รังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร
Infrared Radiation and Applications in Food Industries

วัชรินทร์ ดงบัง*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
Watcharin Dongbang*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

บทคัดย่อ

บทความนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายหลักการพื้นฐานของรังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยอธิบายหลักการของรังสีได้แก่ กฎของแพลงค์ กฎการกระจัดของวีน และกฎของสเตฟัน-โบลทซ์มันน์ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังอธิบายถึงคุณลักษณะการดูดกลืนรังสี แฟคเตอร์การลดทอนและสภาพการทะลุผ่านของรังสี สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของตัวทำความร้อนในกระบวนการต่างๆ เช่น การอบ การคั่ว และ การอบแห้ง เป็นต้น พบว่ารังสีอินฟราเรดมีลักษณะเด่นคือถ่ายความร้อนสู่อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลดเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นอกจากนี้ผลิตผลหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วมีคุณภาพดีกว่า

คำสำคัญ : รังสี อินฟราเรด การอบแห้ง

Abstract

The objective of this paper was to describe the principle of infrared radiation and applications in food industry. To achieve the purposes, the principle of radiation, i.e., Plank's law, Wien's displacement law, and Stafan - Boltmann's law were described. In addition, the characteristics of absorption were described, i.e., attenuation factor and permeability. Applications in food industries, the infrared heaters were widely used in thermal processes, e.g., baking, roasting, and drying. It was found that the advantage of infrared radiation was the efficient heat transfer to the food that reduces the processing time and energy costs. In addition, the products after processing had the best quality.

Keyword : radiation, Infrared, drying

***E-mail:** Watcharin@gmail.com

บทนำ

การแผ่รังสี (Radiation) คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากสสาร (Matter) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromanatic wave) หรือโฟตอน (Photon) เนื่องมาจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอีเล็กตอนในอะตอมหรือโมเลกุล เป็นการถ่ายเทพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยสารตัวกลาง ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเท่ากับความเร็วแสง และเกิดได้ในสุญญากาศ การถ่ายเทพลังงานความร้อนนั้นเกิดจากรังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุต่างๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวมันเองและอุณหภูมิที่ล้อมรอบ (Yunus & Cengel, 2006) รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) เป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (John & Beckman, 2006) สามารถแยกตามความยาวของคลื่นได้ 3 ระดับ คือรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near-infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.78-1.4 μm รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (Mid-infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 1.4-3 μm และรังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (Far-infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 3-1000 μm

กระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารในนั้นเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว มักจะถูกใช้ในรูปของตัวทำความร้อน (Sakai & Mao, 2006) ความยาวคลื่นระหว่าง 2.5-30 μm (Shimizu & Igarashi, 1991) ความร้อนจะให้กับอาหารโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศและถูกดูดกลืนโดยอาหาร คุณลักษณะเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้แก่ ถ่ายความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพจึงสามารถช่วยลดเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน อากาศภายในอุปกรณ์ไม่ได้ถูกทำให้ร้อนและด้วยเหตุนี้อุณหภูมิอากาศโดยรอบจึงสามารถคงที่อยู่ในระดับปกติ มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดกะทัดรัดและทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งสามารถควบคุมได้ง่ายและปลอดภัย ควบคุมความร้อนได้โดยตรงตามที่ต้องการ เป็นต้น (Sakai & Mao, 2006)

บทความนี้ได้เรียบเรียงขึ้นมีวัตถุประสงค์ เพื่ออธิบายหลักการพื้นฐานของรังสีอินฟราเรดและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารดังรายละเอียดต่อไปนี้

หลักการของความร้อนจากรังสีอินฟราเรด

กฎของแพลงค์ (Plank's law) กล่าวถึงวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K (-273°C) มีพลังงานภายในตัวและมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแปรผกผันกับอุณหภูมิ วัตถุดำมักจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวัตถุจริง นิยามของวัตถุดำ คือวัตถุที่สามารถดูดกลืน (Absorb) และเปล่ง (Emit) รังสีออกมาจากตัวเองได้อย่างสมบูรณ์ไม่ว่าที่ความยาวคลื่นหรือทิศทางใด วัตถุดำจึงเป็นเพียงวัตถุในอุดมคติเท่านั้น เพราะว่าวัตถุที่มีอยู่จริงทุกชนิดจะดูดกลืนและเปล่งรังสีได้น้อยกว่าวัตถุดำ (John & Beckman, 2006) เมื่อวัตถุดำถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ T พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกเปล่งรังสีออกจากผิวของวัตถุ พลังงานนี้มีการแพร่กระจายตัวซึ่งเป็นไปตามกฎของแพลงค์ ดังนี้

$$E_\lambda = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{[exp(ch/\kappa\lambda T)-1]} \qquad (1)$$

เมื่อ E_λ คือ พลังงานของวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และเวลา ที่ความยาวคลื่น λ ถึง $\lambda + d\lambda$ ส่วน h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ $(h = 6.6256x10^{-34}\ J.s)$ c คือ ความเร็วแสง $(c = 2.998x10^{8}\ m/s)$ κ คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) $(\kappa = 1.3806503x10^{-23}\ J/K)$ และ T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์วัตถุ สมการที่ (1) จะเห็นได้ว่าพลังงานที่แผ่รังสีมีค่าสูงขึ้นเมื่อวัตถุดำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

กฎการกระจัดของวีน (Wien's displacement law) กล่าวถึงความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุด (Peak wavelength) จะลดลงเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุด λ_{max} กับวัตถุอุณหภูมิ T สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์สมการที่ (1) ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น λ ที่วัตถุอุณหภูมิ T มีค่าคงที่ และกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ตามกฎการกระจัดของวีน ดังนี้

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \qquad (2)$$

กฎของสเตฟัน-โบลทซ์มันน์ (Stafan-Boltzmann's law) กล่าวถึงพลังงานที่แผ่รังสีจากวัตถุดำทั้งหมด ที่อุณหภูมิ T หาได้จากการอินทิเกรทสมการที่ (1) ตลอดความยาวคลื่น λ ตามกฎของสเตฟัน - โบลทซ์มันน์ ดังนี้

$$E_b = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \frac{2\pi c^4 T^4}{c^2 h^3}\left(\frac{\pi^4}{15}\right) \equiv \sigma T^4 \qquad (3)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่สเตฟัน-โบลทซ์มัน $(\sigma = 5.6697x10^{-8}\ W/m^2K^4)$ สภาพการเปล่งรังสี (Emissivity, ε) จากวัตถุที่แท้จริงจะมีค่าน้อยกว่าวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน เป็นไปตามอัตราส่วนของพลังงานที่

แผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุใดๆ หารด้วยพลังงานที่แผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma T^4} \quad (4)$$

หรือจัดรูปสมการใหม่

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

เมื่อ ε คือ สภาพการเปล่งรังสีมีค่าระหว่าง 0-1 และวัตถุในสมการนี้คือวัตถุสีเทาที่มีสภาพการดูดกลืนรังสี (Absorptivity, β) ภายใต้การสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์สภาพการเปล่งรังสีและสภาพการดูดกลืนรังสีคลื่นเดี่ยว (Monochromatic) ของวัตถุเป็นไปตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) ส่วนพลังงานที่ไม่ถูกดูดกลืนจะถูกสะท้อนออกไปตามสภาพการสะท้อนรังสี (Reflectivity, γ) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\varepsilon = \beta = 1 - \gamma \quad (6)$$

คุณลักษณะการดูดกลืนรังสีของอาหาร

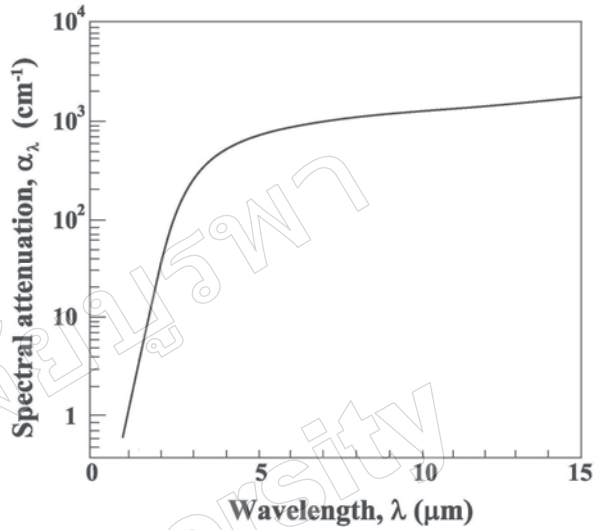
อาหารประกอบด้วยน้ำและอื่นๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันเป็นต้น คุณลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น พิจารณาจากการสั่นสะเทือนของพันธะภายในโมเลกุลของน้ำในอาหาร เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรด ก็จะเกิดการดูดกลืนรังสีความร้อนขึ้น การสั่นสะเทือนของพันธะภายในโมเลกุลของน้ำในอาหารมี 3 ลักษณะคือ การสั่นสะเทือนที่ยืด-หดแบบสมมาตร การสั่นสะเทือนที่ยืด-หดแบบไม่สมมาตร และการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนมุมแบบสมมาตร อาหารโดยทั่วไปจะดูดกลืนพลังงานที่แผ่รังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นมากกว่า 2.5 μm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูง ผ่านทางกลไกของการเปลี่ยนแปลงสภาพของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลเป็นพลังงานความร้อน (Shimizu & Igarashi, 1991)

แฟคเตอร์การลดทอนและสภาพการทะลุผ่าน

สภาพการทะลุผ่าน (Permeability) ของพลังงานที่แผ่รังสีเข้าไปในอาหารคือปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพทางความร้อน เพราะว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกสะท้อนออกไปบางส่วน และบางส่วนจะถูกส่งผ่านเข้าไปในอาหาร พลังงานที่ส่งผ่านเข้าไปในอาหารจะถูกลดทอน (Attenuation) ตามระยะความลึกของการทะลุผ่าน ปัจจัยที่ลดทอนนั้นหาได้จากการดูดกลืนพลังงานภายในอาหารซึ่งเป็นฟังค์ชันของความหนาของผิวเป็นไปตามกฎของแลมเบิรท์ (Lambert's law) ดังนี้

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} \exp(-\alpha_\lambda x) \quad (7)$$

เมื่อ I_λ คือ ฟลักซ์พลังงานที่ความยาวคลื่น λ และ α_λ คือค่าการลดทอนพลังงานเชิงสเปกตรัม (Irvine & Pollack, 1968) x คือระยะความลึกของการทะลุผ่าน สำหรับน้ำ (Water) ที่ความยาวคลื่น λ ต่างๆ มีการลดทอนพลังงานเชิงสเปกตรัม (Spectral attenuation) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ค่าการลดทอนเชิงสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของน้ำ (Sakai & Mao, 2006)

การส่งผ่านเชิงสเปกตรัม (Spectral transmittance) $\gamma_\lambda(x)$ คืออัตราส่วนของพลังงานที่ส่งผ่านได้ต่อพลังงานที่ตกกระทบ มีสมการดังนี้

$$\gamma_\lambda(x) = I_\lambda / I_{\lambda 0} = \exp(-\alpha_\lambda x) \quad (8)$$

ถ้ากำหนดให้ $\gamma_\lambda(x) = 0.01$ และค่าการลดทอนพลังงานเชิงสเปกตรัม α_λ = 5, 10 และ 15 cm^{-1} แทนค่าสมการที่ (8) จะได้ระยะความลึกของการทะลุผ่าน x = 0.921, 0.461, และ 0.307 cm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณข้างต้นพบว่าระยะความลึกของการทะลุผ่าน (x) มีค่าลดลงซึ่งแปรผกผันกับค่าการลดทอนพลังงานเชิงสเปกตรัม (α_λ) ขณะที่ค่า α_λ จะแปรผันโดยตรงกับความยาวคลื่น (ดังภาพที่ 1) แสดงให้เห็นว่าสภาพการส่งผ่านของพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดนั้น ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเป็นอย่างมาก ดังนั้นสภาพการทะลุผ่านเฉลี่ยได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (8) ตลอดความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$\gamma_{av}(x) = \frac{\int_0^\infty I_\lambda d\lambda}{\int I_{\lambda 0} d\lambda} = \frac{\int_0^\lambda \exp(-\alpha_\lambda x) d\lambda}{\lambda T^4} \quad (9)$$

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จากสมการที่ (9) สภาพการทะลุผ่านเฉลี่ย $\gamma_{av}(x)$ จะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับอุณหภูมิของตัวทำความร้อน เนื่องจากพลังงานที่เปล่งรังสี $I_{\lambda 0}$ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ กล่าวคือสภาพการทะลุผ่านจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิของตัวแผ่รังสีมีค่าลดลง สำหรับระยะความลึกของการทะลุผ่านในอาหารต่างๆ ถูกรวบรวมไว้แล้วในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความลึกของการทะลุผ่านของรังสีอินฟราเรด (Ginzburg, 1969)

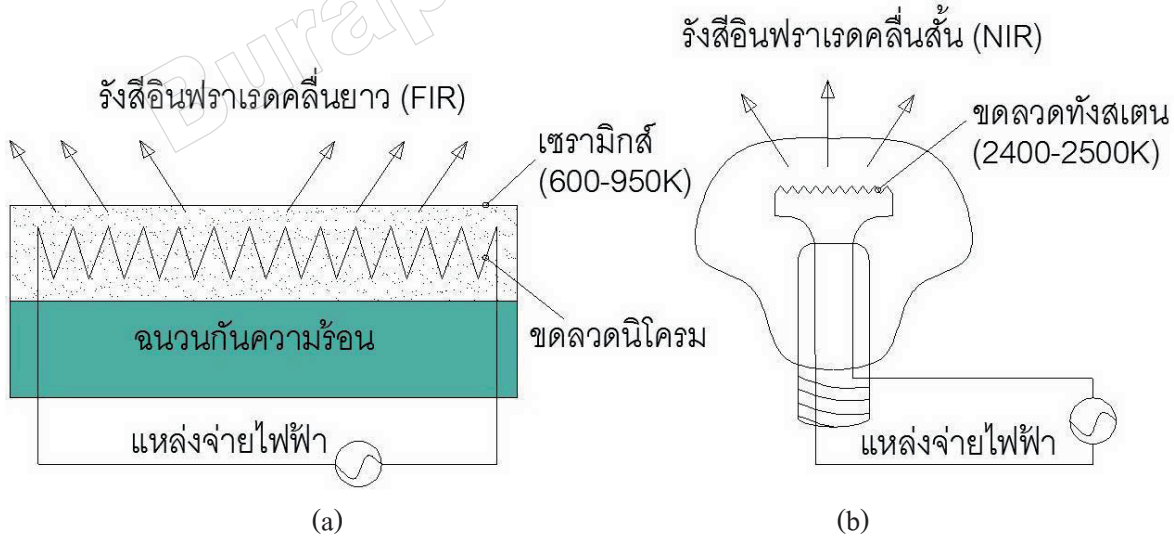
ผลิตภัณฑ์	ความลึกของการทะลุผ่าน x, (mm)
แครอท	1.5
เนย	4 - 6
แอปเปิลสด	4.1-7.4
มันฝรั่งสด	6
มันฝรั่งแห้ง	15-18
ขนมปัง	11-12

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า แครอท ซึ่งเป็นอาหารที่มีผิวค่อนข้างเรียบกว่าอาหารชนิดอื่นๆ รังสีอินฟราเรดจะทะลุผ่านได้น้อย เพราะว่าความเรียบของผิวจะมีสภาพการสะท้อนรังสีออกไปได้มาก ส่งผลให้สภาพการดูดกลืนรังสีลดลง

การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอาหารนั้น มักจะใช้ตัวทำความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (FIR) มากกว่าตัวทำความร้อนจากรังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (NIR) เพราะว่าอาหารจะดูดกลืนพลังงานที่แผ่รังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความคลื่นที่ยาวกว่า ตัวทำความร้อนที่อาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (FIR) มักจะทำด้วยลวดนิโครม (Nichrome) และหุ้มด้วยเซรามิกส์ (Ceramics) ดังภาพที่ 2(a) ขดลวดนิโครมมีอุณหภูมิระหว่าง 600-950 K ความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุดระหว่าง 3-5 μm ในขณะที่ตัวทำความร้อนที่อาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (NIR) เช่น หลอดไฟฟ้าที่ทำด้วยขดลวดทังสเตน (Tungsten) ดังภาพที่ 2(b) ขดลวดทังสเตนมีอุณหภูมิระหว่าง 2400-2500 K ความยาวคลื่นของพลังงานที่แผ่รังสีสูงสุดระหว่าง 1.1-1.3 μm (Sasaori, 1988)

การประกอบอาหาร เช่น การอบ การคั่ว และการอบแห้ง โดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้ถูกเผยแพร่ในหลายบทความดังนี้ การอบขนมปัง (Nakamura, 1999) และขนมคุกกี้ (Kiyohira & Yoneda, 1999) การคั่วกาแฟ (Kino, 1999) ชาเขียว (Takeo, 1999) การปรุงขนมพายเนื้อวัว (Sheridan & Shilton, 2002) การคั่วสาหร่ายที่กินได้ (Kimura, 1999) และการให้ความร้อนกับการอบเมล็ดถั่ว (Oladiran *et al*., 2001) เป็นต้น



ภาพที่ 2 (a) Ceramics FIR heater และ 2(b) NIR ramp (Sasaori, 1988)

ลักษณะเด่นของความร้อนจากรังสีอินฟราเรดนั้น คือถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพไปสู่อาหารด้วยเวลาน้อย และใช้พลังงานน้อยกว่าขดลวดไฟฟ้าแบบดั้งเดิมหรือเตาแก๊ส มีรายงานการวิจัยที่ได้กล่าวถึงลักษณะเด่นของอินฟราเรดดังนี้ งานวิจัยการอบบิสกิต (Wade, 1987) ด้วย NIR พบว่าบิสกิต(Bisuit) สามารถอบโดยใช้เวลาประมาณครึ่งของเวลาที่ใช้ในเตาอบแบบดั้งเดิม งานวิจัยการประกอบอาหารจากผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ (Sheridan & Shilton, 1999) โดยการเปรียบเทียบระหว่างเตาแก๊สแบบธรรมดากับเตาแก๊สแบบอินฟราเรด ซึ่งอาศัยหลักการใช้แก๊สเผาแผ่นเซรามิกให้ร้อนแดงแล้วแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวออกมาใส่ภาชนะประกอบอาหาร พบว่าเตาแก๊สแบบอินฟราเรดคลื่นยาวที่นำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนได้ช่วยลดการสิ้นเปลืองแก๊สประมาณ 55% และงานวิจัยเปรียบเทียบสมรรถนะของ FIR และเตาอบแบบดั้งเดิม (Sasaki, 1992) โดยการทดลองอบแห้งข้าวเกรียบและการให้ความร้อนหอยทะเล (Oysters) ด้วยแหล่งความร้อนต่างกันคือเตาแก๊ส LPG และตัวทำความร้อนแบบ FIR โดยปกติหอยทะเลมักจะถูกแช่แข็งเพื่อถนอมอาหารและละลายน้ำแข็งด้วยเตาแก๊ส LPG ซึ่งใช้เวลา 15 นาที ขณะที่การละลายน้ำแข็งด้วยตัวทำความร้อนแบบ FIR ใช้เวลาเพียง 6 นาที เช่นเดียวกันกับการอบแห้งข้าวเกรียบด้วยตัวทำความร้อนแบบ FIR จะใช้เวลาน้อยกว่า ด้วยเวลาที่ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนที่สั้นกว่าจะช่วยลดการสูญเสียคุณค่าของสารอาหารได้ ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเตาอบแบบ FIR ดีกว่าในเทอมของค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (ตารางที่ 2) และความเล็กกะทัดรัด

การอบแห้ง (Drying) โดยอาศัยความร้อนจากอินฟราเรดประสบความสำเร็จอย่างมากสำหรับผลิตผลจำพวกผักเพราะว่าสามารถคงคุณภาพหลังการอบแห้งได้ดี โดยเฉพาะสีของผักและสารอาหารเป็นต้น เคมีภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงในคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) หรือแคโรทีน (Carotenoids) มีสาเหตุจากความร้อนและการออกซิเดชัน (Oxidation) ระหว่างการอบแห้ง งานวิจัยอัตราการเสื่อมคุณภาพของเบต้าแครอทีน (β-carotene) และคลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) ซึ่งเป็นเม็ดสี (Pigment) ซึ่งมีอยู่ในผัก (Itoh & Han, 1994) โดยตัวอย่างสำหรับทดลองถูกให้ความร้อนด้วยเครื่องกำเนิดความร้อนแบบ FIR และ NIR ที่ 60°C ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบกับความร้อนจากแสงแดด (Solar light) และลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ด้วย พบว่าในกรณีของแสงแดดเม็ดสีถูกทำลายไปอย่างมาก อธิบายได้ว่าอัตราการสลายตัว (Decomposition) ของเม็ดสีซึ่งได้รับความร้อนจากรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray) และแสงแดดมีค่าสูงมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของเบต้าแครอทีนและคลอโรฟิลล์ เอ โดยใช้เครื่องกำเนิดความร้อนแบบ FIR พบว่ามีค่าต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า FIR มีความได้เปรียบและเหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งผัก

สรุป

รังสีอินฟราเรดนั้นสามารถทะลุผ่านอาหารแต่ละชนิดด้วย ระยะความลึกประมาณ 1-18 mm พลังงานที่ส่งผ่านเข้าไปในอาหารจะถูกลดทอนตามระยะความลึกของการทะลุผ่าน ปัจจัยที่

ตารางที่ 2 สมรรถนะเชิงเปรียบเทียบเตาอบแบบ FIR (A) และเตาอบแบบดั่งเดิม (B) (Sasaki, 1992)

รายการ	FIR (A)	LPG (B)	(A/B) 100%
(1) เตาอบอบข้าวเกรียบ			
ความสิ้นเปลืองแคลอรี่ (kJ/h)	2.23×10^5	8.36×10^5	26.7
ความสิ้นเปลืองพลังงาน (¥/h)	1336	2506	54.5
อัตราการผลิต (Pieces/h)	10,000	10,000	100
เวลาในการอบ (min)	10	15	66.7
(2) อุปกรณ์ให้ความร้อนหอยทะเล			
ความยาวของอุปกรณ์ (m)	7.4	16.4	45
ความสิ้นเปลืองพลังงาน (¥/h)	1,178	1470	80
อัตราการผลิต (kg/h)	100	100	100
เวลาในการให้ความร้อน (min)	6	15	40

ลดทอนนั้นหาได้จากการดูดกลืนพลังงานภายในอาหารซึ่งเป็นฟังค์ชันของความหนาของผิว การประยุกต์ใช้ความร้อนจากอินฟราเรดถูกคาดหมายว่าจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากความต้องการรักษาคุณค่าทางโภชนาการตลอดจนลักษณะทางกายภาพและรสชาติที่ดีของอาหาร นอกจากนี้แล้วยังใช้พลังงานน้อยกว่าขดลวดไฟฟ้าแบบดั้งเดิมหรือเตาแก๊ส เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Ginzburg, A. (1969). Application of infrared radiation in food processing. In *Chemical and Process Engineering Series*. London: Leonard Hill.

Irvine, M., & Pollack, J. (1968). Infrared optical properties of water and ice spheres. *Icaus, 8*, 324-360.

Itoh, K., & Han, C. (1994). Drying of agricultural products using long wave infrared radiation Part 1. Fundamental heating characteristics of long wave infrared radiation. *The Journal of the Society of Agricultures, Japan, 25*, 39-45.

Duffie, J.A, & Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. USA: Wiley.

Kimura, Y. (1999). Far infrared roasting of lumps of unprocessed “Nori”, edible seaweed. *The Food Industry, 42*, 32-37.

Kino, T. (1999). Application of far-infrared heating in roasting of coffee beans. *The Food Industry, 42*(29-38).

Kiyohira, K., & Yoneda, T. (1999). Rice cookies baking machine and chikuwa baking machines. *The Food Industry 42*, 52-61.

Nakamura, A. (1999). Far-infrared heating and heating process in bread baking. *The Food Industry, 42*, 46-51.

Sakai, N., & Mao, W. (2006). Infrared Heating. In Da-Wen & Sun (Eds.), *Thermal food processing* (pp. 493-525). USA: Taylor & Francis Group.

Sasaki, T. (1992). The application of far infrared to food industry. In T. Omori (Ed.), *Bioelectromanetics and Its Applications* (pp. 376-384). Tokyo: Fuji Techno-System.

Sasaori, N. (1988). Principle of utilization of far infrared radiation and measurement of equipment performance. *Japan Food Science, 27*, 23-29.

Sheridan, P., & Shilton, N. (1999). Application of far infrared radiation to cooking of meat products. *Journal of Food Engineering, 41*, 203-208.

Sheridan, P., & Shilton, N. (2002). Analysis of yield while cooking beefburger patties using far infrared radiation. *Journal of Food Engineering, 51*, 3-11.

Shimizu, M., & Igarashi, H. (1991). Far-Infrared radiation technology. *New food Industry, 33*, 23-30.

Takeo, T. (1999). Firing and roasting of green tea. *The Food Industry, 42*, 18-24.

Wade, P. (1987). Biscuit baking by near infrared radiation. *Journal of Food Engineering, 6*, 165-175.

Cengel, Y.A. (2006). *Heat and Mass Transfer* (3 ed.). Singapore: MaGrawHill.

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University