

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 มะม่วง

มะม่วง มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตประเทศพม่าและอินเดีย และแพร่กระจายไปยังประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (บุญเลิศ, 2532) มะม่วงเป็นไม้ผลเมืองร้อนที่ทนแล้งได้ปานกลาง ต้องการสภาพอากาศที่มีความชุ่มชื้นและแห้งแล้งสลับกันไป มะม่วงเจริญได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 24-27°C สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพดินปลูกในช่วงกว้าง ทั้งในดินร่วนที่มีความอุดมสมบูรณ์ ไปจนถึงดินที่มีแต่ทราย ดินลูกรัง หินตามเนินเขา และดินที่ขาดความอุดมสมบูรณ์อื่น ๆ แต่ดินปลูกมะม่วงที่ให้ผลดีที่สุดควรเป็นดินร่วนที่มีหน้าดินลึก ซึ่งสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศของประเทศไทยมีความเหมาะสมสำหรับปลูกมะม่วงเป็นอย่างมาก (วิจิตร, 2529; เกศิณี, 2530; สถาบันวิจัยพืชสวน, 2532)

พันธุ์มะม่วงแบ่งออกเป็นสองกลุ่มสำคัญ คือ มะม่วงกลุ่มอินเดีย และมะม่วงกลุ่มอินโดจีน (วิจิตร, 2529)

1. มะม่วงกลุ่มอินเดีย (Indian type) มีถิ่นกำเนิดทางตอนเหนือของประเทศอินเดีย และปากีสถาน ปลูกกันมากในสหรัฐอเมริกา (รัฐฟลอริดา) และเม็กซิโก เมล็ดของมะม่วงกลุ่มนี้เมื่อปลูกจะให้ต้นกล้าเพียงหนึ่งต้นต่อเมล็ด และต้นกล้านั้นจะกลายพันธุ์ไม่เหมือนต้นแม่เพราะเป็นลูกผสม ผลมะม่วงมักมีสีสะดุดตา เช่น แดง ม่วง และ ส้ม ผลค่อนข้างกลม รสชาติอมเปรี้ยว และมีกลิ่นแรง

2. มะม่วงกลุ่มอินโดจีน (Indochinese type) มีถิ่นกำเนิดแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร เมื่อนำมาเพาะเมล็ดจะให้ต้นกล้ามากกว่าหนึ่งต้นต่อเมล็ด ต้นกล้าที่ได้ส่วนมากจะเหมือนต้นแม่ เพราะเกิดจากเซลล์ร่างกาย (nucellar cell) ของต้นแม่เป็นส่วนใหญ่ ผลมีสีเขียวหรือเหลือง รสหวาน และมีกลิ่นไม่แรง

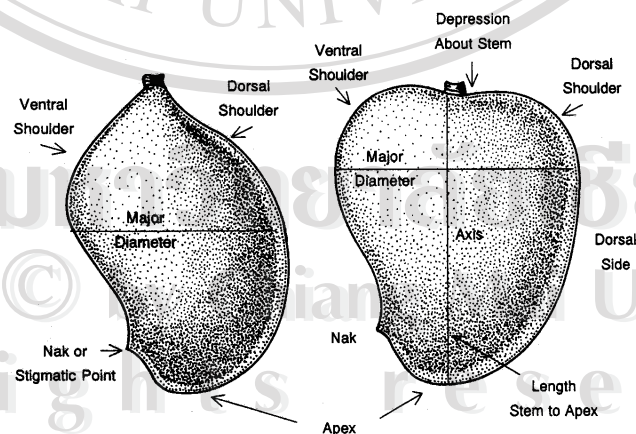
### 2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

**Class** Dicotyledonae  
**Sub – class** Archichlamydeae  
**Order** Sapindales  
**Family** Anacardiaceae  
**Genus** *Mangifera*  
**Scientific name** *Mangifera indica* L.

มะม่วง (*Mangifera Indica* L.) ซึ่งอยู่ในตระกูล Anacardiaceae โดยประกอบด้วย พืชประมาณ 73 สกุล และ 600 ชนิด พืชตระกูลนี้ส่วนใหญ่อยู่ในเขตร้อน เป็นพวกไม้ยืนต้นหรือ ไม้พุ่ม มีน้ำยาง (resinous sap) อยู่ทุกส่วนของพืช พืชใกล้เคียงได้แก่ มะม่วงหิมพานต์ (chew nut : *Anacardium occidentale* L.) ซึ่งให้เมล็ดรับประทานได้ มะปราง (marian plum : *Bouea burmanica* Griff.) มะกอก (olive : *Sapodias pinnata* Kurz.) ซึ่งให้เนื้อผล เป็นอาหาร ต้นวาร์นิช (Varnish tree) เป็นพวกที่ให้ยาง (resin) น้ำมันชักเงา (lacquers) ต้นสเนก (Snake tree : *Continus coggygia* Scop.) เป็นพวกที่ใช้ประโยชน์เป็นไม้ประดับ และพิสตาชิโอ Nut (pistachio nut : *Pistacia vera* L.) เป็นต้น (วิจิตร, 2529; เกศณี, 2530)

### 2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

มะม่วงมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันไป ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของมะม่วง สามารถแสดงได้ดังรูป 2.1



รูป 2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลมะม่วง

(Nakasone and Paull, 1998)

### 2.1.3 ประเภทของมะม่วง

สามารถแบ่งมะม่วงตามการนำมาใช้ประโยชน์ได้สามประเภท คือ มะม่วงแบบรับประทานสุก แบบรับประทานดิบ และนำมาแปรรูป ซึ่งมะม่วงที่ส่งออกส่วนใหญ่จะเป็นมะม่วงรับประทานสุก เนื่องจากความนิยมของผู้บริโภคในตลาดต่างประเทศ จากการวิจัยความชอบของผู้บริโภคชาวจีนและชาวญี่ปุ่น พบว่าชื่นชอบมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและพันธุ์โชคอนันต์มากกว่าพันธุ์อื่น โดยมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ผู้บริโภคนิยมในกลิ่นของมะม่วงมาก (ทิพย์วรรณและคณะ, 2543) นอกจากนี้ยังมีมะม่วงอีกหลายพันธุ์ที่เป็นที่นิยมในตลาดต่างประเทศ ได้แก่ พันธุ์หนังกกลางวัน ทองคำ แรด และพิมเสนแดง เป็นต้น (สนั่น, 2527; ดนัยและนิธิยา, 2548)

### 2.1.4 มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ มีต้นกำเนิดมาจากการกลายพันธุ์และได้จากการเพาะเมล็ดมะม่วงพันธุ์สามปี โดยยังคงกลิ่นหอมของมะม่วงพันธุ์สามปีเอาไว้ ตลอดจนการติดผลก็เหมือนมะม่วงพันธุ์สามปีคือมีลักษณะเป็นพวง พบครั้งแรกที่จังหวัดเชียงใหม่ ลักษณะเด่นของมะม่วงลูกผสมพันธุ์นี้คือ การออกดอกทะวาย สามารถออกดอกได้ตลอดปี ไม่กลัวฝน ติดผลง่าย สามารถทำให้ติดผลนอกฤดูได้ง่ายกว่าพันธุ์อื่น ๆ เปลือกหนา เนื้อแน่น หลังจากผลสุกแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้หลายวัน จึงเหมาะในการเก็บรักษานาน ๆ และการขนส่งไกล ๆ (ประเสริฐ, 2545)

ต้นมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์มีทรงพุ่มขนาดปานกลาง มีการเจริญเติบโตปานกลาง ใบเป็นแบบ ovate lanceolate สีเขียวเข้ม ดอกมี 5 กลีบ เกสรตัวเมียและเกสรตัวผู้อยู่ในดอกเดียวกัน เรียกว่า hermaphrodite มีดอกเล็ก ๆ อยู่ในช่อเดียวกัน รูปร่างของผลคล้ายกับผลมะม่วงพันธุ์พิมเสน ปลายเรียวเล็ก เป็นแบบ ovate oblong ผลดิบมีเปลือกสีเขียวอ่อน ผิวเรียบ เมื่อดิบมีรสเปรี้ยว เนื้อแข็งแน่น ไม่มีเสี้ยน เมื่อผลสุก เปลือกจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองส้มสวยมาก เนื้อผลมีสีเหลืองเข้ม และมีเนื้อผลมากประมาณร้อยละ 62 เนื้อแน่น รสหวาน ลักษณะเมล็ดดิบมีเสี้ยนน้อย น้ำหนักต่อผลประมาณ 300 กรัม ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 16-20 องศาบริกซ์ ปริมาณกรดประมาณร้อยละ 0.3 ระยะตั้งแต่ออกดอกจนถึงเก็บเกี่ยวประมาณ 110 วัน เป็นพันธุ์ที่สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย (ทวี, 2533; ศิวพร, 2539; ธวัชชัย, 2542; ประเสริฐ, 2545)

### 2.1.5 ลักษณะของมะม่วงที่มีคุณภาพดี (มनु, 2540)

มะม่วงที่จัดว่ามีคุณภาพดีต้องมีลักษณะต่าง ๆ ตรงต่อความต้องการของผู้บริโภค ลักษณะที่สำคัญซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลมะม่วง ได้แก่

#### 1. ลักษณะปรากฏภายนอก

1.1 รูปร่างตรงตามพันธุ์ ไม่บิดเบี้ยว ไม่สั้นหรือยาวผิดปกติ

1.2 สีผิวสม่ำเสมอ มีนวล ไม่มีลักษณะของผลค้างหรือตาย สำหรับมะม่วงสุกจะมีสีเหลืองส้มหรือส้มทั้งผล ยกเว้นมะม่วงพันธุ์ต่างประเทศ หรือพันธุ์ลูกผสมจากต่างประเทศ ซึ่งอาจจะมีสีแดงหรือสีส้ม

1.3 ผิวปราศจากร่องรอยการทำลายของโรคและแมลง

1.4 ปราศจากตำหนิบนผิว เช่น ผิวแตก ผิวเป็นจุดเปราะเปื้อนน้ำยาง แดงเผา รอยขีดข่วนจากการเสียดสี รอยยุบบนผิว

1.5 ไม่บอบช้ำ ซึ่งเกิดจากการเก็บเกี่ยวหรือการขนส่ง

1.6 ผลมีขนาดโตสม่ำเสมอ

#### 2. คุณภาพเนื้อภายใน

2.1 มีความแก่จัดตามที่ตลาดต้องการ ถ้าเป็นมะม่วงสำหรับรับประทานดิบประเภทมะม่วงมันจะมีความหวานมัน เนื้อสีเหลืองอ่อนและกรอบ สำหรับมะม่วงรับประทานสุกจะต้องแก่จัด เมื่อบ่มสุกแล้วผลไม่เหี่ยว ความหวานสูง ไม่เปรี้ยว ยกเว้นมะม่วงดิบที่ใช้รับประทานผลอ่อนกับน้ำปลาหวาน หรือใช้ปรุงอาหารในลักษณะย่ำร่วมกับอาหารชนิดต่าง ๆ

2.2 ผลมะม่วงเมื่อสุกแล้วไม่แสดงลักษณะการทำลายของโรคและแมลงชนิดต่าง ๆ เช่น จุดดำเนื่องจากโรคแอนแทรคโนส โรคข้าวผลเน่า ผลเน่าจากแบคทีเรีย รวมทั้งผลเน่าจากการทำลายของหนอนแมลงวันทอง ซึ่งติดมากับผลมะม่วงก่อนเก็บเกี่ยว

2.3 เนื้อมะม่วงสุกต้องมีสีเข้ม ไม่ซีดจาง โดยทั่วไปมะม่วงทุกพันธุ์ ผลอ่อนจะมีสีขาวซีดและเมื่อแก่จัดจะมีสีเหลืองเข้มขึ้น โดยผลสุกที่แก่จัดจะมีสีเหลืองถึงส้ม

2.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสสำหรับมะม่วงรับประทานดิบจะต้องกรอบ ไม่เหนียวหรือแข็งกระด้าง สำหรับมะม่วงสุกเนื้อต้องไม่เละ อ่อนนุ่มพอเหมาะสม่ำเสมอทั้งผล

2.5 รสชาติตรงตามพันธุ์ ถ้าเป็นมะม่วงมันจะมีรสหวานมันกรอบ แต่ถ้าเป็นมะม่วงสุกต้องมีรสหวานมาก และสม่ำเสมอทั้งผล ยกเว้นมะม่วงพันธุ์ต่างประเทศหรือพันธุ์ลูกผสมจากต่างประเทศซึ่งอาจจะมีรสเปรี้ยวปนเล็กน้อย

2.6 มีเนื้อสำหรับใช้รับประทานมากและมีเส้นใยน้อย

### 3. ไม่มีสารพิษตกค้างบนผลมะม่วง

#### 3.1 สารเคมีในเนื้อผลมะม่วง

#### 3.2 สารเคมีบริเวณผิวเปลือกของผลมะม่วง

## 2.2 การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วง

โดยทั่วไปมะม่วงพันธุ์รับประทานสุกจะเก็บเกี่ยวในขณะที่ผลดิบจนกระทั่งถึงระยะแก่จัดทางสรีรวิทยา (physiological maturity) ซึ่งคุณภาพของผลมะม่วงที่เก็บเกี่ยวมานั้นมีผลโดยตรงต่อการจำหน่าย ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เป็นปัญหาเกี่ยวกับผลมะม่วงสุกมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้ อาจเกิดจากระยะเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่มีอายุเหมาะสมและการปฏิบัติต่อผลมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวอย่างถูกวิธีจะทำให้ได้ผลมะม่วงที่มีคุณภาพดีและจำหน่ายได้ราคาสูง (สายชล, 2530)

### 2.2.1 ดัชนีความแก่และการคัดคุณภาพ

ผลมะม่วงที่มีการเก็บในระยะที่มีความแก่เหมาะสมและเท่า ๆ กันทุกผล จะมีการสุกอย่างสม่ำเสมอและมีคุณภาพด้านรสชาติที่ดี การหาดัชนีความแก่ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีประโยชน์ต่อการเก็บเกี่ยวและการคัดคุณภาพเป็นอย่างมาก (อรณพและคณะ, 2532)

มีรายงานวิธีการวัดความแก่ของมะม่วงไว้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการนับจำนวนวันหลังดอกบาน วิธีการตรวจสอบลักษณะภายนอก วิธีการฟังเสียงเมื่อเคาะลงไปทีผล วิธีการวัดลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาด น้ำหนัก ปริมาตร ความถ่วงจำเพาะ ความแน่นเนื้อและสีผิว เป็นต้น วิธีการวัดลักษณะทางเคมี เช่น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรดที่ไทเตรตได้ ปริมาณแป้ง สารประกอบฟีนอลและแคโรทีนอยด์ เป็นต้น (วิจิตร, 2529; นิพนธ์, 2533; เฉลิมชัย, 2539; จริงแท้, 2544; รุ่งอรุณ, 2545; ดนัยและนิธิยา, 2548)

สำหรับมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ นิพนธ์ (2533) รายงานถึงข้อมูลการนำอายุผล การเติบโตของผล การเปลี่ยนแปลงสีเปลือก ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ มาพิจารณาร่วมกัน สามารถใช้เป็นดัชนีการเก็บเกี่ยวได้ ซึ่งผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ควรเก็บเกี่ยวที่ 91-105 วันหลังดอกบาน จึงจะทำให้มีคุณภาพดีเมื่อสุก

จำนงค์และคณะ (2544) รายงานว่าดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วงพันธุ์มหาชนกสามารถใช้ค่าต่อไปนี้ คือ ความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.00 น้ำหนักแห้งของเนื้อผลประมาณ 18.8-19.4 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นของเนื้อผลมีค่าระหว่าง 80.6-81.2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ

เบตา-แคโรทีนในเนื้อผลมีค่า 0.34-0.38 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด สามารถเก็บเกี่ยวได้ตั้งแต่ อายุ 98-133 วันหลังดอกบาน โดยค่าความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผลแก่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมะม่วงมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในการแยกผลอ่อนและผลแก่ของมะม่วง สามารถใช้วิธีการลอย-จมในน้ำเกลือเจือจางได้ และเพื่อให้ได้ดัชนีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม ควรใช้ ค่าต่าง ๆ ข้างต้นร่วมกัน ในขณะที่ Sornsrivichai *et al.* (2001) รายงานว่าสามารถใช้น้ำหนักแห้ง และปริมาณแป้งเป็นดัชนีการเก็บเกี่ยวของมะม่วงพันธุ์มหาชนกได้

ดัชนีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้คือที่อายุ 110 วันหลังดอกบาน (ดวงตรา, 2526; วิจิตร, 2529) นอกจากนี้อรุณพลและคณะ (2532) ได้รายงานว่าค่าความถ่วงจำเพาะ น่าจะใช้เป็นดัชนีคุณภาพเพื่อการเก็บเกี่ยวและการคัดเกรดมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ได้ โดย ความถ่วงจำเพาะมีผลอย่างชัดเจนต่อคุณภาพและองค์ประกอบทางเคมี ผลมะม่วงที่มีความ ถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1.00 จะมีคุณภาพต่ำและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้ประเมิน เนื่องจากใช้เวลาใน การสุกนาน มีปริมาณกรดสูง แต่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้และปริมาณวิตามินซีต่ำ ซึ่งมะม่วง พันธุ์น้ำดอกไม้ควรเก็บเกี่ยวเมื่อมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.00 จึงจะมีคุณภาพดีเมื่อผลสุก โดยมีปริมาณน้ำตาลและปริมาณวิตามินซีสูง แต่มีปริมาณกรดต่ำ ค่าความถ่วงจำเพาะมีความ สัมพันธ์สูงมากกับปริมาณของแข็ง ปริมาณน้ำตาล และคะแนนคุณภาพจากการประเมินโดยการชิม โดยทั่วไปผลมะม่วงที่มีความแก่ทางสรีรวิทยาจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ ส่วนมะม่วงผลอ่อนจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ จากความแตกต่างดังกล่าวทำให้การคัดความแก่ ของผลมะม่วงโดยการนำไปลอยน้ำจะมีความเป็นไปได้ ส่วนอุตสาหกรรมเกษตร (2544) ได้มี โครงการวิจัยเพื่อออกแบบเครื่องคัดแยกความแก่อ่อนของผลมะม่วงโดยอาศัยความแตกต่างของ ความถ่วงจำเพาะ พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอยู่ในเกณฑ์ดีสามารถคัดแยกได้สะดวกรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการจมหรือลอยน้ำขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของมะม่วงด้วย พบว่ามะม่วงบางชนิดที่ ยังอ่อนอาจจมน้ำได้ เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับน้ำ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอวิธีการให้ มะม่วงมาลอยในสารละลายน้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 2.5 ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ ถ้าพบว่ามะม่วงจมในสารละลายน้ำเกลือนั้นแสดงว่าผลแก่จัดสามารถเก็บเกี่ยวได้ (รุ่งอรุณ, 2545)

มะม่วงหลังจากเก็บเกี่ยวมาแล้วมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้คง คุณภาพและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากโรคและแมลง โดยในหลายปีที่ผ่านมาได้มี ความพยายามในการลดการใช้สารเคมีเพื่อให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมมากขึ้น การจัดการทางอุณหภูมิ (temperature management) ทั้งในด้านการใช้อุณหภูมิสูงและการใช้ อุณหภูมิต่ำถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้มีการนำมาใช้จัดการกับผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว โดยการ

ใช้ความร้อนสามารถทำลายแมลงและไข่แมลงในผลมะม่วง ซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญในการส่งออกมะม่วงไปยังตลาดต่างประเทศ ส่วนการใช้อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้นานขึ้น (จริงแท้, 2544; Lurie, 1998)

## 2.2.2 กระบวนการทางความร้อน

ปัญหาในการส่งออกผลไม้สด สาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ แมลงวันผลไม้และไข่ของแมลง ซึ่งได้มีการนำกระบวนการทางความร้อนมาใช้ในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น การใช้น้ำร้อน การใช้อุณหภูมิและการใช้อากาศร้อน ความแตกต่างที่สำคัญของแต่ละวิธีคืออัตราการถ่ายเทความร้อน การใช้น้ำร้อนจะทำให้ผลไม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่น เพราะน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าไอน้ำและอากาศมาก การใช้ไอน้ำร้อนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของผลไม้โดยใช้อากาศร้อนอุณหภูมิประมาณ 40-50°C ที่อ้อมตัวด้วยไอน้ำ เมื่อไอน้ำนั้นสัมผัสกับผิวของผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนสถานะ และเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของผลไม้โดยตรง (Litz, 1997) วิธีนี้ อุณหภูมิของผลไม้เพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าการใช้น้ำร้อนซึ่งช่วยทำให้ผลผลิตมีคุณภาพดี (จริงแท้, 2544) ส่วนการใช้อากาศร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิของผลมะม่วงนั้นจะกระทำโดยการหมุนเวียนอากาศร้อนที่มีความชื้นสูงทำให้เนื้อมะม่วงร้อนขึ้นอย่างช้า ๆ (Litz, 1997) นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการทางความร้อนร่วมกับวิธีการอื่น เช่น ใช้ร่วมกับการเก็บรักษาในสภาพอุณหภูมิต่ำหรือการเก็บรักษาแบบควบคุมบรรยากาศ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็ให้ประสิทธิผลแตกต่างกัน (Lurie, 1998; Wang *et al.*, 2001)

การใช้ไอน้ำนั้นเป็นวิธีที่หลายประเทศทั่วโลกนิยมใช้ในการควบคุมแมลงวันผลไม้ (Gaffney *et al.*, 1990) ในประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการอบไอน้ำ และปรับสภาพความชื้นสัมพัทธ์ที่มีประสิทธิภาพใช้กับมะม่วง ซึ่งผ่านการยอมรับจากหน่วยงานกักกันพืชของญี่ปุ่น ให้ใช้เป็นการกำจัดศัตรูพืชด้านการกักกันพืชได้ โดยใช้กำจัดแมลงวันผลไม้ในผลมะม่วง 4 พันธุ์ คือ หนังกกลางวัน น้ำดอกไม้ แรด และพิมเสนแดง (คณัยและนิธิยา, 2548) ในการส่งออกมะม่วงพันธุ์หนังกกลางวันไปยังประเทศญี่ปุ่น ต้องผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จนอุณหภูมิใจกลางผลเป็น 46.5°C แล้วคงไว้เป็นเวลา 10 นาที ก่อนลดอุณหภูมิลง ขั้นตอนการเพิ่มอุณหภูมินี้แตกต่างกันไปในมะม่วงแต่ละพันธุ์ (จริงแท้, 2544) นอกจากนี้ได้มีรายงานของ Litz (1997) ถึงการใช้อุณหภูมิ 46.5°C ในการกำจัดแมลงวันผลไม้ *Bactrocera dorsalis* (Hendel) ในประเทศไทย ส่วนในประเทศออสเตรเลียการใช้ไอน้ำได้ถูกนำมาใช้ในการทำลาย *B. tryoni* (Queensland fruit fly) ในมะม่วงพันธุ์ Kensington ที่จะส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่น (Heather, 1995) โดยทำให้อุณหภูมิของเนื้อมะม่วงเพิ่มขึ้นเป็น 46.5°C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา

10 นาที (Heard *et al.*, 1992) แต่จากรายงานของ Esguerra *et al.* (1990) ซึ่งนำมะม่วงพันธุ์การาบาว่ามาผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำจนมีอุณหภูมิ 46°C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเนื้อภายในเกิดการเสียหายจากความร้อน อูรและคณะ (2536) ได้รายงานไว้ว่า มะม่วงพันธุ์หนังกลางวันจะทนทานต่ออาการเสียหายจากความร้อนได้ดีกว่าพันธุ์น้ำดอกไม้ แรด และ พิมเสนแดง

การใช้น้ำร้อนเป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถฆ่าแมลงในผลไม้ได้เป็นอย่างดี (Lurie, 1998) มะม่วงจากประเทศไทยที่จะส่งออกไปยังประเทศจีนและสหรัฐอเมริกาจำเป็นต้องผ่านกระบวนการใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 46.4°C เป็นเวลา 75 นาที (จริงแท้, 2544) ส่วนมะม่วงจากประเทศเม็กซิโกที่จะส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นนั้น จะประสบปัญหาแมลงวันผลไม้ที่สำคัญคือ *Anastrepha ludens* และ *A. Obliqua* ซึ่งจะต้องนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 46.1°C เป็นเวลา 65, 75 หรือ 90 นาที ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของผลไม้ (Ortega-Zaleta and Yahia, 2000) แต่การใช้เวลานานขึ้นจะส่งผลต่อการสุกและทำให้ผลไม้เสียหายได้ (Yahia *et al.*, 1997)

วิธีการใช้อากาศร้อนก็มีการพัฒนาใช้เช่นกัน จากรายงานของ Mangan and Ingle (1992) พบว่ามีการใช้อากาศร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมะม่วงที่ปลูกในประเทศเม็กซิโก จนใจกลางผลมีอุณหภูมิสูงกว่า 47°C ซึ่งสามารถกำจัดแมลงวันผลไม้ West Indian ได้ทุกระยะการเจริญ ในขณะที่มะม่วงที่ปลูกในรัฐฟลอริดาได้ผ่านการใช้อากาศร้อนเพื่อให้อุณหภูมิใจกลางผลสูงกว่า 46°C พบว่าสามารถกำจัดแมลงวันผลไม้ Caribbean ได้ทุกระยะการเจริญเช่นกัน (Sharp, 1992) Heather *et al.* (1997) ได้รายงานถึงการใช้น้ำร้อนในระบบหมุนเวียนอากาศร้อนในการฆ่าแมลงวันผลไม้ Queensland และ Mediterranean ในผลมะม่วงพันธุ์ Kensington ที่ส่งออกจากประเทศออสเตรเลียไปยังประเทศญี่ปุ่น โดยใช้อากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 95% จนทำให้อุณหภูมิที่แกนกลางผลเป็น 47°C และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 15 นาที

จะเห็นว่าการให้ความร้อนแก่ผลไม้เวลานานเกินไปสามารถทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ทั้งภายในและภายนอกผล ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นรวมไปถึงลักษณะผิวมีสีคล้ำ มีตำหนิ เนื้อมีลักษณะผิดปกติ (Lurie, 1998) ซึ่งพบในมะม่วงที่เก็บรักษาในสภาพควบคุมบรรยากาศที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 160 นาที (Ortega-Zaleta and Yahia, 2000) ส่วนในผลไม้ชนิดอื่น เช่น ผลแอปเปิลที่ผ่านการให้ความร้อนโดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 46°C เป็นเวลา 45 นาที เกิดความเสียหายบริเวณเนื้อ และที่ผิวมีสีน้ำตาล (Smith and Lay-Yee, 2000) นอกจากนี้การใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 43-47°C เป็นเวลา 10-90 นาที กับผลส้มพันธุ์ Oroblaco พบว่าแมลงวันผลไม้ Mediterranean จะตายเมื่อใช้อุณหภูมิ 43°C นาน 113 นาที หรือใช้อุณหภูมิ



43°C ร่วมกับสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ เป็นเวลา 90 นาที ความเสียหายจากความร้อนเกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิ 47°C กับผลส้มที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ในขณะที่ผลส้มที่ผ่านการเคลือบผิวจะเกิดความเสียหายเมื่อใช้อุณหภูมิ 44°C (Lurie, *et al.*, 2004)

### 2.2.3 การเก็บรักษาโดยใช้อุณหภูมิต่ำ

จุดประสงค์ของการเก็บรักษาผลมะม่วงก็เพื่อให้ผลมะม่วงที่เก็บเกี่ยวแล้วมีอายุยาวนานขึ้นกว่าอยู่ในสภาพปกติเพื่อประโยชน์ในการขนส่งระยะไกล ช่วยเก็บรักษาผลผลิตที่มีมากเกินไปขายไม่หมด หรือเมื่อราคาผลผลิตตกต่ำ ถ้ามีการเก็บรักษาผลมะม่วงไว้ขายในช่วงที่มีผลผลิตน้อยก็จะทำให้ราคาสูงขึ้นได้ การเก็บรักษาผลมะม่วงมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีความเหมาะสมแตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นการเก็บรักษาผลมะม่วงด้วยวิธีใดก็ตาม หลังจากการเก็บรักษาแล้วผลมะม่วงดิบจะต้องมีคุณภาพดี คือ เมื่อบ่มผลดิบแล้วจะต้องสุกเป็นปกติ สิ่งสำคัญคือผลมะม่วงที่จะนำไปเก็บรักษาจะต้องมีคุณภาพดี ปราศจากโรคและแมลง ไม่ชอกช้ำหรือมีบาดแผล ผลมะม่วงสะอาดและผลมะม่วงดิบจะต้องแก่พอเหมาะ (ประเสริฐ, 2545)

วิธีการเก็บรักษาผลมะม่วงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การเก็บรักษาโดยใช้ความเย็นหรืออุณหภูมิต่ำ (ประเสริฐ, 2545) วัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเพื่อชะลออัตราการหายใจ ชะลอปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ของกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ให้ช้าลง ชะลอการแก่และการสุกผลไม้จะนุ่มและอ่อนตัวช้าลง ลดการคายน้ำและลดการทำลายของจุลินทรีย์ (दनัยและนิธิยา, 2548)

ผลมะม่วงแต่ละพันธุ์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาและอายุการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปผลมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 12-13°C จะมีอายุเก็บรักษานานประมาณ 2-4 สัปดาห์ แต่อาจจะมีผลมะม่วงบางพันธุ์ที่สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 12-13°C ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย เช่น พันธุ์เขียวเสวยมีอายุการเก็บรักษานาน 20 วันที่อุณหภูมิ 10°C พันธุ์หนังกลางวันมีอายุการเก็บรักษานาน 28 วันที่อุณหภูมิ 12°C พันธุ์กร่องมีอายุการเก็บรักษานาน 20 วันที่อุณหภูมิ 10°C พันธุ์พิมเสนมันและพันธุ์แรดมีอายุการเก็บรักษานาน 28 วันที่อุณหภูมิ 9-10°C เป็นต้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาผลมะม่วงควรจะอยู่ที่ 90-95% ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่านี้จะส่งผลให้สูญเสียน้ำมาก ทำให้ผิวมะม่วงเหี่ยวแห้งได้ (สายชล, 2536; ประเสริฐ, 2545)

มะม่วงจัดเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่อ่อนแอต่ออาการสะท้านหนาวมาก เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนซึ่งมีความต้านทานต่ออุณหภูมิต่ำน้อย อาการสะท้านหนาว (chilling injury) ของผลมะม่วงคือ ผลมะม่วงดิบมีสีผิวและเนื้อบางส่วนคล้ำ ซึ่งอาจเป็นสีม่วงหรือสีเทา บางครั้งผลมะม่วงดิบอาจไม่แสดงอาการที่ผิว แต่อาจแสดงอาการที่เนื้อติดกับเมล็ด ซึ่งจะ

เกิดสีเทาหรือสีดำคล้ำ ผลมะม่วงอาจเกิดการสุกที่ผิดปกติ รสชาติผิดปกติ สีเนื้อพัฒนาไม่สมบูรณ์ เกิด surface pitting และเน่าได้ง่าย ระดับความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดเนื่องจากอาการ สะท้อนหนาวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาที่มะม่วงได้รับอุณหภูมิต่ำ (สายชล, 2536; ดนัย, 2540; ประเสริฐ, 2545) โดยทั่วไปแล้วหากเก็บมะม่วงที่ 0°C จะปรากฏอาการสะท้อนหนาว ภายใน 4 วัน หากเก็บมะม่วงที่ 5°C จะปรากฏอาการสะท้อนหนาวภายใน 8 วัน และเมื่อเก็บที่ 10°C จะปรากฏอาการภายใน 12 วัน อาการสะท้อนหนาวที่เกิดขึ้นนั้นรวมไปถึงลักษณะที่ผิว มีรอยแผล และมะม่วงมีความต้านทานต่อโรคคดลง (Nakasone and Paull, 1998) ในมะม่วงพันธุ์ น้ำดอกไม้เน่า สุกันยา (2539) รายงานว่าเมื่อเก็บไว้ที่ 10°C เป็นเวลา 21 วัน จะปรากฏอาการ สะท้อนหนาวขึ้นที่บริเวณเนื้อ และอาการจะปรากฏรุนแรงมากขึ้นเมื่อผลไม้เริ่มสุก เสาวภา (2545) พบว่าเกิดอาการสะท้อนหนาวในมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ที่ 12°C นาน 20 วัน โดยอาการจะปรากฏ มากขึ้นเมื่อผลไม้เริ่มสุกเช่นกัน และพบว่ามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองเกิดอาการสะท้อนหนาวได้ มากกว่ามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้

#### การลดความรุนแรงของอาการสะท้อนหนาว (ดนัย, 2540; จริ่งแท้, 2544)

การลดความรุนแรงของอาการสะท้อนหนาวสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. การทำ **temperature conditioning** โดยนำผลิตผลไปเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่จะเกิดอาการสะท้อนหนาวเล็กน้อย โดยเก็บเป็นระยะเวลาหนึ่ง พบว่าจะทำให้ผลิตผลต้านทานอาการสะท้อนหนาวได้

2. การได้รับอุณหภูมิสูงระหว่างที่ได้รับอุณหภูมิต่ำ (**intermittent warming**) การที่ ให้พืชได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลาสั้น ๆ จะช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาและต้านทานต่ออาการสะท้อนหนาวได้

3. การใช้สารเคมีบางชนิด สามารถทำให้พืชเกิดความต้านทานต่ออาการสะท้อนหนาวได้ เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ได้แก่ การใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็น free radical scavengers เช่น 4-chloro-5-(dimethylamino)-2-phenyl-3(2H)-pyridazinone และสารเอทานอลามีน (ethanolamine) เป็นต้น พบว่าการใช้สารเคมีฆ่าเชื้อราสามารถลดความอ่อนแอต่ออาการสะท้อนหนาวได้ เช่น สารไธอะเบนดาโซล (thiabendazole) และบีโนมิล (benomy1) นอกจากนี้มีรายงานถึงการใส่แคลเซียมคลอไรด์จุ่มผลไม้ พบว่าสามารถลดความอ่อนแอต่ออาการสะท้อนหนาวของพืชได้หลายชนิด

4. การใช้สารเคลือบผิวผลไม้บางชนิด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะองค์ประกอบของสารเคลือบผิว มักมีสารประเภทไขมัน ไขมันเหล่านี้สามารถแทรกซึมเข้าไปในเซลล์ ทำให้โครงสร้างของ

เชื้อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ทนทานต่อการเปลี่ยนสภาพทางกายภาพเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้น และส่งผลให้การเกิดอาการสะท้านหนาวลดลง

5. การปรับสภาพบรรยากาศ ทำให้ห้องปรับอากาศของอากาศภายในผลิตผลเปลี่ยนไปในสภาวะที่ปริมาณก๊าซออกซิเจนภายในผลลดลง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสภาพดังกล่าวช่วยลดอาการสะท้านหนาวได้

6. การใช้ฮอร์โมนพืชบางชนิด พบว่าสามารถเพิ่มความต้านทานต่ออาการสะท้านหนาว

#### 2.2.4 การหายใจของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว

อัตราการหายใจ หมายถึง น้ำหนักหรือปริมาตรของออกซิเจนที่ใช้หรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมาต่อหน่วยน้ำหนักต่อหน่วยเวลา (mg/kg-hr หรือ ml/kg-hr) (คณีย์, 2540)

#### Temperature Quotient

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหายใจของผลิตผล เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นย่อมกระตุ้นให้สสารทุกอย่างมีพลังงานสูงขึ้น ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ก็สามารถเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงขึ้น รวมถึงการหายใจซึ่งประกอบไปด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีหลายอย่างเกิดขึ้นต่อเนื่องหรือพร้อม ๆ กัน นักเคมีชาวเนเธอร์แลนด์ ชื่อ Van't Hoff กล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีจะเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 10°C หรือ 18°F เรียกว่า Temperature Quotient ( $Q_{10}$ ) ค่า  $Q_{10}$  สำหรับการหายใจในช่วง 0-20°C จะมีค่าประมาณ 2.0-3.0 แต่ที่อุณหภูมิสูงกวานั้น เช่นที่ 30-40°C แม้ว่าอัตราการหายใจจะเพิ่มสูงขึ้นแต่จะเพิ่มไม่มากนักทำให้ค่า  $Q_{10}$  ต่ำลง ดังแสดงในตาราง 2.1 การลดลงของ  $Q_{10}$  นี้อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปในเนื้อเยื่อภายในของผักและผลไม้จะไปจำกัดอัตราการหายใจ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปภายในไม่เร็วพอที่จะทำให้เกิดการหายใจสูงขึ้นมากนัก ค่า  $Q_{10}$  สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

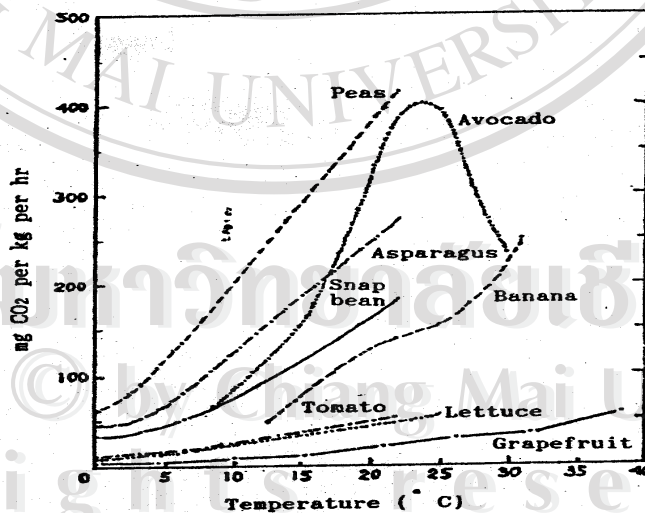
$$Q_{10} = \left[ \frac{R_2}{R_1} \right]^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$R_1$	คือ	อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิหนึ่ง
	$R_2$	คือ	อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น 10°C
	$T_1$	คือ	อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่มีอัตราเร็วเป็น $R_1$ (°C)
	$T_2$	คือ	อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่มีอัตราเร็วเป็น $R_2$ (°C)

ตาราง 2.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่า  $Q_{10}$  ของการหายใจ (คนัย, 2540)

อุณหภูมิ	$Q_{10}$ ของการหายใจ
0-10°C	2.5-3.0
10-20°C	2.0-2.5
20-30°C	2.0
30-40°C	น้อยกว่า 2.0

อัตราการหายใจของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเรียกว่า optimum temperature หลังจากจุดนี้ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีก อัตราการหายใจจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่การหายใจหยุด เรียกจุดของอุณหภูมิที่ทำให้ผักและผลไม้หยุดการหายใจว่า thermal death point การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมิผลต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวดังแสดงในรูป 2.2 อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจะมีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ



รูป 2.2 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้บางชนิด

(คนัย, 2540)

### ความร้อนจากการหายใจ

ผลของการหายใจทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังสมการ



ซึ่งหมายความว่าในการหายใจที่ใช้น้ำตาลไป 1 กรัม โมเลกุลหรือออกซิเจน 6 กรัม โมเลกุล มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา 6 กรัม โมเลกุลและให้พลังงานความร้อนออกมา 2817 kJ ความร้อนจากการหายใจนี้เรียกว่า vital heat หรือ heat of respiration ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและอุณหภูมิเป็นปัจจัยควบคุมที่สำคัญ ปริมาณความร้อนที่ผลิตผลปล่อยออกมานี้คำนวณได้จากอัตราการหายใจ แสดงวิธีการคำนวณดังนี้

ทุก ๆ 6 g mole ของ  $\text{CO}_2$  ที่ปลดปล่อยออกมาจากการหายใจ ได้พลังงานความร้อน 2817 kJ

6 mg mole  $\text{CO}_2$  ได้พลังงานความร้อน 2817 J

ดังนั้นทุก ๆ 6 x 44 mg  $\text{CO}_2$  ได้พลังงานความร้อน 2817 J

1 mg  $\text{CO}_2$  ได้พลังงานความร้อน  $\frac{2817}{6 \times 44}$  J

ถ้าอัตราการหายใจ = X mg  $\text{CO}_2/\text{kg}\cdot\text{hr}$

จะได้พลังงานความร้อน =  $X \times \frac{2817}{6 \times 44}$  J/kg·hr

### การวัดอัตราการหายใจ

วิธีการวัดอัตราการหายใจสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดปริมาณสารตั้งต้นที่หายใจไป การวัดปริมาณออกซิเจนที่รับเข้าไป หรือการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา นอกจากนี้ยังอาจวัดจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ส่วนการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำอยู่มากกว่า 70% นั้นเป็นไปได้ยาก การวัดอัตราการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์หรืออัตราการใช้ออกซิเจนถือเป็นวิธีที่ง่ายและได้รับความนิยมกว่ามาก ทำได้หลายวิธี เช่น

1. ใช้ระบบปิด (static system) โดยการบรรจุผลิตผลลงในภาชนะปิด แล้ววัดปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลืออยู่ในช่วงเวลาต่าง ๆ การใช้ระบบนี้ผิดพลาดได้ง่าย เพราะปริมาณออกซิเจนที่ลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นในภาชนะ จะส่งผลให้อัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงไปได้

**2. ใช้ระบบเปิด (flow system)** วิธีนี้ผลิตผลถูกเก็บไว้ในภาชนะปิด มีท่ออากาศไหลผ่านเข้าตลอดเวลา ก๊าซจะผ่านออกมาทางท่อซึ่งมีสารเคมีที่ทำหน้าที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การวัดอัตราการหายใจวิธีนี้จะวัดโดยวิธี Gravimetric analysis ของสารที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบนี้ติดตั้งได้ง่าย

ระบบเปิดนี้มีอีกวิธีที่นิยมแพร่หลายมากในห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว โดยเก็บผลิตผลไว้ในภาชนะปิดสนิท มีอากาศเข้าและออก โดยต้องควบคุมอัตราเร็วของการไหลเข้าของก๊าซ วัดอัตราการหายใจโดยอาศัยความแตกต่างของก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลเข้าและไหลออกจากภาชนะ การวัดปริมาณของก๊าซนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ Gas Chromatograph, Infrared Spectroscopy, Colorimeter หรือ Paramagnetic analysis เป็นต้น

การศึกษาในเรื่องของอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการทางความร้อน โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายถือเป็นเรื่องสำคัญ ที่ผ่านมการค้นคว้าวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาแบบอาศัยการทดลองหลาย ๆ ครั้งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม แต่วิธีการดังกล่าวใช้เวลานาน มีต้นทุนค่อนข้างสูง และผลการทดลองก็ใช้ได้เฉพาะกับผลไม้ที่อยู่ในสภาวะที่กำหนดเท่านั้น (Wang *et al.*, 2001)

ทิศทางของงานวิจัยที่น่าจะเป็นประโยชน์และใช้ได้รวดเร็วกว่า ได้แก่การใช้หลักการถ่ายเทความร้อนมาเป็นพื้นฐานการศึกษาร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เพื่อสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในผลิตผล นอกจากนี้ยังช่วยในการออกแบบกระบวนการทางความร้อนให้เหมาะสมกับผลิตผลอีกด้วย (Lurie, 1998; Wang *et al.*, 2001)

### 2.3 หลักการถ่ายเทความร้อน

โดยธรรมชาตินั้นการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่างสสาร 2 ชนิด หรือระหว่างบริเวณ 2 บริเวณ และความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิเป็นสาเหตุทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ผลต่างของอุณหภูมินี้จึงเรียกว่า แรงขับเคลื่อน (driving force) (เมธินี, 2535)

#### 2.3.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อน (เมธินี, 2535)

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้

## 1. การนำความร้อน (conduction)

เกิดขึ้น โดยอนุภาคของสสารเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน หรือให้กับอนุภาคที่วิ่งเข้ามาชน โดยบังเอิญ โดยทั่วไปเราไม่สามารถมองเห็นการเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านี้ด้วยตาเปล่า แต่เราก็สามารถพิสูจน์ได้ว่าการถ่ายเทด้วยกลไกแบบนี้ การถ่ายเทลักษณะนี้เกิดขึ้นได้ดีในสสารที่เป็นของแข็ง ทั้งนี้เพราะอนุภาคของของแข็งอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่าของเหลวหรือแก๊ส

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทแบบนี้ ใช้สมการของฟูเรียร์ (Fourier) ดังนี้

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$q$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้ในหนึ่งหน่วยเวลา (J/s)
	$k$	คือ	ค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
	$A$	คือ	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ )
	$\frac{dT}{dx}$	คือ	ความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทาง $x$

## 2. การพาความร้อน (convection)

เกิดขึ้น โดยสสารเคลื่อนที่และพาความร้อนติดไปด้วย เราสามารถมองเห็นการเคลื่อนไหวของสสารได้ค่อนข้างชัดเจนในหลายๆ กรณี การเคลื่อนไหวนี้อาจเกิดขึ้นได้เองเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน ทำให้สสารมีความหนาแน่นต่างกัน จึงถูกเหนี่ยวนำโดยแรงลอยตัว (buoyancy force) การพาความร้อนด้วยกลไกดังกล่าวนี้ เรียกว่า การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) ถ้าการเคลื่อนไหวของสสารเกิดจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น จากการใช้พัดลมหรือการใช้ปั๊ม จะเรียกการพาแบบนี้ว่า การพาความร้อนแบบถูกบังคับ (forced convection) โดยทั่วไปการพาความร้อนนี้พบมากในของไหล

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทแบบพาความร้อน ใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) นั่นคือ

$$q = hA(T - T_a) \quad (2.3)$$

เมื่อ	$q$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้ในหนึ่งหน่วยเวลา (J/s)
	$h$	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ )
	$A$	คือ	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ )

$T$	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิวที่มีของไหลเคลื่อนที่ผ่าน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_a$	คือ	อุณหภูมิของของไหล ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 3. การแผ่รังสี (radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับการถ่ายเทพลังงานแสงด้วยคลื่นแสง

การถ่ายเทแบบนี้แตกต่างจากแบบอื่น ๆ ในแง่ที่ไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางความร้อนและสามารถถ่ายเทผ่านสุญญากาศได้ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุใดก็ตามที่มีความร้อนจะสามารถส่งพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า วัตถุนั้นสามารถแผ่รังสีได้ พลังงานหรือรังสีที่ส่งออกมานี้จะแผ่ออกไปทุกทิศทาง และเมื่อใดก็ตามที่พลังงานนี้ไปกระทบกับวัตถุอื่น บางส่วนของพลังงานจะถูกวัตถุนั้นดูดไว้ บางส่วนจะสะท้อนกลับคืน และส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านเลยไป

#### 2.3.2 การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัว

การถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว (steady state) เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ ภายในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่เมื่อใดก็ตามที่อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อมแปรผันตามเวลา การถ่ายเทความร้อนจะอยู่ในสภาวะไม่คงตัว (transient หรือ unsteady state) ซึ่งอุณหภูมิและปริมาณความร้อนของวัตถุจะแปรผันตามเวลาและระยะทาง ปัญหาการถ่ายเทความร้อนซึ่งแปรผันกับเวลาถือว่ามีได้ทั่วไปในงานทางวิศวกรรมทั้งในด้านการลดอุณหภูมิและด้านการเพิ่มอุณหภูมิ

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัวค่อนข้างซับซ้อน จึงนิยามแสดงตัวแปรในเทอมที่ไม่มีมิติ (dimensionless number) โดยกำหนดสภาวะเริ่มต้น (initial condition) และสภาวะที่ขอบเขต (boundary condition) ให้ชัดเจน โดยทั่วไปสภาวะไม่คงตัวดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อสภาวะที่ผิวของวัตถุเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่นเมื่ออุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ จะเริ่มเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง ซึ่งการกระจายอุณหภูมิอยู่ในสภาวะคงตัว (Dincer, 1997)

เมื่อพิจารณาผลผลิตที่เก็บเกี่ยวมาและสัมพันธ์กับอากาศเย็น ความร้อนจะถ่ายเทโดยการพาความร้อนจากผิวหน้าไปยังสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังนี้



สำหรับรูปร่างที่เป็นแผ่นบาง (slab)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

สำหรับทรงกระบอก (cylinder)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.5)$$

สำหรับทรงกลม (sphere)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ	$T$	คือ	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$t$	คือ	เวลา (s)
	$x, y, z$	คือ	ระยะทางตามทิศทางของการถ่ายเทความร้อนในแนวตั้งฉาก (m)
	$r$	คือ	ระยะทางในแนวรัศมี (m)
	$k$	คือ	ค่าการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ ( $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ( $\text{kg/m}^3$ )
	$C_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ ( $\text{kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )

### 2.3.3 การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

การหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) สามารถทำได้โดย

1. การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง (Advanced Mathematics) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution)

2. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ประโยชน์จากการใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูงจะก่อให้เกิดผลเฉลยแม่นยำตรงที่ถูกต้องเที่ยงตรงตามตำแหน่งใด ๆ ที่ต้องการ แต่โดยปกติผลเฉลยแม่นยำตรงจะไม่สามารถหาได้ โดยเฉพาะปัญหาทางการปฏิบัติในปัจจุบันที่เงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปแบบของปัญหานั้นมีความซับซ้อน ความซับซ้อนในลักษณะรูปแบบของปัญหาดังกล่าวประกอบกับประสิทธิภาพของเครื่อง

คอมพิวเตอร์ในปัจจุบันทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขตและรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี (ปราโมทย์, 2546) ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้อาจแบ่งได้เป็น 2 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element)

### ระเบียบวิธี finite difference

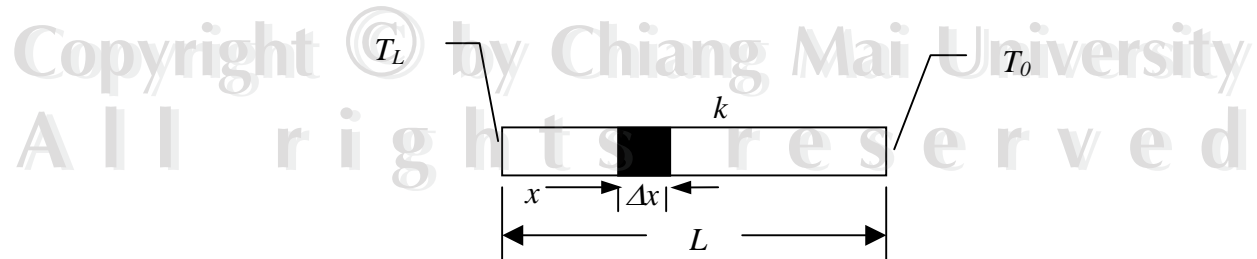
เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้ หลักการของระเบียบวิธีนี้คือการแทนค่าของตัวอนุพันธ์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยสมการทางพีชคณิตโดยประมาณ (algebraic approximation) ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรตามตามจุดต่อต่าง ๆ (grid points) ในขอบเขตรูปร่างของปัญหานั้น

### ระเบียบวิธี finite element

เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้เช่นกัน โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (element) แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น เอลิเมนต์ต่าง ๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าของตัวแปรตามที่ต้องการ

สมการการถ่ายเทความร้อน มีรูปแบบเป็นสมการพาราโบลาโบลิก ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการดังกล่าวมีหลายระเบียบวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธี explicit finite difference (ระเบียบวิธีแบบชัดเจน)

ในเบื้องต้นปัญหาที่จะใช้พิจารณาคือปัญหาของการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งโลหะ ภายใต้สภาวะไม่คงตัว รูป 2.3 แสดงลักษณะของการถ่ายเทความร้อนในแท่งโลหะซึ่งวางตัวตามแนวแกน  $x$  โดยอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามเวลา  $t$



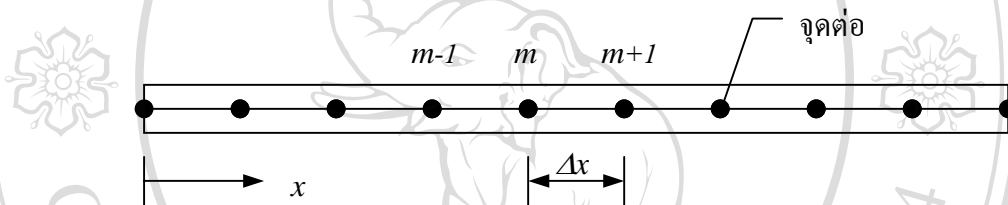
รูป 2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในแท่งโลหะ

(ปราโมทย์, 2546)

ตั้งสมมติฐานให้ค่าการนำความร้อน  $k$  คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ  $T$  และไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง  $x$  ใด ๆ บนแท่งโลหะนั้น จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปแบบสมการพาราโบลา ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

การใช้ระเบียบวิธีแบบชัดเจนนั้น ในขั้นตอนแรกจะทำการแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายส่วน โดยแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากับ  $\Delta x$  ส่วนต่าง ๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ ซึ่งใช้สัญลักษณ์  $m-1, m$  และ  $m+1$  ดังแสดงในรูป 2.4



รูป 2.4 การแบ่งแท่งโลหะออกเป็นหลายส่วนตามระเบียบวิธี finite difference (ปราโมทย์, 2546)

ที่จุดต่อต่าง ๆ คือตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าของอุณหภูมิ  $T$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา  $t$  ประยุกต์วิธี finite difference เข้ากับสมการเชิงอนุพันธ์โดยใช้การประมาณจากผลต่างแบบไปข้างหน้า (forward difference) เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่งที่แปรผันกับเวลา ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta t} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\Delta t$  แทนค่าของช่วงเวลา (time step) และสัญลักษณ์  $n$  ในสมการ (2.8) แทนช่วงเวลาครั้งที่  $n$  ขณะเดียวกันประยุกต์การประมาณของผลต่างแบบตรงกลาง (central difference) เข้ากับพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับระยะ  $x$  ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} - T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2} \quad (2.9)$$

ทั้งสมการ (2.8) และ(2.9) เป็นการประมาณค่าที่ตำแหน่งของเวลาครั้งที่  $n$  หากแทนสมการทั้งสองนี้ลงในสมการเชิงอนุพันธ์ (2.7) จะได้

$$\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}}{(\Delta x)^2} \quad (2.10)$$

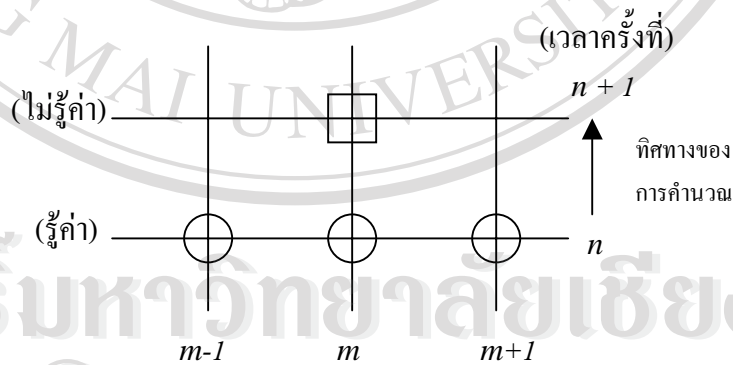
และหลังจากทำการจัดพจน์ต่าง ๆ จะก่อให้เกิดสมการเดียวที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้โดยตรง คือ

$$T_{m,n+1} = T_{m,n} + F_0 (T_{m+1,n} - 2T_{m,n} + T_{m-1,n}) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$F_0 = \frac{k\Delta t}{\rho C_p (\Delta x)^2} \quad (2.12)$$

สมการ (2.11) ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่จุดต่อ  $m$  ณ เวลาครั้งที่  $n+1$  สามารถคำนวณได้โดยตรงจากอุณหภูมิของสามจุดต่อที่  $m-1$ ,  $m$  และ  $m+1$  ซึ่งทราบค่าแล้วจากการคำนวณ ณ เวลาครั้งที่  $n$  ดังแสดงโดยแผนภาพในรูป 2.5



(ตำแหน่งจุดต่อ)

รูป 2.5 แผนภาพการคำนวณโดยระเบียบวิธี finite difference

(ปราโมทย์, 2546)

เนื่องจากค่าของอุณหภูมิที่เวลาใหม่ครั้งที่  $n+1$  สามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการ (2.11) โดยใช้ค่าของอุณหภูมิที่เวลาเก่าครั้งที่  $n$  ระเบียบวิธีนี้จึงถูกเรียกว่าระเบียบวิธีแบบชัดเจน

(explicit method) ถึงแม้ว่าระเบียบวิธีนี้จะประกอบด้วยข้อดีที่ก่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณ แต่การใช้ระเบียบวิธีนี้มีเงื่อนไขที่ว่า  $F_0 \leq 1/2$  ซึ่งจากสมการ (2.12) จะได้

$$\Delta t \leq \frac{\rho C_p (\Delta x)^2}{2k} \quad (2.13)$$

ความหมายของสมการนี้คือหลังจากได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อที่มีระยะห่างเท่ากันเท่ากับค่า  $\Delta x$  ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว จะก่อให้เกิดเงื่อนไขของการใช้  $\Delta t$  สูงสุดได้เพียงค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าเป็นค่าช่วงเวลาวิกฤต (critical time step) หากเราใช้  $\Delta t$  ที่มีค่ามากกว่าค่าดังกล่าวในการคำนวณ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการลู่ออกจากผลลัพธ์ที่ควรจะเป็น

### 2.3.4 สมบัติทางความร้อนของอาหาร

ความเข้าใจในเรื่องตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก ตัวแปรที่สำคัญคือสมบัติทางความร้อนของอาหาร ซึ่งได้แก่ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อนและค่าการแพร่ความร้อน สมบัติทางความร้อนของอาหารขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอาหาร อุณหภูมิและโครงสร้างทางกายภาพ อาหารต่างชนิดกันและสภาวะแตกต่างกันจึงมีสมบัติทางความร้อนต่างกัน (สิริลักษณ์, 2542)

#### 1. ค่าความร้อนจำเพาะ (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995; Hwang and Gunasekaran, 2003)

ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat;  $C_p$ ) หมายถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาที่ความดันคงที่ ค่าความร้อนจำเพาะมีหน่วยในระบบ SI และระบบอังกฤษเป็น  $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$  และ  $\text{Btu/lb}\cdot^\circ\text{F}$  ตามลำดับ

การหาค่าความร้อนจำเพาะมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีผสม (method of mixtures) วิธีเปรียบเทียบ (comparison method) และวิธีการใช้แผ่นความร้อนไฟฟ้า (method of guarded plates) และวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นต้น

#### Method of mixtures

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยจะใช้ตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักและอุณหภูมิ ใ้ลดลงไปในแคลอรีมิเตอร์ที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ และบรรจุตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจเป็นน้ำหรือของเหลวที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ น้ำหนัก และอุณหภูมิ จากนั้นปล่อยให้

ตัวอย่างกับตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนกันจนเข้าสู่สมดุล ค่าความร้อนจำเพาะสามารถหาได้จาก การทำสมดุลพลังงานระหว่างตัวกลางกับตัวอย่าง ดังสมการ

$$C_p = \frac{C_{p,ex} m_{ex} (T_{i,ex} - T_{eq}) - C_c m_c (T_{eq} - T_{i,c})}{m_s (T_{eq} - T_{i,s})} \quad (2.14)$$

เมื่อ	$C_c$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์ (kJ/kg·°C)
	$C_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (kJ/kg·°C)
	$C_{p,ex}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (kJ/kg·°C)
	$m_c$	คือ	มวลของแคลอรีมิเตอร์ (kg)
	$m_{ex}$	คือ	มวลของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (kg)
	$m_s$	คือ	มวลของตัวอย่าง (kg)
	$T_{eq}$	คือ	อุณหภูมิสมดุลของของผสม (°C)
	$T_{i,c}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของแคลอรีมิเตอร์ (°C)
	$T_{i,ex}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
	$T_{i,s}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง (°C)

### Method of guarded plates

วิธีใช้แผ่นความร้อนไฟฟ้านี้เป็นการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบค่าความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นความร้อนคือจาก  $T_1$  ไปเป็น  $T_2$  ภายในเวลา  $t$  พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิกำนวนจากค่าความต่างศักย์ ( $V_t$ ) และ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่างได้จากการทำสมดุลพลังงาน คำนวนจากสมการ

$$C_p = \frac{V_t \times I \times t}{m_s (T_2 - T_1) \times 1000} \quad (2.15)$$

เมื่อ	$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (A)
	$t$	คือ	เวลา (s)
	$V_t$	คือ	ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย (V)

### Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermal analysis) ประเภทหนึ่งที่ใช้ตรวจหาปริมาณความร้อน (heat flow) ที่เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุเทียบกับเวลาและอุณหภูมิ มีการนำเทคนิค

DSC ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างเร็ว เตรียมตัวอย่างได้ง่าย ทดสอบตัวอย่างได้ทั้งของแข็งและของเหลว

DSC เป็นการวัดความแตกต่างของพลังงานที่ให้แกตัวอย่างเทียบกับวัสดุอ้างอิงที่ อุณหภูมิเดียวกัน ความแตกต่างของพลังงานดังกล่าวแปรผัน โดยตรงกับค่าความร้อนจำเพาะของ ตัวอย่าง วิธีการวัดค่าความร้อนจำเพาะประกอบไปด้วยการหาเส้น base line การหาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนของตัวอย่างและของวัสดุอ้างอิง ดังรูป 2.6 นิยมใช้ sapphire เป็น วัสดุอ้างอิง เนื่องจากให้การตอบสนองเป็นแบบเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิกว้าง และมีความบริสุทธิ์ สูง ที่ช่วงอุณหภูมิ  $273\text{ K} < T_k < 1973\text{ K}$  ค่าความร้อนจำเพาะของ sapphire คำนวณได้จาก  $0.906 + 0.000368T_k - 21440.884/T_k^2$  (Perry *et al.*, 1984) ค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง คำนวณจากสมการ

$$C_p = \frac{m_{ref} H_s}{m_s H_{ref}} C_{p,ref} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $C_{p,ref}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุอ้างอิง (kJ/kg·°C)

$H_{ref}$  คือ ความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุอ้างอิงเทียบกับเส้น base line

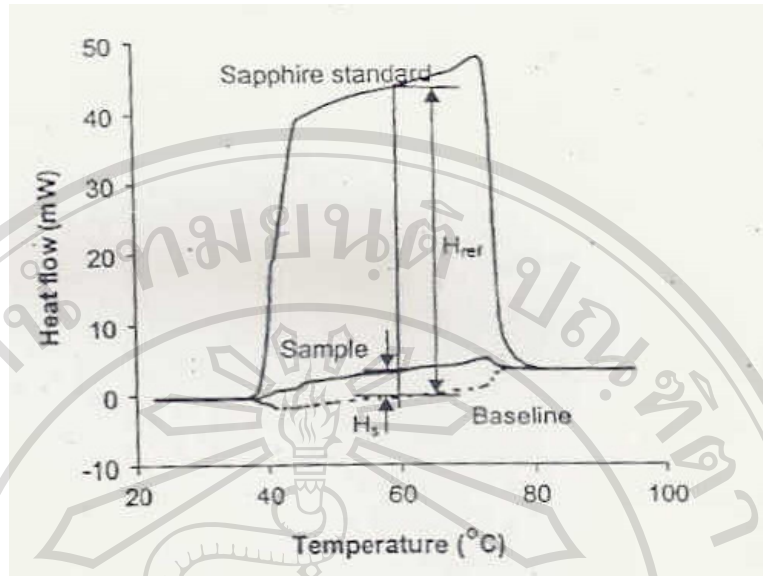
$H_s$  คือ ความแตกต่างของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างเทียบกับเส้น base line

$m_{ref}$  คือ มวลของวัสดุอ้างอิง (kg)

$m_s$  คือ มวลของตัวอย่าง (kg)

$T_k$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)

ปัจจัยที่จะต้องให้ความสำคัญเพราะมีผลต่อความถูกต้องในการทดลองเพื่อหาค่า ความร้อนจำเพาะ ได้แก่ ขนาดของตัวอย่าง อัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ และการปิดผนึกของ ตัวอย่าง นอกจากนี้ ตัวอย่างที่ใช้วัดค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีการนี้จะต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity)



รูป 2.6 กราฟที่ได้จากการใช้ Differential Scanning Calorimetry ในการหาค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง (Hwang and Gunasekaran, 2003)

### ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะกับปัจจัยต่าง ๆ

การหาสมบัติทางความร้อนของอาหารนอกจากการวัดโดยตรงด้วยอุปกรณ์วัดแล้ว ยังสามารถหาได้จากข้อมูลงานวิจัยต่าง ๆ ที่รวบรวมข้อมูลไว้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน แต่เนื่องจากข้อมูลมีจำกัด มักไม่ตรงกับตัวอย่างอาหารหรือสภาวะที่ต้องการ เช่น มีปริมาณความชื้นหรืออุณหภูมิต่างกัน สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นอีกวิธีที่รวดเร็วและให้ค่าถูกต้องตรงตามสภาวะที่ต้องการ (สิริลักษณ์, 2542)

สมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายสมบัติทางความร้อนของอาหารแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical model) และแบบจำลองแบบเอมไพริคอล (Empirical model) แบบจำลองส่วนมากเป็นแบบเอมไพริคอลได้จากการนำข้อมูลจริงมาสร้างสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการทางสถิติ เป็นสมการความสัมพันธ์ของสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ ในสภาวะที่ศึกษา มีหลายปัจจัยที่นำมาใช้ในการทำนายค่า เช่น ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ องค์ประกอบของอาหาร ความหนาแน่น สัดส่วนช่องว่าง (void space) ทิศทางการไหลของความร้อนผ่านตัวอย่างอาหาร เป็นต้น



Siebel (1892) ได้ทำการวัดค่าความร้อนจำเพาะของอาหารบางชนิด เช่น ไข่ เนื้อ ผัก และผลไม้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น และปริมาณของแข็ง พบว่ารูปแบบของสมการจะเป็นแบบเส้นตรง คือ

$$C_p = a + bx_w \quad (2.17)$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดอาหารและเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์  
 $x_w$  คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้น

ในอดีตที่ผ่านมา นักวิจัยได้ทำการพัฒนารูปแบบความสัมพันธ์แสดงออกมามากมาย สมการต่อไปนี้ใช้สำหรับหาค่าความร้อนจำเพาะจากปริมาณความชื้นของอาหารที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง

$$C_p = 0.837 + 3.349x_w \quad (\text{Siebel, 1892})$$

$$C_p = 1.200 + 2.990x_w \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

$$C_p = 1.672 + 2.508x_w \quad (\text{Riedel, 1969 cited in Dincer, 1997})$$

$$C_p = 1.400 + 3.220x_w \quad (\text{Sharma and Thompson, 1973})$$

$$C_p = 1.256 + 2.931x_w \quad (\text{Comini et al., 1974})$$

$$C_p = 1.382 + 2.805x_w \quad (\text{Dominguez et al., 1974})$$

$$C_p = 1.381 + 2.930x_w \quad (\text{Fikiin, 1974})$$

$$C_p = 1.470 + 2.720x_w \quad (\text{Lamb, 1976})$$

พบว่าทุกสมการมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าเป็น 4.187 kJ/kg·°C หากปริมาณความชื้นลดลงค่าความร้อนจำเพาะจะเปลี่ยนแปลงได้มาก จึงมีแนวคิดในการนำค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบอื่นในอาหารมาพิจารณาด้วย ได้แก่ ค่าความร้อนจำเพาะของโปรตีน ไขมัน เกล็ดและคาร์โบไฮเดรต มีผู้รายงานความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าวแสดงดังนี้

$$C_p = 1.6747x_f + 0.8374x_{snf} + 4.1868x_w \quad (\text{Siebel, 1892})$$

สมการข้างต้นใช้สำหรับอาหารที่มีไขมันสูง

$$C_p = (0.5x_f + 0.3x_s + x_w)4.180 \quad (\text{Leninger and Beverloo, 1975})$$

$$C_p = 1.547x_c + 1.711x_p + 1.928x_f + 0.908x_a + 4.180x_w \quad (\text{Choi and Okos, 1983})$$

$$C_p = 1.424x_c + 1.549x_p + 1.675x_f + 0.837x_a + 4.187x_w \quad (\text{Singh and Heldman, 1993})$$

เมื่อ	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·°C)
	$x_w$	คือ สัดส่วนโดยมวลของน้ำ
	$x_s$	คือ สัดส่วนโดยมวลของของแข็ง
	$x_p$	คือ สัดส่วนโดยมวลของโปรตีน
	$x_f$	คือ สัดส่วนโดยมวลของไขมัน
	$x_a$	คือ สัดส่วนโดยมวลของเถ้า
	$x_c$	คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์โบไฮเดรต
	$x_{snf}$	คือ สัดส่วนโดยมวลของของแข็งที่ไม่รวมไขมัน

โดยทั่วไปสมการของ Choi and Okos (1983) และ Singh and Heldman (1993) จะให้ผลที่ค่อนข้างถูกต้องเพราะคิดจากองค์ประกอบในอาหารทุกชนิด แต่พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบภายใน ตัวอย่างเช่น โปรตีนในนมและโปรตีนในถั่วเหลืองซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะไม่เท่ากัน Singh and Heldman (1993) ใช้ค่าความร้อนจำเพาะของไขมันในรูปของแข็งเป็น 1.675 kJ/kg·°C แต่ค่าความร้อนจำเพาะของไขมันในรูปของเหลว เป็น 2.094 kJ/kg·°C ส่วนค่าในสมการของ Choi and Okos (1983) ได้จากสถิติการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์อาหารในช่วงกว้าง จึงได้เป็นค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยขององค์ประกอบทุกชนิด คือ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้า (Sweat, 1994)

ถึงแม้สมการความสัมพันธ์เหล่านี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ แต่พบว่าการใช้สมการดังกล่าวถือว่ามีความถูกต้องในทางวิศวกรรม (engineering accuracy) คือ 2-5 %

สมการอย่างง่ายที่ใช้ทำนายค่าความร้อนจำเพาะของอาหารจากปริมาณของแข็งเพียงอย่างเดียว ได้แก่สมการของ Chen (1985) ซึ่งได้รับการยอมรับโดย American Society for Heating, Refrigeration and Air Condition Engineers (ASHARE, 1998)

$$C_p = 4.19 - 2.30x_s - 0.628x_s^3 \quad (\text{Chen, 1985})$$

มีบางสมการที่นำผลของอุณหภูมิมาคิดด้วย เช่น สมการของ Fernández-Martín (1972) ซึ่งใช้กับนมที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง

$$C_p = 4.187x_w + [(1.373 + 0.113T)(1 - x_w)] \quad (\text{Fernández-Martín, 1972})$$

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิของอาหาร ( $^{\circ}\text{C}$ )

งานวิจัยที่ศึกษาทั้งผลของความชื้นและอุณหภูมิ เช่น Tang *et al.* (1991) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของ lentil seed เพิ่มขึ้นแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (quadratic) กับความชื้นในช่วงร้อยละ 2.1-25.8 และมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิในช่วง  $10-80^{\circ}\text{C}$  หากพิจารณาผลของความชื้นเพียงอย่างเดียว จะอธิบายความผันแปรของค่าความร้อนจำเพาะได้ร้อยละ 71 และเมื่อพิจารณาทั้งผลของความชื้นและอุณหภูมิจะอธิบายได้ร้อยละ 98 จึงเสนอสมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะที่ขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิ มีรูปแบบดังนี้

$$C_p = C_1 + C_2T + C_3x_w + C_4x_w^2 \quad (2.18)$$

Wang and Brennan (1993) ศึกษาค่าความร้อนจำเพาะของมันฝรั่งในช่วงอุณหภูมิ  $40-70^{\circ}\text{C}$  และสัดส่วนความชื้น (ฐานแห้ง) 0-4.15 พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของมันฝรั่งเพิ่มอย่างเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ และเพิ่มแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสองกับความชื้น มีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับของ Tang *et al.* (1991)

Vagenas *et al.* (1990) ได้พัฒนาสมการทำนายค่าความร้อนจำเพาะของอาหารประเภทผัก ผลไม้ และธัญญาหาร โดยใช้ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงด้วยวิธีการถดถอย เสนอสมการเอ็มไพริคอลมีรูปแบบเป็นสมการเส้นตรงแปรผันตามความชื้นและอุณหภูมิ ดังนี้

$$C_p = C_1 + C_2T + C_3x_w \quad (2.19)$$

เมื่อ  $C_i$  คือ ค่าคงที่

## 2. ค่าการนำความร้อน (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995; Dincer, 1997)

ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity;  $k$ ) ของวัสดุ เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน หรือความสามารถในการยอมให้ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน สำหรับด้านอาหารนั้นค่าการนำความร้อนขึ้นอยู่กับโครงสร้าง องค์ประกอบ ชนิดของวัสดุ และ อุณหภูมิ อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน เช่น รูปร่าง ความเป็นรูพรุน (porosity) ความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) และความดัน เป็นต้น

โดยทั่วไปการวัดค่าการนำความร้อนแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบอาศัยการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัว (steady state) และแบบอาศัยการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state) แต่ละแบบทำได้หลายวิธี ดังจำแนกในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 เทคนิคการวัดค่าการนำความร้อน (Dincer, 1997)

steady state	unsteady state
steady state longitudinal heat flow method - guarded hot plate technique - ASTM standards (C-518, C-236 and C-231)	fitch technique line heat source technique plane heat source technique statistical modeling technique
steady state radial heat flow method - cylinder without end guards - cylinder with end guards - sphere with central heating source - concentric cylinder comparative technique	frequency response technique packed bed analysis technique
steady state heat of vaporization method	

### Guarded hot plate technique

เป็นวิธีที่นิยมใช้ในวัสดุประเภทที่ไม่ใช่อาหาร อุปกรณ์ประกอบด้วยแหล่งให้ความร้อนที่ล้อมรอบด้วยตัวอย่างและอ่างความร้อน (heat sink) โดยปลายทั้งสองด้านหุ้มด้วยฉนวนหรือแผ่นป้องกันเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ผลเฉลยของสมการการนำความร้อนแบบทิศทางเดียวในสถานะคงตัวสำหรับวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวและไม่มีความร้อนเกิดขึ้น เป็นดังนี้

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{l} \quad (2.20)$$

เมื่อ $Q$	คือ ปริมาณความร้อน
$T_1$	คือ อุณหภูมิภายใน
$T_2$	คือ อุณหภูมิภายนอก
$l$	คือ ความหนาของตัวอย่าง

### Line heat source technique

เนื่องจากการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุชีวภาพที่สถานะคงตัวต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ห้านาน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิ วิธี line heat source technique เป็นการวัดค่าการนำความร้อนในสถานะไม่คงตัวซึ่งนิยมใช้ในอาหารเนื่องจากสะดวก รวดเร็ว ต้นทุนต่ำ ใช้กับตัวอย่างที่มีขนาดเล็กได้ และในกรณีที่ตัวอย่างมีขนาดใหญ่ รูปทรงของตัวอย่างจะไม่มีผลต่อการหาค่าการนำความร้อน วิธีนี้จะใช้ probe ที่มีขนาดเล็กภายในมิชเซลล์ให้ความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล คำนวณหาค่าการนำความร้อนจากสมการการนำความร้อนในสถานะไม่คงตัว

### ความสัมพันธ์ของค่าการนำความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ

ค่าการนำความร้อนของสารบริสุทธิ์ เช่น ไขมัน (ปราศจากน้ำ) อาจกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ เช่น

$$k = 0.46 \quad (\text{เนื้อ}) \quad (\text{Sweat, 1975})$$

$$k = 0.50 \quad (\text{เนื้อ}) \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

$$k = 0.18 \quad (\text{ไขมัน}) \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

สำหรับอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักนั้นสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าการนำความร้อนมีรูปแบบสมการเหมือนกับค่าความร้อนจำเพาะ ดังนี้

$$k = 0.26 + 0.34x_w \quad (\text{Backstrom and Emblik, 1965 cited in Dincer, 1997})$$

$$k = 0.056 + 0.567x_w \quad (\text{Bowman, 1970 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.081 + 0.568x_w \quad (\text{Bowman, 1970 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.140 + 0.42x_w \quad (\text{น้ำผลไม้}) \\ (\text{Kolarov and Gromov, 1973 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.564 + 0.0858x_w \quad (\text{ข้าวฟ่าง}) \\ (\text{Sharma and Thompson, 1973})$$

$$k = 0.0324 + 0.329x_w \quad (\text{ปลา}) \\ (\text{Annamma and Rao, 1974 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.26 + 0.33x_w \quad (\text{Comini et al., 1974})$$

$$k = 0.096 + 0.34x_w \quad (\text{เนื้อมด}) \\ (\text{Sorenfors, 1974 cited in Lamb, 1976})$$

$$k = 0.148 + 0.493x_w \quad (\text{ผักและผลไม้}) \\ (\text{Sweat, 1974})$$

$$k = 0.080 + 0.52x_w \quad (\text{เนื้อและปลา}) \\ (\text{Sweat, 1975})$$

เพื่อที่จะให้ได้ช่วงอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งที่กว้างขึ้น ในสมการควรจะคิดถึงผลของอุณหภูมิโดยรวมเทอม อุณหภูมิ ( $T$ ) และค่ายกกำลังสองของอุณหภูมิ ( $T^2$ ) ไว้ในสมการด้วย เพราะค่าการนำความร้อนของน้ำแปรผันเป็นแบบยกกำลังสองกับอุณหภูมิ (Sweat, 1994)

สำหรับอาหารเหลวโดยส่วนใหญ่ และอาหารในรูปของแข็งหลายชนิด สามารถคิดผลขององค์ประกอบทางเคมี เช่น น้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้าได้ โดยมีการพัฒนาสมการสำหรับหาค่าการนำความร้อนของอาหารเหลวจากองค์ประกอบดังกล่าว พบว่าค่าที่ทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดโดยตรง (Dominguez et al., 1974; Choi and Okos, 1983; Sweat, 1994)

$$k = 0.60x_w + 0.20x_p + 0.18x_f + 0.245x_c \quad (\text{Dominguez et al., 1974})$$

$$k = 0.61x_w + 0.20x_p + 0.175x_f + 0.135x_a + 0.205x_c \quad (\text{Choi and Okos, 1983})$$

$$k = 0.58x_w + 0.155x_p + 0.16x_f + 0.135x_a + 0.25x_c \quad (\text{Sweat, 1994})$$

สมการหาค่าการนำความร้อนที่นำอุณหภูมิของอาหารมาคิดด้วยได้แก่สมการของ Miles *et al.* (1983) cited in Rahman (1995)

$$k = 0.344x_w - 0.0644x_p - 0.133x_f + 0.0008T$$

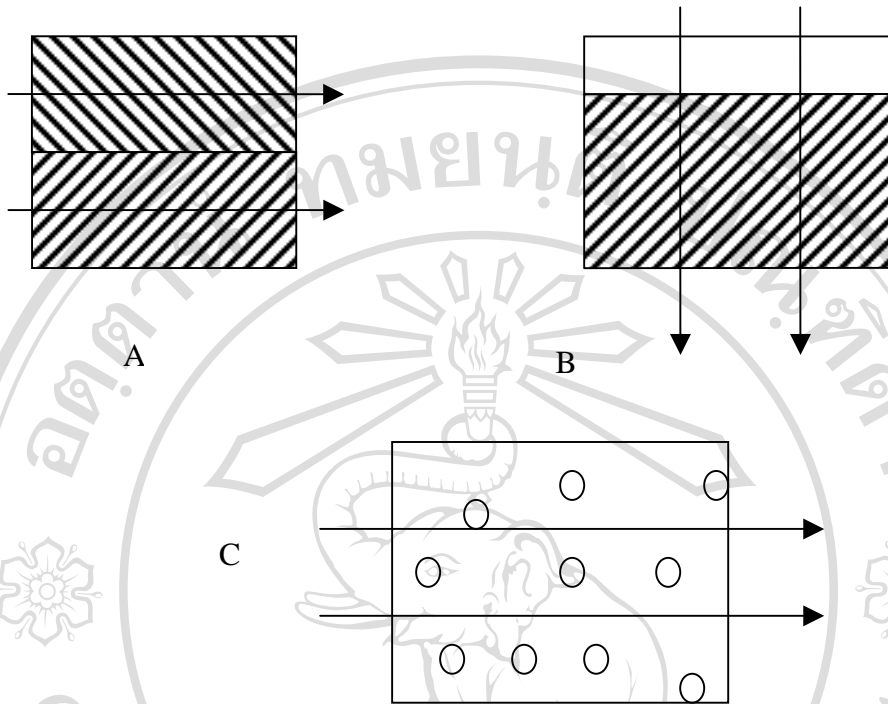
(Miles *et al.*, 1983 cited in Rahman, 1995)

เมื่อ	$k$	คือ ค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
	$x_w$	คือ สัดส่วนโดยมวลของน้ำ
	$x_p$	คือ สัดส่วนโดยมวลของโปรตีน
	$x_f$	คือ สัดส่วนโดยมวลของไขมัน
	$x_a$	คือ สัดส่วนโดยมวลของเถ้า
	$x_c$	คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์โบไฮเดรต

อย่างไรก็ตามสมการเหล่านี้ไม่คิดผลของอุณหภูมิจึงใช้ได้ที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง ในช่วงแคบ ๆ และให้ผลไม่ถูกต้องมากนักสำหรับอาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

แบบจำลองที่ใช้ได้ดีอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการหาค่าการนำความร้อน โดยใช้หลักทางเรขาคณิต (geometry – based) รูป 2.7 แสดงแบบจำลองที่ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของอาหาร

ในรูป A เป็นแบบจำลองค่าการนำความร้อนแบบขนาน (parallel model) สำหรับกรณีที่ต้องประกอบจัดเรียงตัวตามลักษณะทางกายภาพ (physically oriented) ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านแต่ละองค์ประกอบมีทิศทางขนานกัน รูป B เป็นแบบจำลองค่าการนำความร้อนแบบตั้งฉาก (perpendicular model) โดยตั้งสมมติฐานว่าการถ่ายเทความร้อนมีทิศทางตั้งฉากกับการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบ รูป C เป็นแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องประกอบหนึ่งกระจายตัวอยู่ในอีกองค์ประกอบหนึ่ง (disperse phase in continuous phase)



รูป 2.7 แบบจำลองค่าการนำความร้อนที่มีพื้นฐานจากรขาคณิต  
 ( A ) parallel model, ( B ) perpendicular model,  
 ( C ) disperse phase in continuous phase

(Sweat, 1994)

สมการที่ใช้หาค่าการนำความร้อนของแต่ละแบบเป็นดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
 Copyright © by Chiang Mai University  
 All rights reserved

$$k = v_1 k_1 + v_2 k_2 \quad (A)$$

$$k = \left( \frac{v_1}{k_1} + \frac{v_2}{k_2} \right)^{-1} \quad (B)$$

$$k = k_c \frac{1-C}{1-C(1-M)} \quad (C)$$

เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  คือ ค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบ 1 และ 2 ตามลำดับ  
 $v_1$  และ  $v_2$  คือ สัดส่วนปริมาตรขององค์ประกอบ 1 และ 2 ตามลำดับ



$k_c$	คือ ค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบที่เป็น continuous phase
$M$	คือ สัดส่วนปริมาตรขององค์ประกอบที่เป็น disperse phase
และ $C$	คือ ค่าที่คำนวณจากสมการ

$$C = M^2 \left( 1 - \frac{k_d}{k_c} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k_d$  คือ ค่าการนำความร้อนขององค์ประกอบที่เป็น disperse phase

### 3. ความหนาแน่น (Mohsenin, 1980; Rahman, 1995)

ความหนาแน่น (density;  $\rho$ ) เป็นหนึ่งในสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญและนำไปใช้คำนวณในหลาย ๆ กระบวนการ ความหนาแน่น คืออัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรมีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$  ในระบบ SI และ  $\text{lb/ft}^3$  ในระบบอังกฤษ

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.22)$$

ความหนาแน่นมีหลายชนิด ที่สำคัญ ได้แก่

1) Bulk density แสดงถึงความหนาแน่นของวัสดุเมื่อบรรจุหรือเรียงตัว ดังนั้น ปริมาตรที่ใช้คำนวณจึงรวมถึงปริมาตรของช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการบรรจุด้วย ตัวอย่างเช่น เมล็ดข้าวโพดความชื้น 7% ที่เก็บในไซโล มีความหนาแน่นเป็น  $47 \text{ lb/ft}^3$

2) Apparent density แสดงถึงค่าความหนาแน่นของวัสดุที่คิดรวมช่องว่างที่อยู่ภายในวัสดุด้วย ตัวอย่างเช่น ค่า apparent density ของเมล็ดข้าวโพด คือน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดแต่ละเมล็ดหารด้วยปริมาตรของเมล็ดข้าวโพด มีค่าเป็น  $80 \text{ lb/ft}^3$

3) True density เป็นความหนาแน่นของสารบริสุทธิ์หรือวัสดุที่คำนวณจากปริมาตรของของแข็งภายในวัสดุ นั่น ๆ ตัวอย่างเช่น ค่า true density ของเมล็ดข้าวโพดที่บดและมีขนาดอนุภาค  $300 \mu\text{m}$  มีค่าประมาณ  $96 \text{ lb/ft}^3$

เนื่องจากความหนาแน่นเป็นการคำนวณจากมวลต่อปริมาตร การหาปริมาตรของวัตถุทำได้หลายวิธี ได้แก่การวัดจากขนาดของวัตถุโดยตรง (dimension measurement) การคำนวณจากแรงลอยตัว (buoyant force determination) วิธีแทนที่ปริมาตร (volume displacement method) โดยใช้ของเหลว (liquid displacement method) ใช้ก๊าซ (gas pycnometer method) หรือใช้วิธีแทนที่ด้วยของแข็ง (solid displacement method) เป็นต้น

#### 4. ค่าการแพร่ความร้อน

ค่าการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity;  $\alpha$ ) เป็นสมบัติทางความร้อนที่คำนวณจากค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น มีรูปแบบสมการเป็น

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.23)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าการแพร่ความร้อนจากองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ Riedel's correlation (Riedel, 1969 cited in Dincer, 1997)

$$\alpha = 0.88 \times 10^{-7} + (\alpha_w - 0.88 \times 10^{-7}) x_w \quad (\text{Riedel, 1969 cited in Dincer, 1997})$$

เมื่อ  $\alpha_w$  คือ ค่าการแพร่ความร้อนของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอาหาร ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ได้เมื่อตัวอย่างมีความชื้นสูงกว่า 40% และมีอุณหภูมิ 0-80°C

Martens (1980) ได้ศึกษาผลของน้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตและอุณหภูมิต่อค่าการแพร่ความร้อนของอาหาร พบว่าอุณหภูมิและปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าการแพร่ความร้อน ดังสมการ

$$\alpha = [0.057363x_w + 0.000288(T + 273)] \times 10^{-6} \quad (\text{Martens, 1980})$$

นอกจากสมบัติทางความร้อนที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ยังมีสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ ลักษณะทางมิติ (dimensional characteristic) เช่น รูปร่าง ขนาด พื้นที่ผิว ปริมาตร ความเป็นทรงกลม ความหนืดของของไหลเป็นต้น (Mohsenin, 1980)

#### 2.4 การประยุกต์หลักการถ่ายเทความร้อนกับการจัดการผลิตผลทางการเกษตร

ได้มีการประยุกต์ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนร่วมกับการใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ ในการจัดการผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยว เช่นงานวิจัยของ Varith *et al.* (2002) ซึ่งประยุกต์หลักการถ่ายเทความร้อนในการคัดเกรดผลแอปเปิล โดยพบว่าในผลแอปเปิลที่มีรอยช้ำนั้นสมบัติทางความร้อนในเนื้อเยื่อที่เสียหายจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น 20% ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น 5% ส่วนค่าความร้อนจำเพาะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อเยื่อที่เสียหายจึงเพิ่มขึ้น 14.3% มีผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผลไปยังภายใน

เกิดขึ้นได้เร็วกว่าเนื้อเยื่อปกติที่อยู่รอบข้าง อุณหภูมิที่ผิวแอปเปิลในบริเวณที่มีรอยขีดจึงมีค่าต่ำกว่าที่ผิวปกติ 1-2°C

Wang *et al.* (2001) พัฒนาแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธี finite difference เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น สมบัติทางความร้อน ขนาดของผลไม้ ชนิดและความเร็วของตัวกลาง แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีต่อระยะเวลาในการให้ความร้อนผลไม้ โดยพบว่าสมบัติทางความร้อนมีผลต่อระยะเวลาในการให้ความร้อนไม่มากนัก ส่วนใหญ่การถ่ายเทความร้อนภายในแปรผันกับขนาดของผลไม้และชนิดของตัวกลาง โดยน้ำมีประสิทธิภาพมากกว่าอากาศ การเพิ่มความเร็วของอากาศจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วของน้ำกลับมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนน้อย ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $Bi$  ที่คำนวณได้ในแต่ละความเร็วมีค่าสูงกว่า 50 ซึ่งบ่งชี้ว่าความต้านทานความร้อนที่ผิวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานภายใน การเพิ่มความเร็วของน้ำจึงไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิที่ใช้นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิใจกลางผลมีค่าเป็น 1.10°C และที่ผิวมีความแตกต่างเป็น 0.30°C นอกจากนี้ยังมีการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในผลแดงกวางขณะผ่านกระบวนการลวกโดยใช้ระเบียบวิธี finite difference ซึ่งผลการศึกษາสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและออกแบบเครื่องมือให้เหมาะสมกับกระบวนการได้เป็นอย่างดี (Fasina and Fleming, 2001)

ในสตรอเบอร์รี่ Scheerlinck *et al.* (2004) ร่วมกันศึกษาผลของกระบวนการทางความร้อนเพื่อลดการปนเปื้อนที่ผิว โดยใช้ระเบียบวิธี finite element ติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร่วมกับตัวแปรที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และพบว่าทำให้ความร้อนเป็นช่วงสั้น ๆ จะลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในได้ดีกว่า ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียคุณภาพของสตรอเบอร์รี่ลดลง

ในด้านการทำความเย็น มีการประยุกต์ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ โดย Alvarez and Trystram (1995) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศเย็นกับผลิตภัณฑ์การเกษตรที่บรรจุและวางเรียงบน pallet พบว่าที่ความเร็วลมเท่ากัน การใช้แบบจำลองจะช่วยให้ทราบตำแหน่งที่ร้อนที่สุด (hottest point) และตำแหน่งที่เย็นที่สุด (coldest point) นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วลมมีผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิจึงลดลง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงมากจะมีผลต่อการลดอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน ผลจากงานวิจัยนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการทำความเย็นให้เหมาะสม ทำให้ระยะเวลาในการทำความเย็นลดลงได้ 20% ซึ่งมีผลต่อการประหยัดพลังงานโดยรวม ในด้านคุณภาพได้มีการประยุกต์ใช้ในการศึกษา

การสูญเสียคุณภาพ โดยพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล การเพิ่มความเร็วของอากาศจะทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพของผลผลิตระหว่างการเก็บรักษา แต่ในทางตรงกันข้าม การสูญเสียคุณภาพของผลผลิตระหว่างการเก็บรักษาจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศโดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมากกว่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Tashtoush, 2000)

Fikiin *et al.* (1999) ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวหน้าขณะทำความเย็นผลไม้บางชนิด ได้แก่ สตรอเบอร์รี่ ราสเบอร์รี่ แอปริคอต พีช องุ่น และแอปเปิล ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้ นอกจากนี้ยังมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการถ่ายเทมวลสารและพลังงานความร้อนของผลผลิตภายในภาชนะบรรจุในสภาวะอากาศเย็น โดยคำนึงถึงปัจจัยและรูปแบบการถ่ายเททุกกรณีที่เกิดขึ้นระหว่างผลิตผล ภาชนะบรรจุ และตัวกลางความร้อน (Tanner *et al.*, 2002)

นอกจากงานด้านพืชสวนแล้ว การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนยังใช้กันแพร่หลายในงานด้านพืชไร่ Khabba *et al.* (1999) ได้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฝักข้าวโพดและทดสอบแบบจำลองทั้งในขณะทำความเย็นและให้ความร้อน โดยแบ่งโครงสร้างภายในเป็น 3 ชั้นคือ เปลือกข้าวโพด (husk) เมล็ดข้าวโพด (kernel) และชังข้าวโพด (cob) อุณหภูมิที่ทำนายได้เปรียบเทียบกับทดลองพบว่ามี ความแตกต่างอยู่ที่  $0.4^{\circ}\text{C}$  และ  $1.0^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ (ช่วงอุณหภูมิ  $5-25^{\circ}\text{C}$ )

ในการเก็บรักษาเมล็ดพืช กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายในถึงเก็บมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเมล็ด แบบจำลองการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในถึงสามารถทำนายได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ตัวอย่างเช่นการเก็บข้าวเปลือกในถึงทรงกระบอกซึ่ง Abe and Basunia (1996) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกระจายความชื้นในสภาวะอากาศที่แปรผันตามฤดูกาล โดยใช้วิธี finite difference เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ พบว่ามีความแตกต่างอยู่ที่  $1.5-1.8^{\circ}\text{C}$  ผลจากการวิจัยพบว่าเมื่อเมล็ดแห้งอย่างเหมาะสมและไม่มีการถ่ายเทความชื้นผ่านผนังของถึงเก็บ จะสามารถเก็บรักษาผลผลิตได้โดยไม่มีแมลงมารบกวนตลอดช่วงฤดูหนาว (อุณหภูมิต่ำกว่า  $20^{\circ}\text{C}$ ) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิในสภาวะไม่คงตัวในถึงเก็บข้าวสาลีโดยใช้ระเบียบวิธี finite element ซึ่งมีประโยชน์ในการพัฒนาและออกแบบกระบวนการระบายอากาศภายใน ทำให้ลดปริมาณการใช้สารเคมีระหว่างการเก็บรักษาลงได้ (Jia *et al.*, 2001)