมากหรือน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวสาลี ซึ่งแป้งสาลีที่นำมาทำขนมปังควรมีปริมาณโปรตีนประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ การกระบวนการเกิดโดจะทำให้โดที่ได้มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic) หยุน (plastic) และเหนียวหนืด (viscous) (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544) ส่วนผสมที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือยีสต์ สายพันธุ์ที่นำมาใช้ คือ สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* (วราวุฒิและรุ่งนภา, 2532) ซึ่งยีสต์จะทำให้เกิดการพองตัวและโครงภายในขนมปัง จะเห็นว่าการขึ้นฟูของโดเกิดจากการหมักแป้งสาลี กับน้ำตาล ซึ่งเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาการเกิดแป้งสตาร์ชโดยมีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องด้วย

2.5.2 ปฏิกิริยาการเกิดและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบ

แบ่งช่วงการเกิดขนมปังตั้งแต่เริ่มเตรียมโดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบออกเป็น 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ ช่วงหมักโดและช่วงอบขนมปัง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่วงหมักโด

ในระหว่างการหมักแป้งให้เกิดโด การทำงานภายในโดนั้น เอนไซม์โปรตีเอส (protease) ชนิดแอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) จะเปลี่ยนแป้งสตาร์ชให้เป็นน้ำตาลเดกซ์ทริน (dextrin) ส่วนเอนไซม์โปรตีเอส (protease) ชนิดเบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) จะเปลี่ยนน้ำตาลเดกซ์ทริน (dextrin) และแป้งบางส่วนให้เป็นน้ำตาลมอสโทส น้ำตาลมอสโทสจะถูกเปลี่ยนเป็นต่อไปโดยเอนไซม์มอสเทสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก็นจะถูกย่อยต่อโดยยีสต์ ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และสารอื่นอีกเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรด (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544)

แอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นในโดซึ่งเป็นผลมาจากการหมักน้ำตาลด้วยยีสต์นั้นจะถูกระเหยออกไปในช่วงระยะเวลาการอบขนมปัง ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะซึมผ่านผนังเซลล์ของยีสต์ออกมา โดยในช่วงแรกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะละลายน้ำ (ที่มีอยู่ในปริมาณน้อย) ในโด จนกระทั่งน้ำนั้นอิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมออกมา

ใหม่ จะออกมาในรูปของฟองก๊าซ ซึ่งฟองก๊าซเหล่านี้จะมีตัวทั้งก้อนโดและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ โดยที่มีขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการพองตัวของโด (วราวุฒิและรุ่งนภา, 2532) เนื่องจากโดมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์ผลิตขึ้น โครงสร้างของก้อนโดจึงมีลักษณะมีเซลล์แก๊สที่คงรูปอยู่ได้ในระหว่างการหมักและการพักก้อนโด เมื่อโดอยู่ในระยะพักตัว (proofing period) น้ำตาลที่มีอยู่เดิมในแป้งจะถูกใช้ไปหมด ในขณะที่น้ำตาลถูกใช้ เอนไซม์ในโดจะช่วยผลิตน้ำตาลออกมาด้วย เมื่อนำโดที่พักตัวแล้วเข้าเตาอบ เอนไซม์จะยังคงทำงานต่อไปอีกในครั้งแรกของการอบ และตายในเวลาต่อมา (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544)

ช่วงอบขนมปัง

แบ่งการเกิดขนมปังออกเป็น 3 stage โดยพิจารณาที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเป็นหลัก ดังนี้

Stage ที่ 1 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้น (25°C) จนถึง 60°C

Stage ที่ 2 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งที่ ประมาณ 98°C และ

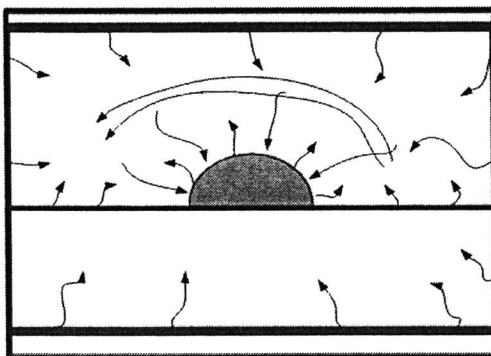
Stage ที่ 3 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังคงที่ที่ 98-99°C และคงอุณหภูมิเตาอบเป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิที่ผิวขนมปังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบ (Therdthai, et al., 2002)

เมื่อให้ความร้อนกับโด ความร้อนในช่วงแรกของการอบจะกระตุ้นการทำงานของยีสต์และเอนไซม์ให้เกิดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้น จึงเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์เสริมขึ้นมา ทำให้โดพองตัวมากขึ้น โดยปกติยีสต์จะหยุดการทำงานที่ 43°C และจะตายที่อุณหภูมิ 54°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักไว้ในโด จะถูกปลดปล่อยออกสู่ภายนอก (ความดันต่ำกว่า) ทำให้เกิดโพรงอากาศขึ้นภายในเนื้อขนมปัง (จินตนาและอรอนงค์, 2544)

ในระหว่างการอบอุณหภูมิภายในของโดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ พลังงานความร้อนที่ผิวโดได้รับมีทั้งพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี (Emission Energy) จากผนังเตาอบซึ่งได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ (ผิวของโดจะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมาเช่นกันแต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับการแผ่รังสีที่เกิดจากฮีตเตอร์หรือผนังของเตาอบ) และความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน (Convection Energy) ของอากาศร้อนที่อยู่รอบๆ โด เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของโดมีค่าสูงขึ้นความร้อนจะเกิดการถ่ายเทจากผิวชั้นนอกเข้าสู่ด้านในโดยอาศัยการนำความร้อน (Conduction Energy) ผ่านชั้นเนื้อโด โดยความร้อนจะถูกส่งผ่านชั้นเนื้อโดแต่ละชั้นจนกระทั่งถึงจุดกึ่งกลาง เมื่อเม็ดแบ่งได้รับความร้อนจะค่อยๆ พองตัวขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิที่กึ่งกลางโดมีค่าประมาณ 60°C เม็ดแบ่งจึงเริ่มหลอมละลายและแตกตัวเป็นเจลหรือเกิดกระบวนการ gelatinization ขึ้น (การเกิด gelatinization จะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 55°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 85°C โดยประมาณ) (Therdthai, et al., 2002)

ในระหว่างที่แป้งสาลีเกิดเจลนั้นจะดึงน้ำจากโดมาทำให้กลูเตนสูญเสียน้ำเปลี่ยนสภาพจากเดิมที่เคยยืดหยุ่นกลับแข็งตัวขึ้นทำให้ได้โครงร่างของเซลล์ที่มีรูพรุน ในขณะเดียวกันเอนไซม์และยีสต์จะค่อยๆ ตายไปเนื่องจากไม่สามารถทนความร้อนที่เพิ่มขึ้นได้ (Therdthai, et al., 2002)

อุณหภูมิที่ผิวโดจะค่อยๆ สูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าประมาณ 100°C น้ำที่อยู่บริเวณผิวจึงเริ่มระเหยออก อัตราการระเหยของน้ำจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ และหยุดการระเหยเมื่อผิวของโดเกิด crust ขึ้นอย่างสมบูรณ์เนื่องจากความดันไอที่ผิวมีค่าต่ำมาก โดยอุณหภูมิที่ผิวที่ผิวโดในช่วงนี้มีค่าประมาณ 110-125°C (Arpita et al., 2007) เมื่ออุณหภูมิที่ผิวขนมปังมีค่าประมาณ 150-205°C จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือเกิดสีน้ำตาลขึ้น (Maillard or browning Reaction) ทำให้สีผิวของขนมปังค่อยๆ กล้ำขึ้น พร้อมกับเกิดการระเหยของสารอินทรีย์ให้กลิ่นรส และสุดท้ายที่สุดโดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักของก้อนโด 9-10% เนื่องจากการระเหยของน้ำและสารอื่นๆ (Therdthai, et al., 2002)



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนสู่ขนมปังในระหว่างการอบ

เมื่อเกิด crust ขึ้นที่ผิวขนมปัง ไอน้ำที่อยู่ข้างในจะไม่สามารถระเหยสู่ภายนอกได้ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจึงกลับเข้ามาเกิดการควบแน่นขึ้นที่กึ่งกลางขนมปัง(เนื่องจากที่กึ่งกลางขนมปังมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C) การเกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำเข้าสู่ด้านในของขนมปังมีผลทำให้ขนมปังเกิดการแยกชั้นเป็น crust และ crumb อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 100°C (Therdthai, et al., 2002) โดยที่ crust เป็นส่วนของเปลือกที่อยู่ด้านนอกขนมปัง มีความชื้นต่ำมาก และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ ส่วน crumb เป็นส่วนที่อยู่ด้านในขนมปังถัดเข้าไปจาก crust มีความชื้นค่อนข้างคงที่และอุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 100°C ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (Zanoni and Peri, 1993)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมปัง

Therdthai, et al., (2002, 2004) ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละ zone ของการอบขนมปัง (ขนมปังแบบไวท์แซนวิช) แบ่งกระบวนการเกิดขนมปังออกเป็น 4 zone ดังแสดงรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเป็นหลักและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและระยะเวลาในการอบขนมปังต่อการสูญเสียน้ำหนัก สีและ

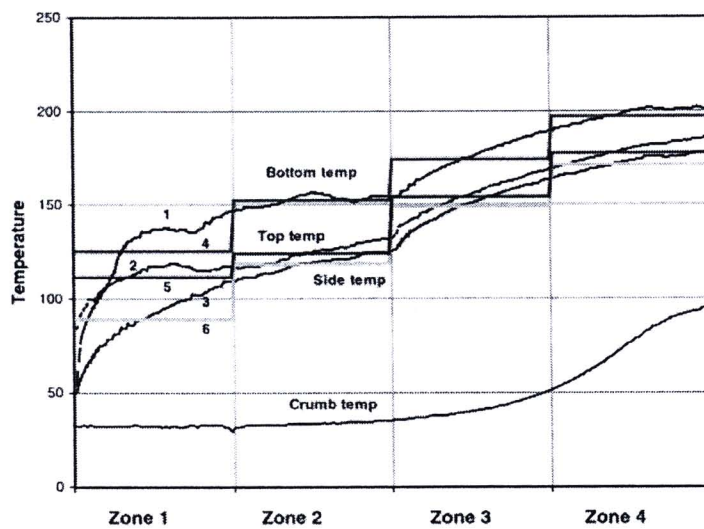
การเกิด gelatinization ของขนมปังในระหว่างการอบ จากการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิที่ผิวใน zone ต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด คือ 115°C 130°C 156°C และ 176°C ตามลำดับ โดยมีหลักในการพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิดังนี้

ช่วง zone 1 อุณหภูมิที่ผิวมีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 40°C) ทำให้ความดันไอดำมาก จึงมีการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างต่ำ ยังไม่เกิดการเปลี่ยนสีและกระบวนการ gelatinization ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใน zone 2 และ 3 ความดันไอก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างสูง โดย zone 3 จะมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักสูงสุด ซึ่งเกิดจากน้ำที่ผิวส่วนใหญ่เกิดการระเหยในช่วง zone นี้ โดยในช่วงสุดท้ายของ zone 3 จะเริ่มมีการเกิด gelatinization ขึ้น และเกิดขึ้นในอัตราที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

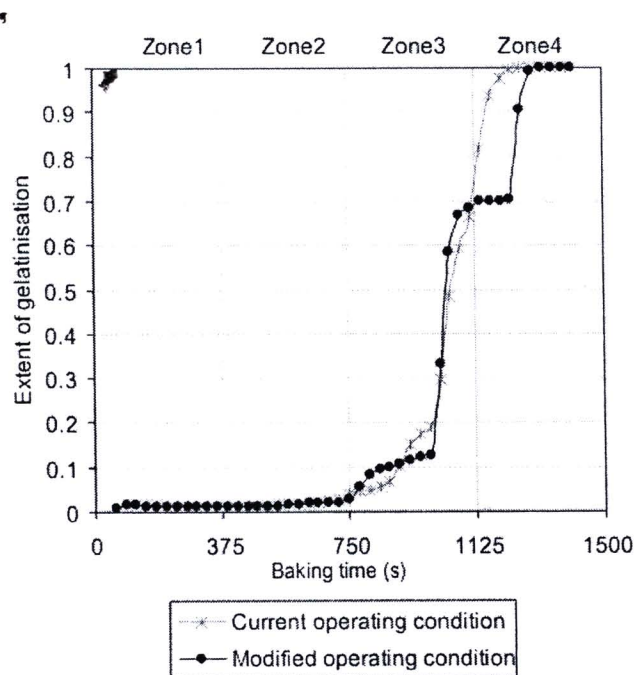
กระบวนการ gelatinization จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ และเกิดอย่างสมบูรณ์เมื่อสิ้นสุด zone 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 4 จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะความชื้นส่วนใหญ่ของเปลือกนอกขนมปัง ได้มีการระเหยไประหว่างการอบใน zone 3 ทำให้ความดันไอนี้ใน zone 4 มีค่าต่ำแม้อุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นก็ตาม

เมื่อพิจารณาที่สีของ crust พบว่าอุณหภูมิผิว ในช่วงที่ 3 และ 4 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดสีของ crust เปรียบเทียบกับ zone 1 และ 2 เพราะสีของ crust เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด จะเริ่มเกิดเมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ 150-205°C (Pylar, 1988) ดังนั้นหากต้องการให้สีผิวของ crust คล้ำขึ้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 3 และ zone 4 แต่หากเพิ่มอุณหภูมิใน zone 3 และ 4 ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมาก ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสีย น้ำหนักให้น้อยที่สุด ควรจะมีการลดอุณหภูมิในช่วง zone 1 และ 2 เพราะอุณหภูมิใน zone 1 และ 2 ไม่มีผลต่อการเกิดสีของ crust อย่างมีนัยสำคัญ

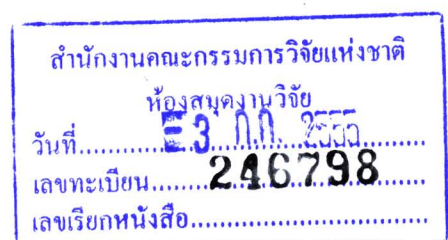
การปรับลดปริมาณการจ่ายพลังงานในช่วง zone 1 zone 3 และ zone 4 ลงประมาณ 3.5 % ในขณะเดียวกันปรับปริมาณการไหลของอากาศใน zone 3 เป็น 100 % จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวใน zone 1 และ zone 3 มีค่าต่ำลง ส่งผลให้อัตราการเกิด gelatinization ใน zone 3 ค่อย ๆ ลดลงด้วย และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอุณหภูมิใน zone 4 จะสูงขึ้น ทำให้ อุณหภูมิที่ crumb เพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นจนถึง 99°C (เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบ สีของเปลือกนอกขนมปัง (crust) อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่ง และการสูญเสียน้ำหนักลดลง 1.4 %



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิใจกลางขนมปัง ใน zone 1 2 3 และ 4 โดย (1) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างขนมปัง (2) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปัง (3) คืออุณหภูมิผิวด้านข้างขนมปัง (4) คืออุณหภูมิที่ใจกลางขนมปังโดยเฉลี่ย (5) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปังโดยเฉลี่ย (6) คืออุณหภูมิผิวด้านข้างขนมปังโดยเฉลี่ย



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงการเกิด gelatinization ของขนมปังเปรียบเทียบระหว่างการอบภายใต้เงื่อนไขเดิมและเงื่อนไขที่มีการปรับลดอุณหภูมิในช่วงของการอบ



2.6.2 การเฝ้าระวังและการตรวจสอบอุณหภูมิของอาหาร

Ibarra, et al. (2000) ได้ประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในสายการผลิตอาหาร โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการบันทึกภาพด้วยการแผ่รังสีความร้อนและประมาณค่าอย่างต่อเนื่องบนสายพาน ซึ่งช่วยให้อาหารมีความสะอาดปลอดภัย เหมาะสำหรับอาหารพร้อมรับประทาน

Fito, et al. (2004) ได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ในการสร้างแบบจำลองในการกำจัดน้ำ โดยการวัดการกระจายของอุณหภูมิในผลไม้ตระกูลส้ม ในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาจุดสุดท้ายของการทำแห้งและสามารถพัฒนาไปเป็นระบบควบคุมแบบออนไลน์ (Gowen, et al., 2010)

Meyer, et al. (1999) ใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัสในการประมาณค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ (เนื้อไก่ไร้หนัง ไร้กระดูก) ตัวอย่างเนื้อไก่ที่ใช้คือเนื้อหน้าอก โดยวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของชั้นเนื้อไก่ ซึ่งอุณหภูมินี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่และเวลาในการแช่เย็นวัดอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ในช่วงความยาวคลื่น $3.4\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ (ไม่สนใจไอน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวเนื้อไก่) จากนั้นใช้การวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายใน อุณหภูมิที่ผิว และระยะเวลาในการแช่เย็นจากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปทดสอบกับการทำงานจริง ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ได้จริง