

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือ การลดปริมาณความชื้น (moisture content) ของผลิตภัณฑ์เพื่อเก็บรักษาและป้องกันการเน่าเสียในช่วงเวลาหนึ่ง กระบวนการอบแห้งประกอบด้วย 2 กระบวนการที่สำคัญคือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และถ่ายเทความชื้นภายในเนื้อผลิตภัณฑ์มาที่ผิวและออกสู่อากาศภายนอกผลิตภัณฑ์ กระบวนการลดปริมาณความชื้นโดยทั่วไปของเหลวภายในเนื้อผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ออกมายังพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงผิว (surface force) ส่วนไอน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ออกมาเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) และความดันไอ (partial pressure of vapor) ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์กับอากาศร้อน การลดลงของความชื้นในผลิตภัณฑ์เป็น 3 ช่วง ดังนี้

**2.1.1 ระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง (initial period)** ในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน (thermodynamic equilibrium) และมีการระเหยของความชื้นเกิดขึ้นบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

**2.1.2 ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ (constant-rate period)** ช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์จะมีค่าคงที่ และความชื้นที่บริเวณผิวจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวและมีปริมาณที่สม่ำเสมอ โดยที่อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์มายังพื้นผิวมีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ โดยอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ (coefficient of diffusion) ของผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้งระยะนี้จะมีค่าคงที่

**2.1.3 ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำลดลง (falling-rate period)** ช่วงนี้ความชื้นที่ผิวผลิตภัณฑ์เริ่มไม่อิ่มตัว โดยอัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์ไปยังพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของความชื้นที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์ จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยที่คงที่มาเป็นช่วงที่มีอัตราการระเหยคงที่มาเป็นช่วงที่มีอัตราการระเหยลดลงเรียกว่า จุดความชื้นวิกฤต (critical moisture content) การระเหยของไอน้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อถึงจุดที่เรียกว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ซึ่งเป็นจุดที่ความชื้นที่ยังคงมีในผลิตภัณฑ์ไม่มีการสูญเสียให้กับอากาศภายนอกในสภาวะนั้นๆ

## 2.2 การอบแห้งด้วยสุญญากาศ

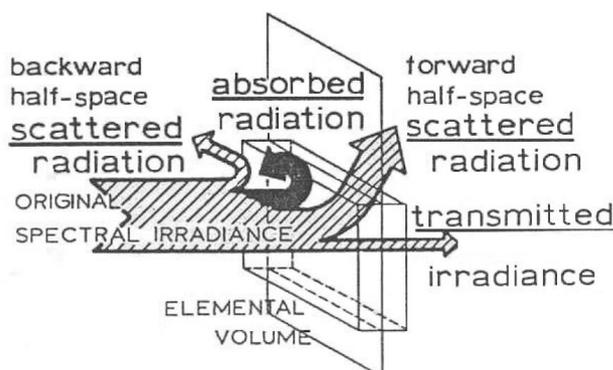
เมื่อห้องอบแห้งอยู่ในภาวะสุญญากาศ จะส่งผลให้ความดันไอของน้ำและความเข้มข้นของความชื้นในอากาศต่ำ เกิดความแตกต่างของความดันไอ (partial vapor pressure) และความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion) ระหว่างวัสดุอบแห้งกับอากาศ ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลไอน้ำที่ผิววัสดุอบแห้ง โดยการแพร่สู่อากาศ และของเหลวที่อยู่ในเนื้อวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิววัสดุด้วยการแพร่แคปิลลารี (capillary flow) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force) ของวัสดุ

โดยหลักการการอบแห้งด้วยสุญญากาศ ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้ง เนื่องจากภาวะความดันต่ำ สามารถทำให้น้ำในวัสดุกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งที่ความดันต่ำมากๆ จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องทำสุญญากาศ ดังนั้น การให้ความร้อนแก่วัสดุอบแห้งควบคู่กับความดันสุญญากาศ จะช่วยลดการใช้พลังงานในการทำสุญญากาศ และลดเวลาในการอบแห้ง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

## 2.3 การแผ่รังสีอินฟราเรด

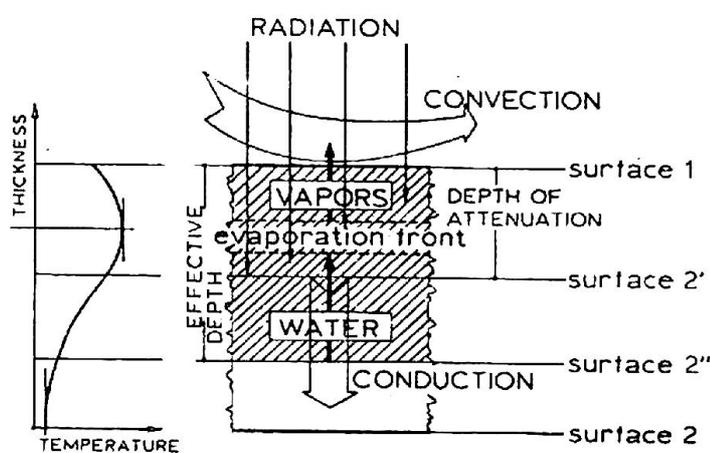
### 2.3.1 กลไกการแผ่รังสีอินฟราเรด

เมื่อรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบและแพร่กระจาย (propagate) ผ่านวัสดุ ทำให้เกิดการสูญหายของรังสี (extinction of radiation) เนื่องจากรังสีบางส่วนจะถูกวัสดุดูดกลืน (absorption) และเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนภายในตัววัสดุ บางส่วนเกิดการกระเจิง (scattering) ทำให้รังสีมีการหักเหจากทิศทางเดิม และส่วนที่เหลือจะเกิดการส่งผ่านวัสดุ (transmission) ลักษณะการสูญหายของรังสี แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การสูญหายของรังสี (Sandu, 1986)

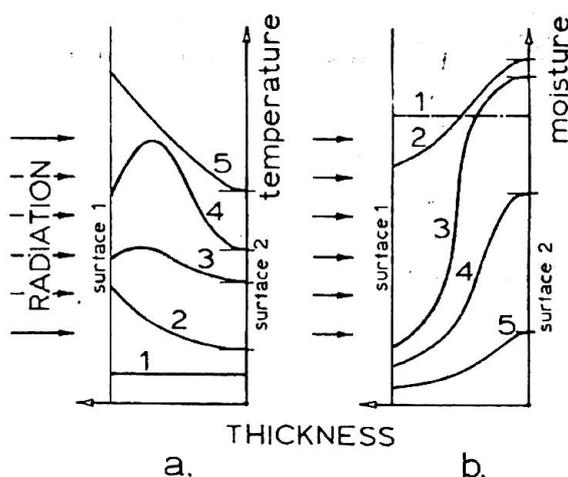
จากการศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนภายในเนื้อวัสดุ (Sandu, 1986) โดยจำลองการแผ่รังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิห้องเพื่ออบแห้งแผ่นของแข็งชื้น (moist solid plate) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 รังสีอินฟราเรดแบบโพลีโครเมติกจะแผ่ออกมาตกกระทบบนพื้นผิวของแผ่นของแข็งด้านหนึ่ง ขณะที่พื้นผิวด้านตรงข้ามจะสมมติว่าเป็นฉนวนแบบแอดิยาเบติก (adiabatic) มีกระบวนการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ และเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว (transient process) รังสีอินฟราเรดที่แผ่มากระทบบนพื้นผิวที่ 1 จะถูกแผ่นของแข็งชื้นดูดกลืน ทำให้อ่อนกำลังลงตามความลึก ซึ่งความลึกดังกล่าวนี้เรียกว่า ความลึกของการอ่อนกำลังลง (depth of attenuation) มีลักษณะเป็นชั้นตื้น ๆ (superficial layer) และเป็นบริเวณที่เกิดความร้อนเกือบจะคงที่ (an almost uniform heat-generation) ซึ่งโปรไฟล์อุณหภูมิ (temperature profile) จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลงนี้ ขณะเดียวกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นของแข็งชื้น โดยพื้นผิว 1 จะสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับอากาศโดยการพาความร้อน (convection) ซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนพื้นผิวที่ 2' จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็งชื้นโดยการนำความร้อน (conduction)



ภาพที่ 2.2 การอบแห้งแผ่นของแข็งชื้นด้วยการแผ่รังสี (Sandu, 1986)

เมื่อพิจารณาภาพที่ 2.3 ในสถานะเริ่มต้น (หมายเลข 1) จะพิจารณาว่าแผ่นของแข็งมีปริมาณความชื้นสม่ำเสมอ น้ำจะเกิดการระเหยในช่วงความลึกของการอ่อนกำลังลง (หมายเลข 2 และ 3) การถ่ายเทความชื้นเกิดขึ้นภายในแผ่นของแข็ง และด้านหน้าของบริเวณการระเหยน้ำในสถานะของเหลว และไอน้ำเคลื่อนที่สู่ด้านหน้าของการระเหยเนื่องจากแรงผลักดัน (driving force) แบบต่างๆ เช่น การแพร่โมเลกุล (molecular diffusion) การแพร่ความร้อน (thermal diffusion)

การแพร่แคปิลลารี (capillary diffusion) ที่กระทำพร้อมกัน ส่วนการเพิ่มของความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 (หมายเลข 2 และ 3) ซึ่งจะสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของแผ่นของแข็ง (หมายเลข 1) จะเกิดขึ้นระหว่างช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง เนื่องจากการแพร่ของน้ำในสถานะของเหลวเข้าสู่ภายในแผ่นของแข็ง ทำให้ความชื้นที่พื้นผิวที่ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าความชื้นเริ่มต้น จึงส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผล (effective depth) แพร่ออกมายังพื้นผิวที่ 1 ได้ช้า ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นข้อจำกัดของการถ่ายเทมวลเนื่องมาจากกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรด ดังนั้นวัสดุที่อยู่ในทิศทางของการแผ่รังสีตกกระทบนั้น จะต้องไม่มีความหนาแน่นมากกว่าความลึกประสิทธิผล ซึ่งเป็นชั้นที่ลึกที่สุดภายในวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปได้ดีที่สุด ส่วนน้ำที่อยู่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลจะเคลื่อนที่ออกมาเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นมากกว่าความลึกประสิทธิผล จะต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้ามาช่วย เช่น วิธีการแผ่รังสีเป็นช่วงๆ (intermittent irradiation method) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้ความชื้นที่อยู่ในชั้นที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลเกิดการแพร่ออกมา และส่งผลให้ความสามารถในการอบแห้งดีขึ้น หรืออาจจะใช้วิธีการแผ่รังสีอินฟราเรดมากกว่า 1 ทิศทาง

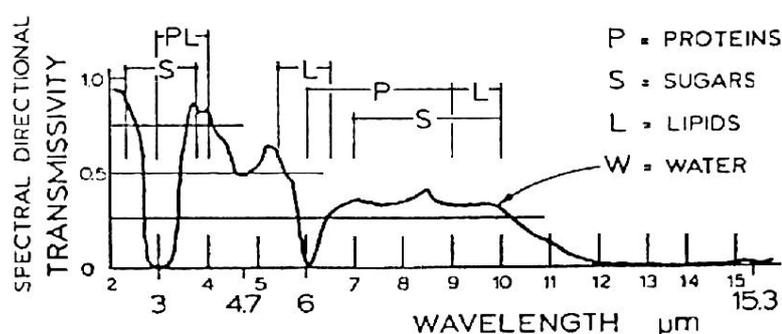


ภาพที่ 2.3 (a) โปรไฟล์อุณหภูมิ (b) โปรไฟล์ความชื้นของการอบแห้งแผ่นของแข็งด้วยการแผ่รังสีตามภาพที่ 2.2 เมื่อ 1 คือ สภาวะเริ่มต้น และ 2-5 คือ สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Sandu, 1986)

### 2.3.2 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยน้ำ

รังสีอินฟราเรดที่แผ่ไปยังวัสดุส่วนมากจะถูกดูดกลืนโดยชั้นฟิล์มบางๆ ของน้ำ น้ำแข็ง ไอน้ำ หรือสารละลายน้ำ (water solution) ที่มีอยู่ในแคปิลลารี (capillary) ภายในวัสดุหรือโดยไอน้ำที่เกิดขึ้นรอบๆ วัสดุ ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำที่สถานะแตกต่างกันจะ

ดูดกลืนรังสีที่ความเข้มแตกต่างกัน ไออน้ำที่ 0 °C สามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 1.14, 1.38 และ 1.87  $\mu\text{m}$  ได้น้อย แต่จะดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น 2.7 และ 6.3  $\mu\text{m}$  ได้ดี (Jamieson, 1963) และ (Saprow, 1970) ส่วนน้ำในสถานะของเหลว (liquid water) ที่ 25 °C จะดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น 1.19, 1.43, 1.94, 2.93, 4.72 และ 6.10  $\mu\text{m}$  ได้น้อย แต่จะดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่น 3, 4.7, 6 และ 15.3  $\mu\text{m}$  ได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 2.4 สำหรับการดูดกลืนรังสีของไออน้ำที่อุณหภูมิ 27-827 °C จะขึ้นอยู่กับมวลไออน้ำต่อพื้นที่ความดันและอุณหภูมิ ส่วนอากาศมีผลกระทบน้อยมากต่อการดูดกลืนรังสีของไออน้ำ



ภาพที่ 2.4 ย่านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญขององค์ประกอบหลักของอาหาร เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำในสถานะของเหลว (Sandu, 1986)

นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำมีผลต่อค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งแสดงดังตาราง 2.1 โดยน้ำในสถานะของเหลวจะเริ่มดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ตั้งแต่ฟิล์มที่มีความหนาบางๆ และที่ความหนา 10  $\mu\text{m}$  จะสามารถดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุด

ตารางที่ 2.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยฟิล์มน้ำ (Sandu, 1986)

ความหนาของฟิล์ม ( $\mu\text{m}$ )	ความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ )			
	3.0	4.7	6.0	15.3
1.2	0.80	0.04	0.30	-
3.0	0.97	0.10	0.55	-
10.0	1.00	0.35	1.00	1.00

### 2.3.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว

พลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวใดพื้นผิวหนึ่ง (i) เมื่อกระทบลงบนพื้นผิวที่สอง (j) อาจได้รับการดูดกลืนหรือสะท้อนกลับ แต่ถ้าพื้นผิวดังกล่าวเป็นวัตถุดำ รังสีซึ่งตกกระทบจะถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด ความร้อนจากการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งอาจถ่ายเทมายังอีกวัตถุหนึ่งได้บางส่วนหรือทั้งหมด สัดส่วนของรังสีความร้อนที่ตกกระทบพื้นผิว j ต่อรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิว i เรียกว่า view factor หรือ shape factor ( $F_{ij}$ ) การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดำที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถแสดงความสัมพันธ์อยู่ในสมการของสตีเฟน-โบลซ์แมน ดังสมการ (2.1)

$$Q_b = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$Q_b$	คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุดำ, W
$A_i$	คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ i, $m^2$
$F_{ij}$	คือ view factor หรือ shape factor ระหว่างพื้นผิว i และ j
$\sigma$	คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8}$ , $W/m^2 K^4$
$T_i$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว i, K
$T_j$	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิว j, K

การพิจารณาปัญหาการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ล้อมรอบด้วยพื้นผิวหลายอัน (enclosure) และเป็นพื้นผิวแท้จริง หรือพื้นผิวเทา (gray surfaces) ซึ่งมีการสะท้อนรังสีความร้อนออกจากทุกพื้นผิว โดยมีรังสีบางส่วนถูกดูดกลืนไว้เท่านั้น ในการวิเคราะห์จะสมมติว่าแต่ละพื้นผิวใน enclosure มีอุณหภูมิเท่ากันทุกจุด (isothermal) และตัวกลางระหว่างพื้นผิวภายใน enclosure สมมติให้เป็น nonparticipating medium คือ ไม่มีผลต่อรังสีความร้อน อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิภายใน enclosure ที่ประกอบด้วยพื้นผิว i และพื้นผิว j สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการของ สตีเฟน-โบลซ์แมน ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังสมการ (2.2)

$$Q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j A_j}} \quad (2.2)$$

เมื่อ

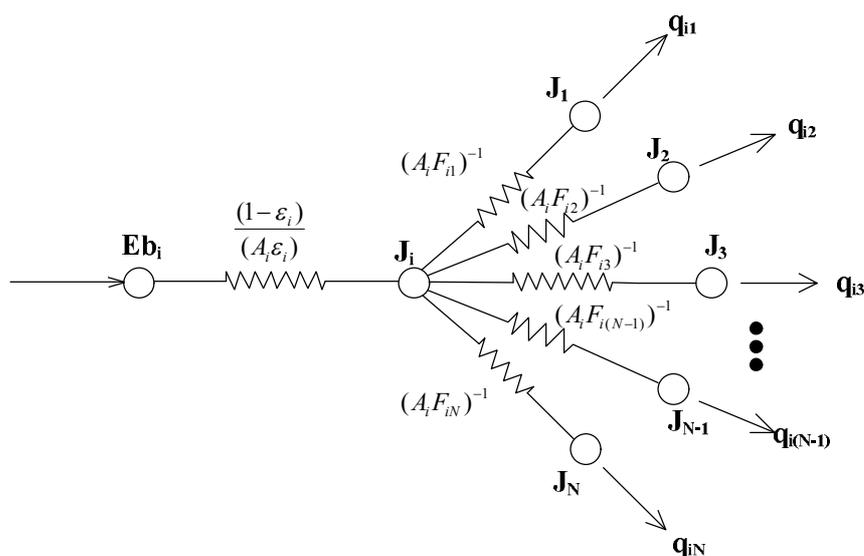
$Q_{ij}$  คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุ  $i$  และ  $j$ , W

$A_j$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ  $j$ ,  $m^2$

$\varepsilon_i$  คือ ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ  $i$

$\varepsilon_j$  คือ ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ของวัตถุ  $j$

ในกรณีที่ enclosure ประกอบด้วยพื้นผิวมากกว่าสองพื้นผิว การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 2.5 และอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิออกจากพื้นผิว  $i$  มีค่าเท่ากับผลรวมของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว  $i$  และพื้นผิวอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิว (emissive power) พลังงานรังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิว (surface radiosity) ค่าการแผ่รังสีและ shape factor ดังสมการ (2.3)



ภาพที่ 2.5 วงจรแสดงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว  $i$  และพื้นผิวอื่นๆ ใน enclosure

$$\frac{Eb_i - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}} = \sum_{j=1}^n \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (2.3)$$

โดย  $Eb_i$  คำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$Eb_i = \sigma T_i^4 \quad (2.4)$$

## 2.4 อัตราส่วนความชื้น

การคำนวณอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณโดยประมาณค่า โดยตั้งสมมติฐานว่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นหรือความชื้นที่เวลาใดๆ อัตราส่วนความชื้นคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $M_{in}$  คือ ความชื้นเริ่มต้น,  $M_t$  คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ,  $M_{eq}$  คือ ความชื้นสมดุล

## 2.5 การวิเคราะห์สมการออบแห้งแบบชั้นบาง

การศึกษาสมการออบแห้งชั้นบาง เป็นการนำค่าความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการออบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น โดยวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่า Root mean square error (RMSE) โดย RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.6)

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{Prediction,i} - MR_{Experiment,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

รูปแบบของสมการออบแห้งชั้นบาง ที่นำมาวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองในงานวิจัย มีดังนี้

สมการของ Newton (Lui, 1997)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2.7)$$

สมการของ Page (Sharma, 2001)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt^y) \quad (2.8)$$

สมการแบบ Modified Page I (Diamante, 1993)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-(kt)^y) \quad (2.9)$$

สมการของ Henderson and Pabis (Doymaz, 2004)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) \quad (2.10)$$

สมการของ Wang and Singh (Ozdemir, 1999)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = 1 + at + bt^2 \quad (2.11)$$

สมการแบบ Logarithmic (Togrul, 2002)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) + c \quad (2.12)$$

สมการแบบ Two term (Rahman, 1998)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t) \quad (2.13)$$

สมการแบบ Two term exponential (Ruiz, 2008)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.14)$$

สมการแบบ Modified Henderson and Pabis (Karathanos, 1999)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (2.15)$$

สมการของ Midilli (Midilli, 2002)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt^n) + bt \quad (2.16)$$

สมการแบบ Approximation of diffusion (Yaldiz, 2001)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (2.17)$$

สมการของ Verma et al. (Verma, 1985)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt) \quad (2.18)$$

## 2.6 การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

ในงานศึกษาวิจัยนี้ จะทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้งด้วยสูญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งประกอบด้วย การประเมินค่าอัตราการอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.6.1 อัตราการอบแห้ง (drying rate, DR)

อัตราการอบแห้ง เป็นค่าบ่งบอกถึงความสามารถในการอบแห้งของระบบ แสดงได้ด้วยความสามารถในการระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุ (g water/g dry solid) ต่อหน่วยเวลา โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.19) (Junling, 2008)

$$DR = \frac{M_0 - M_T}{T} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$DR$  คือ อัตราการอบแห้ง, g water/g dry solid-min

$M_0$  คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ในวัสดุ, g water/g dry solid

$M_T$  คือ ปริมาณความชื้น ในวัสดุ ณ เวลา T, g water/g dry solid

$T$  คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

### 2.6.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของระบบ แสดงได้ด้วยปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.20)

$$SEC = \frac{E_{ir} + E_{vacuum}}{M_w} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$SEC$  คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, kWh/kg

$E_{ir}$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในหลอดอินฟราเรด, kWh

$E_{vacuum}$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในปั๊มสุญญากาศ, kWh

$M_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ, kg

## 2.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

### 2.7.1 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรายปี

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรายปี สามารถคำนวณได้จากการแปลงมูลค่าเงินลงทุนในปัจจุบันให้เป็นมูลค่าการลงทุนต่อปี ตลอดอายุการใช้งานเครื่องอบแห้ง โดยใช้ capital-recovery factor,  $\left(\frac{a}{p}\right)$  ดังสมการ (2.21) – (2.25)

$$\frac{a}{p} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $i$  คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี, %

$n$  คือ อายุการใช้งานของเครื่อง, ปี

ได้มูลค่าเงินลงทุนในแต่ละปี ( $C_p$ ) ดังนี้

$$C_p = P_w \left( \frac{a}{p} \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $P_w$  คือ มูลค่าเงินลงทุนในปัจจุบัน, บาท

ในการเปลี่ยนมูลค่าซากของเครื่องอบแห้ง เป็นมูลค่าต่อปีตลอดอายุการใช้งานของเครื่อง สามารถคำนวณได้โดยใช้ sinking-fund factor,  $\left(\frac{a}{f}\right)$

$$\frac{a}{f} = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (2.23)$$

จะได้มูลค่าซากของเครื่องอบแห้งในแต่ละปี ( $C_s$ ) คือ

$$C_s = S \left( \frac{a}{f} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ  $S$  คือ มูลค่าซากของเครื่องอบแห้งเมื่อหมดอายุการใช้งาน, บาท

คำนวณค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด ( $C_T$ ) ดังนี้

$$C_T = C_p + C_m + C_e + C_{pc} - C_s \quad (2.25)$$

เมื่อ  $C_m$  คือ ค่าซ่อมบำรุงเครื่องต่อปี, บาท

$C_e$  คือ มูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี, บาท

$C_{pc}$  คือ มูลค่าผลิตภัณฑ์สดที่ใช้ต่อปี, บาท

## 2.7.2 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมน้ำระเหย, ( $C_w$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.26)

$$C_w = \frac{C_T}{W} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $W$  คือน้ำหนักของน้ำที่ระเหยได้ต่อปี, kg

## 2.8 ข้อมูลผลิตภัณฑ์ออบแห้ง

สมุนไพร ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2525 หมายถึง พืชที่ใช้ทำเป็นเครื่องยา กำเนิดมาจากธรรมชาติ และมีความหมายต่อชีวิตมนุษย์โดยเฉพาะในทางสุขภาพอันหมายถึง การส่งเสริมสุขภาพและการรักษาโรค

ความหมายของยาสมุนไพรในพระราชบัญญัติยา พ.ศ. 2510 ระบุว่า ยาสมุนไพรหมายความว่า ยาที่ได้จากพฤกษชาติ สัตว์ หรือแร่ธาตุ ซึ่งมีได้ผสมปรุงหรือแปรสภาพ มิได้ผ่านขั้นตอนการแปรรูปใดๆ

พืชสมุนไพรแต่ละชนิดจะมีเอกลักษณ์ทางเภสัชเวท ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะจำเพาะทางกายภาพ สำหรับตรวจสอบชนิดของสมุนไพร และเอกลักษณ์ทางเคมี สำหรับตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณสารสำคัญในสมุนไพร โดยทั่วไปสมุนไพรควรมีความชื้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห่ง ยกเว้นสมุนไพรบางชนิดที่มีการกำหนดไว้ตามความเหมาะสม สมุนไพรที่มีความชื้นมากเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์เติบโตและเกิดการสูญเสียสารสำคัญได้ง่าย ปัจจุบันพืชสมุนไพรถูกแปรรูปเพื่อจุดประสงค์ทางการค้า โดยถูกดัดแปลงในรูปแบบต่างๆ เช่น ถูกหั่นให้เป็นชิ้นเล็กลง บดเป็นผงละเอียดบรรจุแคปซูล หรืออัดเป็นเม็ด ในงานวิจัยนี้ ทำการอบแห้งเพื่อแปรสภาพยาสมุนไพร 3 ชนิด คือ จิง หล้าปักกิ่ง และบอระเพ็ด ซึ่งเป็นตัวแทนส่วนที่ใช้เป็นยาสมุนไพรของพืช ได้แก่ ส่วนหัว ส่วนใบ และส่วนลำต้น ตามลำดับ ข้อมูลผลิตภัณฑ์สมุนไพร มีดังนี้

**2.8.1 จิง (ginger)** เป็นพืชสมุนไพร มีสรรพคุณด้านการรักษาโรค เช่น โรคท้องอืดท้องเฟ้อ คลื่นไส้ อาเจียน รักษาอาการไอที่มีเสมหะ รักษาอาการท้องเสีย เป็นยาอายุวัฒนะ ชื่อวิทยาศาสตร์ของจิง คือ *Zingiber officinale* Roscoe วงศ์ Zingiberaceae ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นพืชล้มลุก มีลำต้นใต้ดินที่เรียกว่า เหง้า จัดเป็นพืชตระกูลเดียวกับข่า ขมิ้น กระวาน จิงอ่อนมีสีขาวออกเหลือง มีรสเผ็ดและกลิ่นหอม ยิ่งแก่ยิ่งมีรสเผ็ดร้อน ลำต้นบนดินมีลักษณะเป็นกอสูงประมาณ 90 เซนติเมตร ก้านใบเป็นกาบหุ้มซ้อนกัน ใบเป็นใบเดี่ยวออกสลับเรียงกันเป็นสองแถว มีรูปร่างคล้ายใบไผ่ ปลายใบเรียวแหลม ดอกมีสีขาว ออกเป็นช่อบนยอดที่แยกออกมาจากลำต้นซึ่งไม่มีใบที่ก้านดอก ดอกมีลักษณะเป็นทรงพุ่มปลายดอกแหลม มีเกสรอยู่รอบๆ ดอกจะแซมออกมาตามเกสร ผลมีลักษณะกลมแข็ง

**สารสำคัญ** จิงมีน้ำมันหอมระเหยประมาณ 7.28% ประกอบด้วย methol, borneol, zingiberene, fenchone, 6-shogaol, และ 6-gingerol สาร methol มีฤทธิ์ขับลม ส่วน borneol, fenchone และ 6-gingerol มีฤทธิ์ขับน้ำดี ช่วยย่อยไขมัน นอกจากนี้สารที่มีรสเผ็ดได้แก่ 6-shogaol,

และ 6-gingerol ทำให้ลำไส้เพิ่มการเคลื่อนไหว จึงช่วยบรรเทาอาการปวดท้องเกร็ง zingiberene, และ 6-gingerol สามารถป้องกันการเกิดแผลในกระเพาะอาหารได้

**ประโยชน์ทางการแพทย์** ป้องกันและบรรเทาอาการคลื่นไส้ อาเจียนจากการเมาเรือ เมาเรือ อาการแพ้ท้อง อาการคลื่นไส้ในผู้ป่วยหลังการผ่าตัดหรือผู้ป่วยเคมีบำบัด

**2.8.2 หญ้าปักกิ่ง (murdannia loriformis)** มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีนตอนใต้ แถบสิบสองปันนา ชื่อท้องถิ่นคือ เล่งจื่อเถ้า ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Murdannia loriformis* (Hassk.) Rolla Rao et Kammathy วงศ์ Commelinaceae ซึ่งไม่ใช่พืชในวงศ์ของหญ้าทั่วไป ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวล้มลุก สูงประมาณ 7-10 เซนติเมตร ใบความยาวไม่เกิน 10 ซม. ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอดรวมกันเป็นกระจุกแน่นกลีบดอกสีฟ้าปนม่วง ใช้ส่วนลำต้นหรือใบที่มีอายุประมาณ 3-4 เดือน เป็นยาสมุนไพร

**องค์ประกอบทางเคมี** น้ำคั้นสดจากหญ้าปักกิ่ง มีไกลโคสฟิงโกไลปิดส์ (จี 1 ปี) ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า 1B-O-D-glucopyranosyl-2-(2'-hydroxy-6'-ene-cosamide)-sphingosine (G1b)

#### คุณสมบัติทางชีวภาพและเภสัชวิทยา

(1) การศึกษาคุณสมบัติด้านมะเร็งในห้องปฏิบัติการกลัยโคสฟิงโกไลปิดส์ (จี 1 ปี) แสดงฤทธิ์ยับยั้งปานกลางต่อเซลล์มะเร็งเต้านม และเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ ด้วยค่า ED50 > 16 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร สารจี 1 ปี ยังแสดงผลปรับระบบภูมิคุ้มกันด้วย

(2) สารสกัดหญ้าปักกิ่งมีผลลดความรุนแรงของการแพร่กระจายของมะเร็ง (metastasis) ในหนู จึงคาดว่าสารสกัดหญ้าปักกิ่งอาจใช้ป้องกันการเกิดมะเร็งได้ และยังมีฤทธิ์ต้านการกลายพันธุ์ของยีนที่เกิดจากสารก่อกลายพันธุ์ชนิดต่าง ๆ ได้ เช่น AFB1 ตลอดจนมีฤทธิ์เหนี่ยวนำเอนไซม์ DT-diaphorase ซึ่งมีบทบาททำลายสารพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

**ประโยชน์ทางการแพทย์** ในประเทศจีน พบว่ามีการใช้หญ้าปักกิ่งรักษาอาการเกี่ยวกับโรคในระบบทางเดินหายใจ (นันทวัน บุญยะประภัสร์, 2539) ในประเทศไทย ผู้ป่วยมะเร็งได้ใช้น้ำคั้นจากหญ้าปักกิ่งมาดื่ม เพื่อรักษาและบรรเทาอาการของโรค บางรายใช้หญ้าปักกิ่งรักษาโรคร่วมกับยาแพทย์แผนปัจจุบัน (วิณา จิรัจรรย์กุล, 2542) เพื่อช่วยลดผลข้างเคียงจากการรักษาแผนปัจจุบัน ยับยั้งการแพร่กระจายของมะเร็งและการกลับมาเป็นอีก รวมทั้งใช้ปรับระบบภูมิคุ้มกัน

**พัฒนาการหญ้าปักกิ่งสู่มาตรฐานสากล** สถาบันวิจัยและพัฒนาขององค์การเภสัชกรรมได้นำหญ้าปักกิ่งมาพัฒนาเป็นยาเม็ด เพื่อความสะดวกในการใช้กับผู้ป่วยและช่วยให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณยาจากหญ้าปักกิ่งตามที่กำหนด

**2.8.3 บอระเพ็ด (heart-leaved moonseed)** บอระเพ็ดเป็นไม้เถาเลื้อยที่จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้ออ่อน มีขนาดประมาณ 1.0-1.5 ซม. เถาอ่อนผิวเรียบสีเขียว เถาแก่สีน้ำตาลอมเขียวผิวขรุขระ

มักจะมีรากอากาศคล้ายเชือกเส้นเล็กๆ ห้อยลงเป็นสาย ใบเป็นใบเดี่ยวรูปหัวใจ ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Tinospora crispa* (L.) Miers ex Hook.f. & Thoms., *Tinospora rumphii* Boerl., *Tinospora tuberculata* Beaume. วงศ์ Menispermaceae ชื่อเรียกท้องถิ่น ได้แก่ เห็ดมูลหนาม เก้าหัวด้วน เห็ดมูลย่าน จุ่งจริงตัวแม่ เครือกอหอ และเห็ดหมูนปลุก

**สารสำคัญ** โคลัมบิโน (columbin) เอ็นทรานส์เฟรูลอยไทรามิน (N-trans-feruloyltyramine) ไทโนทูเบอไรด์ (tinotuberide) ไฟโตสเตอรอล (phytosterol) พิคโรเรติน (picroretin) และจาทิโอริน (jateorin)

**การใช้ประโยชน์** มีการใช้บอระเพ็ดเป็นยาสมุนไพร สรรพคุณ แก้ไข้ แก้ร้อนใน กระหายน้ำ บำรุงกำลัง บำรุงไฟธาตุ ช่วยเจริญอาหาร รักษาโรคฝีดาษ โรคไข้เนื้อ โรคไข้พิษทุกชนิด ใบ รักษาพยาธิในท้อง รักษาฟัน ต่ำให้ละเอียดพอกฝี แก้ฟกช้ำ ปวดแสบปวดร้อน ผล เป็นยา รักษาโรคไข้พิษ และเสมหะเป็นพิษ รักษาโรคทางเดินปัสสาวะ โรคโลหิตพิการ ในทางการเกษตร มีการนำบอระเพ็ดมาใช้ในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช เช่น หนอนกอ เพลี้ยกระโดด เพลี้ยจักจั่น

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 การอบแห้งด้วยอินฟราเรด

Ipsita, et al. (2004) ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวหนึ่งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยศึกษาถึง head yield ของเมล็ดข้าว สีของข้าว เปอร์เซนต์เจลาติไนซ์ (percent-gelatinized) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ค่าความเข้มของรังสีอินฟราเรด เท่ากับ 5,514 4,520 3,510 2,520 และ 1509 W/m<sup>2</sup> และความหนาของการวางเมล็ดข้าว เท่ากับ 3 6 12 และ 25 มิลลิเมตร วางบนถาดอบแห้งที่มีการสิ้นสะเก็ทื่อน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรด จะทำให้ค่า head yield ของเมล็ดข้าวลดลง 6-8% ทุกๆ ความหนาของการวางเมล็ดข้าว สีของเมล็ดข้าวมีความเหลืองน้อยลง และเปอร์เซนต์เจลาติไนซ์มีค่าลดลง ในส่วนของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มรังสีอินฟราเรดและมีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

Zhongli, et al. (2008) ศึกษาการอบแห้งกล้วยด้วยการให้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง โดยนำกล้วยที่หั่นตามขวางความหนา 5 mm มาใช้ในสารละลายกรดบอริก และกรดซิตริก อัตราส่วนผสมสารละลาย 10 g/l เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นทำการทรีทเมนต์ด้วยการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (3,000 4,000 และ 5,000 W/m<sup>2</sup>) และลมร้อนที่อุณหภูมิ 62.8°C ให้น้ำหนักผลิตภัณฑ์ลดลงประมาณ 20 และ 40 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักเดิม และทำการอบแห้งด้วยวิธีแช่แข็งร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มของการแผ่รังสี 4000 W/m<sup>2</sup> จากผลการศึกษาพบว่า

ในช่วงของการทรีทเมนต์ รังสีอินฟราเรดที่ความเข้มของการแผ่รังสีมาก สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้เร็วกว่าและมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าความเข้มของการแผ่รังสีน้อย และพบว่าการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้ลมร้อน

Yi Zhu. and et al. (2009) ศึกษาอบแห้งแอปเปิ้ลหั่นบางด้วยรังสีอินฟราเรด โดยทำการศึกษาถึงตัวแปรความเข้มของการแผ่รังสี (3,000 4,000 และ 5,000 W/m<sup>2</sup>) และความหนาของผลิตภัณฑ์ (5 9 และ 13 mm.) ที่ส่งผลกระทบต่อสีและอัตราการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มของรังสีและลดความหนาของผลิตภัณฑ์ จะส่งผลให้อุณหภูมิในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และทำให้การถ่ายเทน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า สีของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อลดความหนาของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความเข้มของรังสีอินฟราเรด

Nourhene, et al. (2009) ศึกษาการอบแห้งใบมะกอก (olive leaves) ด้วยรังสีอินฟราเรด โดยทำการเปรียบเทียบสีใบมะกอก ปริมาณกรดคาร์บอลิกที่ได้จากการอบแห้ง และอัตราการลดลงของความชื้นขณะอบแห้ง เงื่อนไขการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอบแห้งที่ 40 50 60 และ 70°C ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการอบแห้งลดลง และยังพบว่ารังสีอินฟราเรดส่งผลให้ปริมาณกรดคาร์บอลิกในใบมะกอกมีปริมาณเพิ่มขึ้น และสีของใบมะกอก มีสีเขียวใกล้เคียงสีเขียวเดิม

## 2.9.2 การอบแห้งแบบสุญญากาศ

Drouzas, et al. (1996) ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในการอบแห้งผลไม้ภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยใช้ห้องสุญญากาศที่ทำจากวัสดุแก้วใส่ในตู้อบไมโครเวฟ ขณะอบแห้งทำการวัดอุณหภูมิในห้องอบและผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยใช้ optical thermo-sensors ผลการทดลองพบว่า กระบวนการอบดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี รูปร่าง และกลิ่นของผลิตภัณฑ์กับการอบแห้งแบบแช่แข็ง

Leonid, et al. (2006) ศึกษาการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรด้วยสุญญากาศ โดยเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ในส่วนของการทดลอง ใช้ห้องอบแห้งทรงกระบอกวงแหวนอน มีปริมาตรประมาณ 200 ลิตร ควบคุมความดันด้วยปั๊มสุญญากาศ ถาดอบแห้งมีความจุ 5 kg ควบคุมอุณหภูมิอบแห้งที่ 55-65°C โดยมีการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวอินฟราเรดผิวผลิตภัณฑ์ และในผลิตภัณฑ์

Aroldo, et al. (2007) ศึกษาอิทธิพลของการ pre-treatments ที่มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้งด้วยสุญญากาศ ของแครอทและฟักทอง โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการแช่แข็งและการลวกผลิตภัณฑ์ก่อนอบ เงื่อนไขการอบแห้งคือ อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 60 และ 70°C

ความดันสัมบูรณ์เท่ากับ 5 และ 15 kPa ผลการศึกษาพบว่า การ pre-treatments ด้วยกระบวนการแช่แข็ง มีปริมาณการแพร่ของความชื้นมากกว่าการลวก และการไม่ทำ pre-treatments ตามลำดับ โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและลดความดัน จะทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงเร็วขึ้น และพบอีกว่าฟักทองมีการแพร่ของความชื้นมากกว่าแครอท

Nantawan, et al. (2009) ทำการอบแห้งมินต์ด้วยสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ และเปรียบเทียบกับกรอบด้วยลมร้อน จากการศึกษาพบว่ากรอบด้วยสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดเวลาการอบแห้งได้ประมาณ 85-90% เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อน และยังพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงสี และความพรุนของโครงสร้างภายในน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

### 2.9.3 การอบแห้งด้วยสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด

Mongpraneet, et al. (2002) ศึกษาการอบแห้งต้นหอมด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยอบต้นหอมขนาดความยาว 5 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความชื้นเริ่มต้น 93-95% มาตรฐานเปียก จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 5% มาตรฐานเปียก เงื่อนไขที่ทำการทดลอง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ คือ 7.5 10 12 15.2 17 20 และ 22.5 เซนติเมตร ปรับการป้อนกำลังไฟฟ้าที่ 40 50 60 70 80 90 และ 100 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้หลอดรังสีอินฟราเรด และลดระยะห่างระหว่างหลอดรังสีอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์ โดยระยะห่าง 10 เซนติเมตรเป็นระยะที่เหมาะสม และพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ 40 วัตต์ ไม่สามารถอบต้นหอมที่ความชื้นสุดท้าย 5% มาตรฐานเปียกได้ เมื่อวิเคราะห์สารสีเขียวในผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งแล้วพบว่า ปริมาณสารสีเขียวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้หลอดอินฟราเรด และมีประมาลดลงเมื่อกำลังไฟฟ้าเกิน 90 วัตต์ ในส่วนของการวิเคราะห์ศักยภาพในการคืนตัวของต้นหอมพบว่า ที่กำลังไฟฟ้า 70 วัตต์ มีศักยภาพในการคืนตัวมากที่สุด

Swasdisevi, et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยอบแห้งกล้วยหอมที่มีความหนา 2 3 และ 4 มิลลิเมตร ที่ความชื้นเริ่มต้น 300 % มาตรฐานแห้ง จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ 7% มาตรฐานแห้ง สภาวะความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 5 10 และ 15 กิโลปาสกาล และ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์ คือ 15 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ความดันสุญญากาศ อุณหภูมิ และความหนาของกล้วยหอม มีผลต่อจรรยาศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยหอมอบแห้ง กล่าวคือ ที่สภาวะความดันเดียวกัน อัตราการลดลงของความชื้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง เนื่องจากความแตกต่างของความดันไอและความเข้มข้นของความชื้นระหว่างห้องอบแห้งกับผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการกลายเป็นไอของน้ำในผลิตภัณฑ์มากขึ้น กรณี

ที่เปลี่ยนแปลงความดัน และอุณหภูมิคงที่ อัตราการลดลงของความชื้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง เนื่องจากจุดเดือดของน้ำลดลง และที่สภาวะความดันและอุณหภูมิเดียวกัน อัตราการลดลงของความชื้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของกล้วยหอมลดลง โดยจุดเหมาะสมสำหรับการอบแห้งกล้วยหอมหั่นบาง คือ ที่สภาวะความดัน 5 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความหนา 2 มิลลิเมตร

Nimmol, et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สภาวะความดันต่ำ (low-pressure superheated steam) ร่วมกับอินฟราเรดไกล โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อจลนศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยหอม และทำการเปรียบเทียบผลกับการอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางภายใต้สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ในห้องอบเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่า ที่สภาวะความดันเดียวกัน การอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สภาวะความดันต่ำใช้เวลามากกว่าการอบแห้งกล้วยหอมหั่นบางภายใต้สุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ในช่วงอุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส แต่ใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และพบว่ามีความกรอบ (crispness) มากกว่าการอบด้วยสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

Swasdisevi, et al. (2009) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ของกล้วยหอมหั่นบางอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยทำการเปรียบเทียบกับ การทดลองอบแห้งกล้วยหอม ที่มีความหนา 2 3 และ 4 มิลลิเมตร ที่สภาวะความดัน 5 10 และ 15 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง และผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเนื้อผลิตภัณฑ์ให้ผลสูงกว่าการทดลอง ในช่วง 50 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจะให้ผลใกล้เคียงกัน