

การออกแบบและทดสอบระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นสำหรับ
ข้าวโพดหวานและแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน
ขณะลดอุณหภูมิ

DESIGN AND TESTING OF HYDROCOOLING SYSTEM FOR SWEET CORN
AND PREDICING MODEL OF SWEET CORN TEMPERATURE
DURING PRECOOLING

พัชรี คล้ายมณี

PHATCHAREE KLAIMANEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-100-074

**DESIGN AND TESTING OF HYDROCOOLING SYSTEM FOR SWEET CORN
AND PREDICING MODEL OF SWEET CORN TEMPERATURE
DURING PRECOOLING**

PHATCHAREE KLAIMANEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010
KMITL-2010-EN-M-100-074**

COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและทดสอบระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นสำหรับข้าวโพดหวานและแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิ

Thesis Title Design and Testing of Hydrocooling System for Sweet Corn and Predicting Model of Sweet Corn Temperature During Precooling

นักศึกษา นางสาวพัชรี คล้ายมณี

รหัสประจำตัว 51061206

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-100-074

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.จิราภรณ์	เบญจประกายรัตน์	
ดร.ประสันต์	ชุ่มใจหาญ	
ผศ.ดร.ศิวลักษณ์	ปฐวีรัตน์	
ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ	พรเฉลิมพงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์คืนแก่ตนบุญ
วันที่ 31 เดือน พ.ค. พ.ศ. 53
ลงชื่อ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและทดสอบระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นสำหรับข้าวโพดหวานและแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพัชรี กล้ายมณี
รหัสประจำตัว	51061206
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นสำหรับข้าวโพดหวานซึ่งได้ถูกพัฒนาเป็นสองระบบ : แบบจุ่มและสเปร์ย์ อีกวัตถุประสงค์คือ พัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสำหรับการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานในระหว่างการลดอุณหภูมิเบื้องต้น สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนในสามส่วนข้าวโพดหวานคือ เปลือก เมล็ด และแกน ได้ถูกประเมิน การทดลองการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเพื่อตรวจสอบแบบจำลองได้ดำเนินการทั้งแบบจุ่มและสเปร์ย์ ผลจากการทำนายและจากการทดลองของอุณหภูมิแกนของข้าวโพดหวานได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยให้ค่า RMSD น้อยกว่า 2.91 องศาเซลเซียส แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิถูกใช้สำหรับการคำนวณค่าแนะนำ $7/8$ cooling time ของข้าวโพดหวานที่ทำการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น

Thesis	Design and Testing of Hydrocooling System for Sweet Corn and Predicting Model of Sweet Corn Temperature during Precooling
Student	Miss Phatcharee Klaimanee
Student ID.	51061206
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Panmanas Sirisomboon
Thesis Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Pimpen Pornchaloempong

ABSTRACT

The objectives of this thesis are to design, fabricate and test of sweet corn hydrocooling system. The developed hydrocooling system has two water supply methods: immersion and spray. Another objective is to develop the heat transfer model for predicting temperature of a corn during precooling. A sweet corn was considered having three main parts: peel, seed and core. Physical and thermal properties of the three parts of a sweet corn were evaluated. The experiments validations were conducted using both immersion and spray hydrocooling. The predicted and the experimented core temperature of a sweet corn agreed well giving the RMSD less than 2.91 °C. The predicting model was applied for calculating the recommended 7/8 cooling time of sweet corn undergo various hydrocooling conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วัชระ เพิ่มชาติ ที่ให้คำปรึกษาและยืม อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

ขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พัชรี คล้ายมณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพด หวาน.....	5
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 ข้าวโพดหวาน.....	5
2.1.2 การลดอุณหภูมิเบื้องต้น (Pre-cooling).....	12
2.1.3 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ (hydro-cooling)	19
2.1.4 อัตราในการลดอุณหภูมิและเวลาในการลดอุณหภูมิเบื้องต้น	24
2.2 การออกแบบ และสร้าง เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน.....	29
2.2.1 วัสดุที่นำมาสร้างเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ	29
2.2.2 แนวความคิดในการออกแบบระบบสเปรย์น้ำ.....	34

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ระบบโดยรวมของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	36
2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน.....	38
2.3.1 อุณหภูมิของข้าวโพดหวานหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	40
2.3.2 การตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	41
2.3.3 half cooling time และ 7/8 cooling time.....	46
2.4 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม.....	46
2.4.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน.....	46
2.4.2 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน.....	46
2.5 ผลการทดลอง.....	49
2.5.1 อุณหภูมิของข้าวโพดหวานหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	49
2.5.2 การตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	50
2.5.3 half cooling time และ 7/8 cooling time.....	54
2.6 สรุปผลการทดลอง.....	54
บทที่ 3 สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน.....	57
3.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	57
3.2.1 สมบัติเชิงกายภาพ.....	57
3.2.2 สมบัติเชิงความร้อน.....	57
3.1.2.1 ค่าการนำความร้อน.....	57
3.1.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ.....	65
3.2 การหาสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน	71
3.2.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน.....	71
3.2.2 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวาน.....	76
3.2.3 ค่าความร้อนจำเพาะของข้าวโพดหวาน.....	79

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 ผลการทดลอง	81
3.3.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน.....	81
3.3.2 สมบัติเชิงความร้อน.....	82
3.3.2.1 ค่าการนำความร้อน.....	82
3.3.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ.....	82
3.4 สรุปผลการทดลอง	86
3.3.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน.....	86
3.3.2 สมบัติเชิงความร้อน.....	87
3.3.2.1 ค่าการนำความร้อน.....	87
3.3.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ.....	88
บทที่ 4 แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานในระหว่างการลดอุณหภูมิ.....	89
4.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	89
4.1.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	89
4.1.2 การกำหนดขอบเขต (Boundary Conditions)	92
4.1.3 ทฤษฎีของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	94
4.1.4 Biot number (Bi)	96
4.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิ	98
4.2 การสร้าง และทดสอบแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน.....	101
4.2.1 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	101
4.2.2 แบบจำลองและการจำลอง.....	103
4.2.3 สมการควบคุม	105
4.2.4 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง.....	105
4.3 ผลการทดลอง.....	106
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	107

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5 ข้อเสนอแนะจากแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน.....	111
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	115
บรรณานุกรม.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวโพดหวานพันธุ์ผสมเปิดและพันธุ์ลูกผสมที่เกษตรกรนิยมปลูกในปัจจุบัน.....	8
2.2 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวโพดหวานพันธุ์ลูกผสมที่เกษตรกรนิยมปลูกในปัจจุบัน.....	9
2.3 อัตราการหายใจของข้าวโพดหวานในอุณหภูมิต่าง ๆ.....	14
2.4 ผลผลิตเกษตรกรและการลดอุณหภูมิเบื้องต้น ก.....	20
2.5 ผลผลิตเกษตรกรและการลดอุณหภูมิเบื้องต้น ข.....	21
2.6 half-cooling time ของผลิตผลบางชนิด	26
2.7 ผลการตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน.....	54
2.8 half cooling time และ 7/8 cooling time ของข้าวโพดหวานเมื่อลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	56
3.1 สมการค่าความร้อนจำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ	68
3.2 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน.....	83
3.3 ค่าการนำความร้อนของแกน เมล็ด เปลือกของข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิต่างๆ.....	84
3.4 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวานที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	85
3.5 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวานที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	85
3.6 ความร้อนจำเพาะของแกน เมล็ด เปลือกของข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิต่างๆ.....	86
4.1 สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของวัสดุในแบบจำลอง.....	105

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การสูญเสียน้ำตาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส.....	2
2.1 ข้าวโพดหวานพันธุ์ผสมเปิด : พันธุ์ฮาวายเอียนซูการ์ซูเปอร์สวีท.....	6
2.2 ข้าวโพดหวานลูกผสม : เอทีเอส-2 หรือ ซูการ์ 74.....	6
2.3 ข้าวโพดหวานลูกผสม : ซูการ์ 73 (ด้านซ้าย) และข้าวโพดหวานลูกผสม : ไฮบริกซ์ 10.....	6
2.4 ข้าวโพดหวานลูกผสม : อินทรี 2.....	7
2.5 มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปของไทย.....	11
2.6 มูลค่าการส่งออกข้าวโพดหวานสดแช่เย็น แช่แข็ง ของประเทศไทย.....	11
2.7 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยอากาศเย็น.....	17
2.8 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยการเป่าอากาศเย็น.....	17
2.9 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น.....	18
2.10 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแข็ง.....	18
2.11 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแบบกะ.....	23
2.12 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแบบจุ่ม.....	23
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการลดอุณหภูมิและอุณหภูมิของผลผลิตและตัวกลาง.....	27
2.14 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	30
2.15 แบบ 2 มิติ ด้านบนของฝาเปิดของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	31
2.16 แบบ 2 มิติ ด้านล่างของฝาเปิดของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	32
2.17 แบบ 2 มิติ ด้านในของเครื่องเมื่อมองจากด้านบน.....	33
2.18 การเจาะรูของท่อน้ำ.....	35
2.19 แผงท่อสเปร์ย์น้ำด้านบนของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	35
2.20 แผงท่อสเปร์ย์น้ำด้านล่างของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	36
2.21 ทิศทางการสเปร์ย์น้ำของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 การทดลองเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขณะสเปรย์น้ำ.....	37
2.23 ถังเก็บน้ำเย็นของการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ (ประมาณ 2 องศาเซลเซียส)	37
2.24 ระบบโดยรวมของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ.....	38
2.25 ภายในของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขณะลดอุณหภูมิข้าวโพดหวาน.....	39
2.26 การวัดอุณหภูมิแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ลเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ.....	39
2.27 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ.....	40
2.28 การวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่ 1 คือ แกน, 2 คือ เมล็ด และ 3 คือ เปลือก.....	41
2.29 การตัดเปลือกข้าวโพดหวานขนาด 30 × 30 มิลลิเมตร 3 ตำแหน่ง.....	43
2.30 การแยกสารในเมล็ดข้าวโพดหวานที่ต่างกันด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง.....	45
2.31 กราฟการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน.....	49
2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของแกนที่การไหลแบบจุ่ม.....	51
2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของแกนที่การไหลแบบสเปรย์.....	51
2.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเมล็ดที่การไหลแบบจุ่ม.....	52
2.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเมล็ดที่การไหลแบบสเปรย์.....	52
2.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเปลือกที่การไหลแบบจุ่ม.....	53
2.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทิจ) ในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเปลือกที่การไหลแบบสเปรย์.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature (θ) กับเวลาของข้าวโพดหวานที่การไหลแบบจุ่ม.....	55
2.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature (θ) กับ เวลาของข้าวโพดหวานที่การไหลแบบสเปรย์.....	55
3.1 ค่าการนำความร้อนของนม น้ำผลไม้ และไส้กรอกที่อุณหภูมิต่างๆ.....	61
3.2 ส่วนประกอบหลักของ DSC.....	70
3.3 ลักษณะแบบแผนของการประเมินค่า C_p โปรแกรมอุณหภูมิ (isothermal, dynamic), การวัด sapphire ตัวอย่าง และbaseline (isothermal drift)	70
3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดของฝัก.....	72
3.5 เส้นผ่านศูนย์กลางแกน B และแกน C.....	72
3.6 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ตำแหน่ง.....	73
3.7 การแบ่งข้าวโพดหวานออกเป็นชั้นๆ.....	74
3.8 Thermal conductivity Probe.....	76
3.9 กระบอกทองแดงสำหรับบรรจุตัวอย่าง.....	77
3.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ : ที่มา (Agilent Technologies. 2000-2010)	77
3.11 เตรียมตัวอย่างแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน.....	78
3.12 การวัดค่าการนำความร้อนของตัวอย่างในอ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	78
3.13 Differential Scanning Calorimeter (DSC)	79
3.14 อุปกรณ์ที่ใช้คือ crucible, ที่รอง crucible, ที่คีบ และ sapphire.....	80
3.15 เครื่องปิดผนึก crucible แบบกด.....	80
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$) ของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน.....	84
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับค่าความร้อนจำเพาะ ($\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) ของแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 ภาพจำลองข้าวโพดหวานบอกลขนาดเป็นมิลลิเมตร.....	87
3.19 ภาพจำลองข้าวโพดหวาน โดยแบ่งชั้นระหว่างเปลือก เมล็ด และแกน บอกลขนาดเป็นเมตร.....	88
4.1 ความเป็นไปได้ทั้ง 8 ประเภทของการพา.....	95
4.2 รูปร่างเรขาคณิตของพายไก่อ.....	99
4.3 อุณหภูมิถึงกลางตัวอย่างเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร, แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบอย่างง่ายและข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	99
4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองที่ความเร็วลม 1.25 เมตรต่อวินาที.....	100
4.5 แบบจำลองการทำความร้อนของมะเขือเทศที่อากาศร้อนขาเข้าที่ 39 องศาเซลเซียส สำหรับด้านบนและช่อง 23 องศาเซลเซียส สำหรับด้านล่าง อุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องและมะเขือเทศเป็น 21 องศาเซลเซียส ที่ (a) เวลา = 0 ชั่วโมง, (b) เวลา = 5 ชั่วโมง, (c) เวลา = 23 ชั่วโมง, และ (d) เวลา = 48 ชั่วโมง.....	101
4.6 อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน.....	101
4.7 การเจาะรูตามตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3.....	102
4.8 Mesh ที่สร้างในแบบจำลอง (ก) อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน (ข) ข้าวโพดหวาน.....	104
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิของอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบจุ่ม ครั้งที่ 1.....	107
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิของอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบจุ่ม ครั้งที่ 2.....	108
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิของอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบสเปรย์ ครั้งที่ 1.....	108
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิของอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบสเปรย์ ครั้งที่ 2.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของอลูมิเนียมซัลไฟด์โพดหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบจุ่ม.....109	
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของอลูมิเนียมซัลไฟด์โพดหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบสเปรย์.....110	
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของซัลไฟด์โพดหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบจุ่ม.....110	
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของซัลไฟด์โพดหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบสเปรย์.....111	
4.17 จุดเย็นช้าที่สุด และจุดเย็นเร็วที่สุด ของซัลไฟด์โพดหวนเมื่อลดอุณหภูมิไปแล้ว 3 ชั่วโมง.....112	
4.18 กราฟค่าแนะนำระยะเวลาในการลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันที่การไหลแบบจุ่ม.....113	
4.19 กราฟค่าแนะนำระยะเวลาในการลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันที่การไหลแบบจุ่ม.....114	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

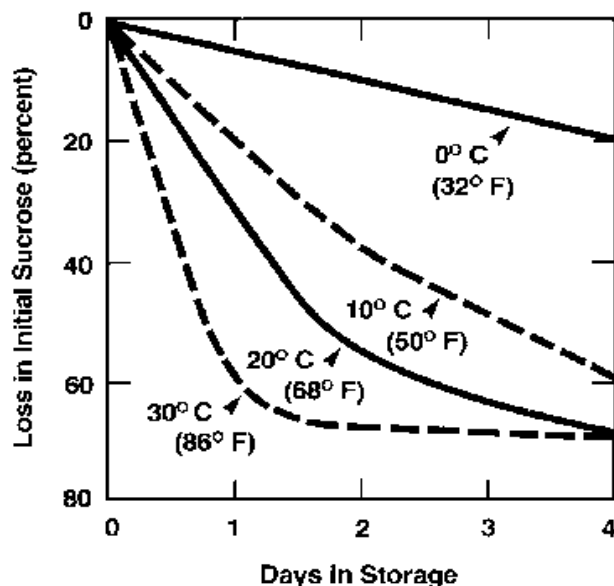
ผลผลิตทางการเกษตรที่ยังติดอยู่กับต้นหรือคงสภาพติดอยู่กับดินสามารถปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิที่แปรผันไปได้บ้าง แต่เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วนั้น ไม่สามารถปรับตัวได้อย่างเดิม และสะสมความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งความร้อนนี้ก็คือ ความร้อนจากแปลงปลูก (field heat) และความร้อนจากกระบวนการหายใจของ ผลผลิตเอง (vital heat) ดังนั้นจึงควรกำจัดความร้อนเหล่านี้ ออกอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่า การลดอุณหภูมิเบื้องต้น (pre-cooling) หลังจากนั้นควรเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อลดอัตราการหายใจหรือชะลอการเสื่อมสภาพของผลผลิต เพื่อให้ผลผลิตมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น (คณัย และนิธิยา. 2535)

ข้าวโพดหวาน (*Zea mays* L. spp. saccharata) เป็นพืชที่มีอัตราการหายใจสูง คือ 30-51 และ 282-435 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ ที่ 0 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Karder et.al. 2002) ซึ่งรสชาติและคุณภาพที่ขึ้นอยู่กับน้ำตาลจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (Gross et.al. 2004) และการเก็บรักษาข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การสูญเสียปริมาณซูโครสเริ่มต้นจะลดลงอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นควรที่จะลดอุณหภูมิให้ต่ำที่สุดและยังอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้ผลผลิตเสียหายเพื่อรักษาคุณภาพของข้าวโพดหวานไว้ให้สดใหม่อยู่เสมอเหมือนก่อนการเก็บเกี่ยว (Boyette et.al. 1990)

หลักการลด อุณหภูมิมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการหายใจของผลิตผล ช่วยชะลอการเสื่อมสภาพ ป้องกันการเหี่ยวและสูญเสีย น้ำ การเปลี่ยนแปลงสีผิว (คณัย และนิธิยา . 2535) การลดอุณหภูมิสามารถชะลอการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียได้ (ปิยะวัติและคณะ . 2531) ดังนั้นภายหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดหวานจึงควรรีบลดอุณหภูมิโดยเร็วที่สุดทั้งการลดอุณหภูมิโดยใช้ห้องเย็น การใช้น้ำเย็นจัด หรือการใช้น้ำแข็ง หลังจากนั้นควรเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ ตลอดระยะเวลาการขนส่งและการเก็บรักษาจะสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพไว้ได้นาน 5-8 วัน (ธีรนุต. 2543)

สำหรับการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ (hydro-cooling) เป็นวิธีการลดอุณหภูมิโดยอาศัยน้ำเย็นเป็นตัวกลางในการลดความร้อนจากผลผลิต ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิให้ต่ำลงได้อย่างรวดเร็ว สะดวก และมีประสิทธิภาพเพราะน้ำมีความร้อนจำเพาะสูงกว่าอากาศ ซึ่งการลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้อาจทำได้โดยให้ ผลผลิตเคลื่อนที่ผ่านได้หัวฉีดน้ำเย็นหรือจุ่มลงในน้ำเย็นแล้วยกขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผลผลิต ลดลงตามที่ต้องการ พบว่า ามีผักและผลไม้หลายชนิดที่นิยมลดอุณหภูมิด้วยน้ำ เช่น

หน่อไม้ฝรั่ง แครอท ท่อ ข้าวโพดหวาน และ แตงเทศ เป็นต้น (สายชล. 2528) ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นของข้าวโพดหวานหลังการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำที่กลุ่มเกษตรกรหรือบริษัทส่งออกข้าวโพดหวานสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งจะรักษาคุณภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งความหวานไว้ได้



รูปที่ 1.1 การสูญเสียน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส : ที่มา USDA handbook No. 66. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Nursery Stocks

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบ สร้างและทดสอบ เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน หลังการเก็บเกี่ยว
2. ศึกษาผลกระทบของข้าวโพดหวานเมื่อผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ที่เก็บรักษาไว้ 7 วัน อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส
3. สร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ
4. ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทำนาย อุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขนาดเล็กที่ กลุ่มเกษตรกรรายย่อยสามารถนำไปใช้ได้
2. ทราบผลของการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ต่อข้าวโพดหวานหลังเก็บรักษาไว้ 7 วัน อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส
3. ได้แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้ได้จริง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ข้าวโพดหวานพันธุ์ ไฮบริดส์ 3 ซึ่งนำมาจากไร่ในตอนเช้าจาก อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี
2. ออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ โดยการวัดคุณภาพของข้าวโพดหวานด้านต่างๆ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น ของมวล เปอร์เซ็นต์ความชื้น และปริมาณของแข็งที่ละลายได้
3. สมบัติเชิงกายภาพ และเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะ เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิด้วยน้ำ
4. สร้างและทดสอบแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิด้วยน้ำโดยใช้โปรแกรม Comsol Multiphysics 3.5

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย มีรายละเอียดดังในบทที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และมีเนื้อหาหลัก 3 เรื่อง คือ ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้น ของข้าวโพดหวาน ด้วยน้ำเย็น ในบทที่ 2 เป็นรายละเอียดของการทดสอบสมรรถนะของเครื่องลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน ในบทที่ 3 ซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวานและการหาค่าสมบัติเหล่านี้ จากนั้นนำข้อมูลของสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวานนี้ มาใช้เป็นตัวแปรเริ่มต้นในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้โปรแกรม

Comsol Multiphysics 3.5 ซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 4 โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการถ่ายเทความร้อนที่โปรแกรมใช้ และ อธิบายการกำหนดสถานะให้ข้าวโพด หวาน รวมไปถึงการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นที่เวลาผ่านไป บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

การออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของ เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวาน เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศ ในแต่ละวันมีการบริโภคและใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้าวโพดหวานเป็นจำนวนมาก ข้าวโพดหวานเป็นพืชอายุสั้นให้ผลตอบแทนค่อนข้างสูง สามารถจำหน่ายได้ทั้งตลาดบริโภคสดและส่งโรงงานอุตสาหกรรม บรรจุกะป๋อง ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดหวานจำนวนมากโดยปลูกแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และทางตะวันตกของประเทศไทย อายุเก็บเกี่ยวสั้น เก็บฝักสดเมื่ออายุ 65-80 วัน (ขึ้นอยู่กับพันธุ์) ปลูกได้ดีในช่วงฤดูฝนและสามารถปลูกได้ตลอดปี ถ้ามีแหล่งน้ำและดินอุดมสมบูรณ์ ส่วนของฝักที่นำไปแปรรูปก็จะมีเศษเหลือพวกเปลือก ฝัก ไหม และซัง เป็นจำนวนมาก เศษวัสดุเหลือใช้ของข้าวโพดหวานเหล่านี้ สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ (เทคโนโลยีชาวบ้าน. 2551)

2.1.1.1 ลักษณะของข้าวโพดหวาน (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)

ข้าวโพดหวาน (Sweet corn : *Zea mays* L. var. *saccharata*) อยู่ใน Order Graminales, Family: Poaceae (Graminae-Grass family) เป็นพืชที่ให้พลังงานสูง และมีปริมาณโปรตีนรองจากถั่วลิสง ถั่วแขก และกระเทียม นอกจากนี้จะประกอบด้วยปริมาณธาตุอาหารสูง เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และ ไทอามีน นอกจากนี้สายพันธุ์สีเหลืองจะมีวิตามิน เอ สูง เป็นพืชที่ต้องการสภาพอากาศอบอุ่น อุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการเจริญและผลผลิต อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 16-24 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างเดือนไม่ควรสูงเกิน 35 องศาเซลเซียส

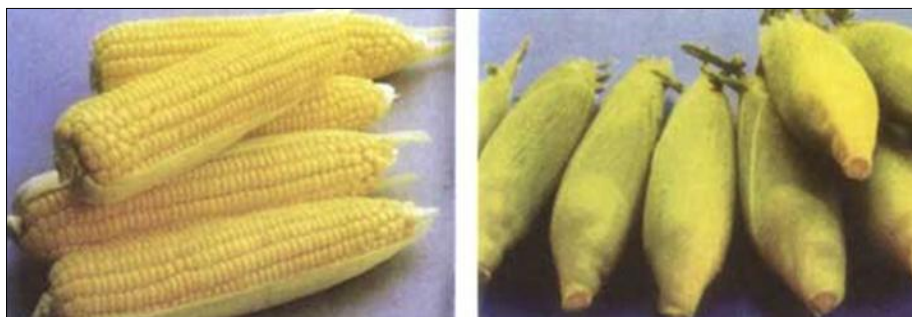
2.1.1.2 พันธุ์ข้าวโพดหวาน (FCRI online. 2553)

- 1) พันธุ์ผสมเปิด ได้แก่ พันธุ์ฮาวายเอ็นซูการ์ชูเปอร์สวีท เป็นพันธุ์ให้ผลผลิตต่ำกว่าพันธุ์ลูกผสม แต่ความสูงต้น ความสูงฝัก และอายุเก็บเกี่ยวใกล้เคียงกับพันธุ์ลูกผสม
- 2) พันธุ์ลูกผสม ปัจจุบันมีข้าวโพดหวานพันธุ์ลูกผสมมากมายให้เกษตรกรเลือกใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นพันธุ์ของบริษัทเอกชนต่าง ๆ และมีบางพันธุ์เป็นของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับ

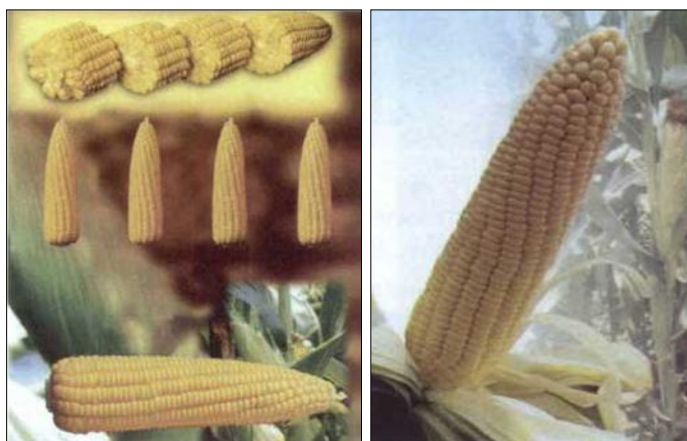
ลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวโพดหวานพันธุ์ผสมเปิดและพันธุ์ลูกผสมที่เกษตรกรนิยมปลูกได้รวบรวมไว้ใน ตารางที่ 2.1 และ 2.2 โดยมีรูปข้าวโพดหวานพันธุ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถึง 2.4



รูปที่ 2.1 ข้าวโพดหวานพันธุ์ผสมเปิด : พันธุ์ฮาวยเอียนซูการ์ซูเปอร์สวีท กรมวิชาการเกษตร รับรอง พันธุ์ ปี 2515 ที่มา : (FCRI online. 2553)



รูปที่ 2.2 ข้าวโพดหวานลูกผสม : เอทีเอส 2 หรือ ซูการ์ 74 ที่มา : (FCRI online. 2553)



รูปที่ 2.3 ข้าวโพดหวานลูกผสม : ซูการ์ 73 (ด้านซ้าย) และข้าวโพดหวานลูกผสม : ไฮบริกซ์ 10 (ด้านซ้าย) ที่มา : (FCRI online. 2553)



รูปที่ 2.4 ข้าวโพดหวานลูกผสม : อินทรี 2 ที่มา : (FCRI online. 2553)

2.1.1.3 การเก็บเกี่ยว

โดยปกติข้าวโพดหวานจะเก็บเกี่ยวเมื่อมีอายุประมาณ 70-75 วันหลังปลูก แต่ระยะที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวที่สุด คือ ระยะ 18-20 วัน หลังข้าวโพดออกไหม 50% ข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริดส์ 10 จะเก็บเกี่ยวที่อายุประมาณ 68-70 วัน และพันธุ์ไฮบริดส์ 3 จะเก็บเกี่ยวที่อายุประมาณ 65-68 วันหลังปลูก แต่ถ้าปลูกในช่วงอากาศหนาวเย็นอายุการเก็บเกี่ยวอาจจะยืดออกไป หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วควรรีบส่ง โรงงานหรือจำหน่ายโดยเร็ว เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ หากขาดน้ำ จะมีผลต่อเมล็ดและน้ำหนักของฝัก (ไพศาล. 2553)

วิธีการดูว่าข้าวโพดหวานเก็บเกี่ยวได้หรือยัง ให้สังเกตจากสีของไหมจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม เมื่อนักเปลือกข้าวโพดฝักบนสุด เมล็ดจะมีสีเหลืองอ่อน ถ้าใช้เล็บกดที่เมล็ดปลายฝักจะมีน้ำมันไหลออกมาแสดงว่าอีก 2 วันจะต้องเก็บเกี่ยว โดยใช้มือหักฝักสดให้ถึงบริเวณก้านฝักที่ติดลำต้น การเก็บข้าวโพดหวานก่อนหรือหลังช่วงที่เหมาะสมเพียง 1-2 วัน จะทำให้คุณภาพของฝักไม่ได้มาตรฐานตามที่ตลาดต้องการ (คาราวรรณ. 2553)

2.1.1.4 การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว

หลังเก็บเกี่ยวให้ รีบนำฝักข้าวโพดหวานเข้าในที่ร่ม ไม่ให้ถูกแสงแดดโดยตรง และไม่ควรกองสุ่มฝักข้าวโพดหวานสูงเกินไป ควรมีการถ่ายเทอากาศภายในกอง สำหรับการขนส่งในระยะทางไกลที่ใช้เวลาขนส่งนานกว่า 3 ชั่วโมง ควรมีปล่องท่อเอสลอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ประมาณ 15 เซนติเมตร ยาว 3-4 เมตร เจาะรูโดยรอบตลอดท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร หรือใช้หวายสานหรือไม้ไผ่ ผ่าซีกประกอบเป็นท่อโปร่งทำเป็นปล่องเสียบไว้ตรงกลางกองข้าวโพดหวานจำนวน 2-3 อัน เพื่อช่วยระบายความร้อนและถ่ายเทอากาศ (คาราวรรณ. 2553)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวโพดหวานพันธุ์ผสมเปิดและพันธุ์ลูกผสมที่เกษตรกรนิยมปลูกในปัจจุบัน ที่มา: (FCRI online. 2551)

ลักษณะประจำพันธุ์	พันธุ์ฮาวายเอียนซูการ์- ซูเปอร์สวีท	พันธุ์ลูกผสม				
		สองสี 58	สองสี 39	ทวิวรรณ 2	หวานคัสนิ	อินทรี 2
ชนิดยีนควบคุมความหวาน	ซริงเก้น 2	ซริงเก้น 2	ซริงเก้น 2	ซริงเก้น 2	ซริงเก้น 2	ซริงเก้น 2
ผลผลิตทั้งเปลือก (กก./ไร่)	1,700	2,000	2,000	2,000	1,800	1,870
ผลผลิตปอกเปลือก (กก./ไร่)	1,060	1,400	1,400	1,400	1,300	1,208
อัตราแลกเนื้อ (%)	30	-	-	32	34	35
วันออกไหม (วัน)	46	47	62	45	46	48
ความสูงต้น (ซม.)	190	135-165	170-190	215	210	168
ความสูงฝัก (ซม.)	105	40-60	60-70	105	110	87
อายุเก็บเกี่ยวหลังออกไหม (วัน)	18	18-20	18-20	18	18	18
อายุเก็บเกี่ยวหลังปลูก(วัน)	65-70	65-70	72-77	62	64	66
สีไหม	เหลือง	ขาว	ขาว	ขาว	ขาว	ขาว
คุณภาพการชิม	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	หวาน นุ่ม	หวาน นุ่ม	ดีมาก
ความหวาน (องศาบริกซ์)	ดีมาก	17	17	15-16	15-16	15
ความหนาเปลือกหุ้มเมล็ด	บาง	ปานกลาง	ปานกลาง	-	-	บาง
สีเมล็ด	เหลือง	ขาว - เหลือง	ขาว - เหลือง	เหลืองอ่อน	เหลืองทอง	เหลือง
จำนวนแถวเมล็ดต่อฝัก	16-18	16-18	16-18	16-18	12-16	14-16
ความยาวฝัก (ซม.)	16.5	18-20	18-21	16-17	16-18	17
ความกว้างฝัก (ซม.)	5.0	4.9-5.4	4.8-5.3	4.5	3.5	4.4
ความแข็งแรงของรากและลำต้น	ดีมาก	ปานกลาง - ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดี

ตารางที่ 2.2 ลักษณะประจำพันธุ์ข้าวโพดหวานพันธุ์ลูกผสมที่เกษตรกรนิยมปลูกในปัจจุบัน ที่มา: (FCRI online. 2551)

ลักษณะประจำพันธุ์	ไฮบริด 10	ไฮบริด 3	เอทีเอส 2	เอทีเอส 5	ซูการ์ 73	ซูการ์ 74	ซูการ์ 75
ชนิดยีนควบคุมความหวาน	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2	ซริงเค้น 2
ผลผลิตทั้งเปลือก (กก./ไร่)	3,065	3,719	1,800-2,700	3,000-3,600	1,800-2,700	1,800-2,700	2,500-3,500
ผลผลิตปอกเปลือก (กก./ไร่)	2,027	2,553	1,200-2,100	2,400-2,900	1,200-2,100	1,200-2,100	1,900-2,900
อัตราแลกเนื้อ (%)	30	35	28-31	30-32	30	28-31	30-32
วันออกใหม่ (วัน)	51	48-50	49	48	48	49	48
ความสูงต้น (ซม.)	200	195	135-165	180-200	160-200	135-165	170-200
ความสูงฝัก (ซม.)	110	100	55-65	70-90	70-90	55-65	70-90
อายุเก็บเกี่ยวหลังออกใหม่ (วัน)	18	18	18-20	20	18-20	18-20	18-20
อายุเก็บเกี่ยวหลังปลูก (วัน)	70-75	65-70	70-75	68	72-75	70-75	72-77
สีใหม่	ขาว	ขาว	ขาว-น้ำตาล	เขียวอ่อน	ขาว	ขาว-น้ำตาล	ขาว
คุณภาพการชิม	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ความหวาน (องศาบริกซ์)	ดีมาก	ดีมาก	16-17	ดีมาก	16	16-17	16
ความหนาเปลือกหุ้มเมล็ด	บาง	บาง	บาง	บาง	ปานกลาง	บาง	ปานกลาง
สีเมล็ด	เหลือง	เหลือง	เหลืองครีม	เหลืองทอง	เหลือง	เหลืองครีม	เหลืองครีม
จำนวนแถวเมล็ดต่อฝัก	14-16	16-18	14	16-18	14-16	14	14-16
ความยาวฝัก (ซม.)	19.7	20-22	16-18	21-22	18-20	16-18	19-21
ความกว้างฝัก (ซม.)	5.2	5.5-6.0	4.2-4.5	5-6	4.5-5.0	4.2-4.7	4.7-5.2
ความแข็งแรงของรากและลำต้น	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดี	ดี	ดีมาก

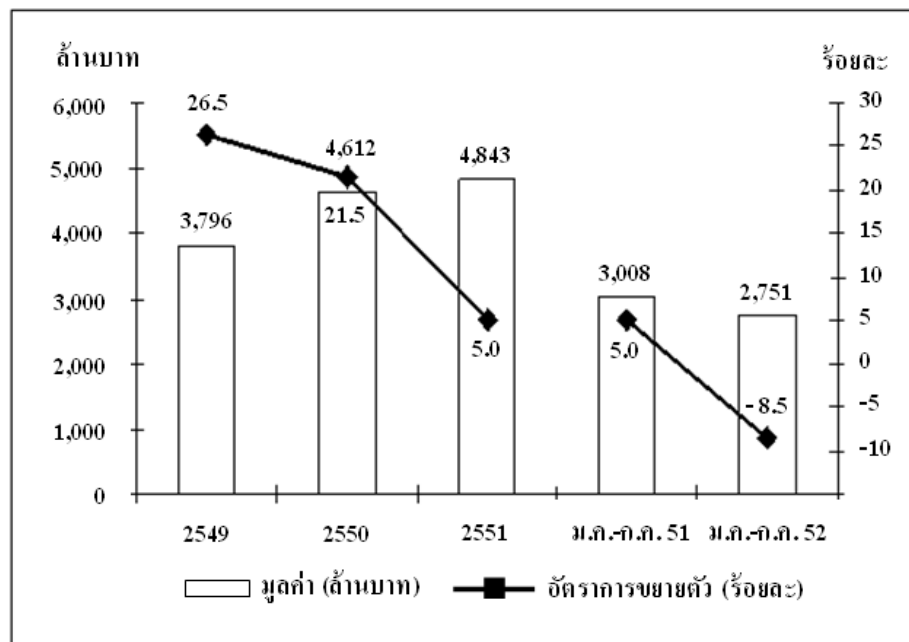
2.1.1.5 พื้นที่ปลูกข้าวโพดหวาน

พื้นที่ปลูกข้าวโพดหวานในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2545 มีพื้นที่ปลูกประมาณ 200,000 ไร่ ผลผลิต (ทั้งเปลือก) ประมาณ 400,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2548 มีประมาณ 737,500 ไร่ ผลผลิต (ทั้งเปลือก) ประมาณ 1.48 ล้านตัน (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย . 2548) และในปี พ.ศ. 2551/52 มีประมาณ 221,907 ไร่ ผลผลิตประมาณ 240,227 ตัน ทั้งพื้นที่เพาะปลูก และปริมาณผลผลิตลดลงประมาณร้อยละ 0.2 และ 2.6 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา และคาดว่าในปี พ.ศ. 2552/53 พื้นที่เพาะปลูก และปริมาณผลผลิตข้าวโพดหวานจะยังลดลงอีก เนื่องจากผู้ประกอบการในประเทศต้องลดปริมาณการผลิตลงตามปริมาณการสั่งซื้อของประเทศคู่ค้าที่ลดลง เพราะการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปหัตถ์ อันเป็นผลจากการที่ไทยถูกเรียกเก็บภาษีเอ็ดดี และตลาดสหภาพยุโรปซึ่งเป็นตลาดส่งออกหลักของไทยหันไปนำเข้าผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานจากประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรปกันเองมากขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย . 2553)

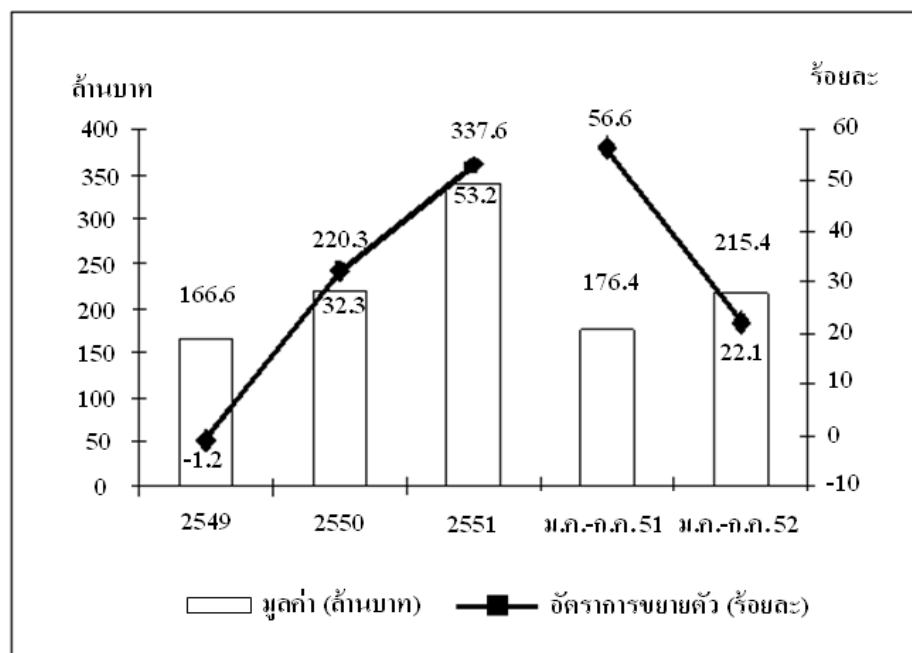
ส่วนราคาข้าวโพดหวานที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ยในช่วง 7 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2552 อยู่ที่ประมาณ 2.60 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีที่ผ่านมาที่ราคา 2.50 บาทต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจาก จำนวนพื้นที่เพาะปลูกลดลง และผลผลิตลดลง แต่ในช่วง 7 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2552 ปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานของประเทศญี่ปุ่นยังมีเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกษตรกรยังคงขายได้ในราคาที่สูงขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2553)

2.1.1.6 ความสำคัญทางเศรษฐกิจของข้าวโพดหวาน

ปริมาณการผลิตข้าวโพดหวานส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 95.0 จะส่งเข้าโรงงานเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูป และที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 5.0 จะส่งเข้าโรงงานเพื่อผลิตเป็นข้าวโพดหวานสดแช่เย็น แช่แข็ง ปริมาณข้าวโพดหวานที่ผลิตได้ในแต่ละปีนั้น จะมีการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศประมาณร้อยละ 80.0 ที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 20.0 ใช้บริโภคภายในประเทศ สำหรับข้าวโพดหวานที่ส่งออกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูป และข้าวโพดหวานสดแช่เย็น แช่แข็ง มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานทั้ง 2 ประเภทนี้แสดงในรูปแบบที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปของไทย ที่มา : (กรมศุลกากร รวบรวมโดย ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2553)



รูปที่ 2.6 มูลค่าการส่งออกข้าวโพดหวานสดแช่เย็น แช่แข็ง ของประเทศไทย ที่มา : (กรมศุลกากร รวบรวมโดยศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2553)

ประเทศไทย ส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปมากเป็นอันดับที่ 3 ของโลก รองจากประเทศฝรั่งเศส และฮังการี โดยตลาดส่งออกที่สำคัญคือ กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป เนื่องจากข้อได้เปรียบของประเทศไทยที่สำคัญ 2 ประการ คือ ฝรั่งเศส และฮังการี มีฤดูกาล การปลูกข้าวโพดหวาน ประมาณ 60 วัน ในช่วง 1 ปี เนื่องจากข้าวโพดหวานเป็นพืชที่ต้องการแสงมาก ในประเทศเมืองหนาว จึงปลูกได้เฉพาะในช่วงฤดูร้อนเท่านั้น ส่วนข้อได้เปรียบที่สำคัญอีกประการคือ ค่าใช้จ่ายทางด้านขนส่งทางเรือซึ่งต่ำกว่ามาก (ปัญญา. 2553) แต่ไทยต้องเผชิญกับปัญหาการเรียกเก็บภาษี เอดี มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ทำให้ไทยต้องเสียเปรียบคู่แข่งที่สำคัญอย่างสหรัฐฯ จีน และบางประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป ส่งผลให้คู่ค้าที่สำคัญของไทยอย่างตลาดสหภาพยุโรปหันไปนำเข้าผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปจากฮังการีเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีคู่แข่งที่สำคัญในกลุ่มสหภาพยุโรป ได้แก่ สวีเดน ฟินแลนด์ อังกฤษ และกรีซ ซึ่งสหภาพยุโรปหันไปนำเข้าผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปจากประเทศเหล่านี้ด้วยตนเองมากขึ้น ส่งผลให้ไทยส่งออกไปยังสหภาพยุโรปลดลง (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2553)

จากปัญหาดังกล่าว ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทยจึงเสนอแนวทางแก้ไข คือ ขยายตลาดส่งออกใหม่ โดยผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูป ตลาดส่งออกใหม่ที่น่าสนใจ คือ กลุ่มประเทศยุโรปอื่น ๆ กลุ่มประเทศเอเชีย และกลุ่มประเทศตะวันออกกลาง เนื่องจาก กลุ่มประเทศต่าง ๆ เหล่านี้ มีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานแปรรูปในอัตราการขยายตัวที่เพิ่มขึ้น อีกทั้ง ผู้ส่งออกของไทยไม่ควรตัดราคาจำหน่ายตนเอง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการขาดทุนต่ำกว่าราคาที่กำหนด นอกจากนี้การแปรรูปข้าวโพดหวานเพื่อเพิ่มมูลค่าก็เป็นอีกโอกาสหนึ่ง เช่น ครีมข้าวโพด น้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากไทยได้เปรียบในเรื่องของต้นทุนการผลิตข้าวโพดหวานซึ่งมีต้นทุนที่ต่ำกว่า และควรมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานให้มีคุณภาพมากขึ้น เพื่อให้ไทยยังเป็นตลาดส่งออกข้าวโพดหวานที่สำคัญของโลก

2.1.2 การลดอุณหภูมิเบื้องต้น (pre-cooling) (दनัย บุนนเกียรติ. 2553)

ผลผลิตทางการเกษตรเมื่อตัดออกจากต้นยังคงเป็นสิ่งที่มีความสดและมีกระบวนการทางชีวเคมีเกิดมากมาย และคงอยู่ในสภาพปกติจนถึงมือผู้บริโภค พลังงานที่เซลล์พืชจำเป็นต้องใช้จะได้มาจากสารอาหารที่สะสมไว้ในขณะที่ยังติดอยู่กับต้น ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอาหารให้เป็น พลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เร่งด้วยเอนไซม์ คือ กระบวนการหายใจ ผลจากกระบวนการหายใจจะมีพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งปล่อยออกมาด้วย ซึ่งปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจะแตกต่างกันไป

ตามชนิด พันธุ์ ระยะความแก่ ระยะการสุก การมีบาดแผล ผล อุณหภูมิ และความเครียดต่างๆ ความร้อนจากกระบวนการหายใจ นี้จะเป็นข้อมูลในการพิจารณาถึงการจัดการด้านอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาผลผลิตด้วย ความร้อนที่ติดมากับผลผลิตจากแปลงปลูก เมื่อขนย้ายผลผลิตมายังโรงคัดบรรจุและกองรวมกันไว้ ถ้าอากาศผ่านเข้า-ออกหรือถ่ายเทไม่สะดวก ทำให้ความร้อนจากกระบวนการหายใจ กับความร้อนจากแปลงปลูก ถูกสะสมอยู่ในกองผลผลิต

การลดอุณหภูมิเบื้องต้นควรจะทำทันทีภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งอาจจะก่อนหรือหลังการบรรจุใส่ในภาชนะบรรจุแล้วก็ได้ แต่การลดอุณหภูมิเบื้องต้นก่อนการบรรจุลงในภาชนะนั้นจะใช้เวลา น้อยกว่า เพราะความเย็นสามารถแทรกซึมเข้าไปถึงส่วนกลางของผลผลิตได้ง่าย แต่มีข้อเสีย ก็คืออาจจะมีผลผลิตที่เน่าเสียหรือด้อยคุณภาพปะปนอยู่ด้วย อาจทำให้ต้นทุนของการลดอุณหภูมิ สูงขึ้น และจะทำให้ผลผลิตได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอีกในระหว่างรอการบรรจุใส่ในภาชนะบรรจุ

2.1.2.1 ข้อเสียที่เกิดขึ้นเมื่อผลผลิตมีอุณหภูมิสูง

อัตราการหายใจสูงทำให้การใช้สารอาหารในผลผลิตมีอัตราสูงด้วย ทำให้สูญเสียสารอาหารที่สะสมไว้ ผลผลิตขาดคุณค่าทางอาหาร รสชาติเปลี่ยนแปลง น้ำหนักลดลง และเซลล์เสื่อมเร็ว ถ้าเป็นผลไม้จะไปเร่งให้เกิดการแก่ การสุกและการเสื่อมสลายเร็วขึ้นด้วย สำหรับข้าวโพดหวานจะสูญเสีย น้ำตาลในเมล็ดข้าวโพดไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิสูงเพียง 2 ชั่วโมง หรืออาจเกิดผลเสียมากกว่าที่คาดคิดไว้ด้วย อัตราการหายใจจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่อมีอุณหภูมิสูงอัตราการหายใจจะสูง การลดอุณหภูมิ เบื้องต้น และเก็บรักษาในอุณหภูมิที่เหมาะสม จะช่วยลดอัตราการหายใจได้ (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2553) อัตราการหายใจของข้าวโพดหวานในอุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.3

1) ทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ เจริญได้อย่างรวดเร็ว อุณหภูมิมีผลกระทบต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และในทำนองเดียวกันอุณหภูมิก็มีผลกระทบต่อผลผลิตด้วย อุณหภูมิต่ำจะช่วยทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ลดต่ำลง เช่น *Rhizopus* sp. ไม่สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส

2) เกิดการสูญเสียน้ำ ผลผลิตทางการเกษตร ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 80-90 น้ำทำให้ผลผลิตมีความสด เพราะตลาดต้องการผลผลิตที่สด การสูญเสียน้ำทำให้ผลผลิตเหี่ยวคุณภาพต่ำ ไม่สามารถขายได้ นอกจากนี้จะทำให้น้ำหนักผลผลิตลดลงทำให้รายได้ลดลง (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2553) ผลผลิตที่เก็บรักษาไว้ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการคายน้ำสูง และสูญเสียน้ำได้อย่างรวดเร็วมก ยกเว้นในกรณีอยู่ในสภาพบรรยากาศที่มีความชื้นอิ่มตัว ถ้าความชื้นหรือปริมาณไอน้ำในอากาศแตกต่างกับใน

เนื้อเยื่อของผลผลิตมาก จะทำให้ ผลผลิตเกิดการสูญเสียน้ำมากด้วย สาเหตุ ของการสูญเสียน้ำเกิดจาก ความแตกต่างของความดันไอระหว่างความดันไอน้ำภายใน ผลผลิต และความดันไอน้ำของ สภาพแวดล้อม ซึ่งควบคุมโดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อากาศร้อนจะอุ้มน้ำได้ มากกว่าอากาศเย็น ค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นตัวชี้บ่งว่ามีปริมาณไอน้ำอยู่ในอากาศขณะ นั้นเป็น เปอร์เซ็นต์ของจำนวนไอน้ำอิ่มตัวที่อากาศสามารถอุ้มน้ำไว้ได้ที่อุณหภูมินั้นๆ

ตารางที่ 2.3 อัตราการหายใจของข้าวโพดหวานในอุณหภูมิต่างๆ ที่มา : (Karder et.al. 2002)

อุณหภูมิ(°C)	ml CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹
0	30-51
5	43-83
10	104-120
15	151-175
20	268-311
25	282-435

3) ผลต่อก๊าซเอทิลีน ทั้งอัตราการสังเคราะห์และความไวต่อการตอบสนองของก๊าซ เอทิลีน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนจะเกิดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นการลด อุณหภูมิเบื้องต้นอย่างรวดเร็วจะช่วยให้อัตราการสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนและความไวต่อการตอบสนอง ต่อก๊าซเอทิลีนลดลงด้วย ทำให้ผลผลิตเข้าสู่กระบวนการเสื่อมสลายช้าลง ดังนั้นก๊าซเอทิลีนจึงมีทั้ง ประโยชน์และโทษต่อผลผลิตได้

4) การเกิดความเสียหายเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น การเกิดบาดแผลจากสาเหตุทางกล สามารถเกิดขึ้น ได้ที่ทุกอุณหภูมิ เพราะอุณหภูมิจะมีผลต่อความรุนแรงของผลผลิตที่จะตอบสนองต่อแผลที่เกิดขึ้น การ เกิดรอยขีดทำให้ผลผลิต ผลิตก๊าซเอทิลีนมากขึ้น ซึ่งเร่งอัตราการหายใจให้เร็วขึ้น เร่งกระบวนการสุก และทำให้ ผลผลิต เสื่อมสภาพเร็วขึ้น นอกจากนี้ การเกิดรอยขีดตามปกติยังทำลาย สิ่งกีดขวางตาม ธรรมชาติ (natural barrier) ที่ผิวของผลผลิต จึงเพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำและการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ การลดอุณหภูมิเบื้องต้นอย่างรวดเร็วจะลดผลกระทบของบาดแผลที่มีต่อกระบวนการดังกล่าวได้

2.1.2.2 วัตถุประสงค์ของการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2553)

- 1) จำกัดการทำงานของน้ำย่อยที่ทำให้เซลล์เสื่อม และลดอัตราการหายใจ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลผลิตนิ่ง และ
- 2) จำกัดการคายน้ำซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผลผลิตเหี่ยว
- 3) ลดหรือจำกัดการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้ผลผลิตเน่าเสีย
- 4) จำกัดการสร้างเอทิลีน ซึ่งเร่งความแก่ของเนื้อเยื่อผลผลิตและลดการตอบสนองต่อเอทิลีนของผลผลิต

การเลือกวิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นอย่างรวดเร็วและเหมาะสม จะช่วยขยายระยะเวลาการตลาดโดยรักษาคุณภาพผลผลิตเป็นเวลานานกว่าปกติ ทั้งระหว่างรอการขนส่งสู่ตลาดและระยะที่วางขายในตลาด

2.1.2.3 การวางแผนการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (दनัย บุญยเกียรติ, 2553)

1) เลือกใช้วิธีการลดอุณหภูมิ เบื้องต้น ที่เหมาะสมกับชนิดของ ผลผลิต ผลผลิตแต่ละชนิดต้องการอุณหภูมิที่ใช้กำจัดความร้อนแตกต่างกัน ผลผลิตส่วนใหญ่ใช้วิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยการเป่าอากาศผ่าน หากเป็นรากและลำต้นควรใช้วิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ส่วนผักใบใช้วิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยสูญญากาศ ตัวอย่างเช่น สตรอเบอรี่ และบล๊อคโคลี่ ต้องการอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็ง ขณะที่ผักชีฝรั่งและมะเขือเทศ จะเป็นอันตรายในอุณหภูมิดังกล่าว ในผลผลิตบางชนิดที่ต้องการความชื้นต่ำเนื่องจากเน่าเสียง่าย ไม่สามารถใช้วิธีการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ หรือน้ำแข็งได้ สำหรับผลผลิตบางชนิดอาจเลือกใช้ได้หลายวิธี จึงควรพิจารณาเลือกใช้วิธีที่ประหยัดที่สุด

2) ขนาดและความหนาแน่นของ ผลผลิต จะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจากภายในผลผลิต ออกสู่ภายนอก ผลผลิต ที่มีขนาดเล็กจะลดอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่าขนาดใหญ่ เพราะ ผลผลิตขนาดใหญ่มีการสะสมความร้อนมากกว่าขนาดเล็ก

3) ปริมาณของผลผลิตที่จะลดอุณหภูมิเบื้องต้นต่อหน่วยเวลา จะมีผลต่อขนาดของเครื่องที่ใช้ลดอุณหภูมิเบื้องต้นและค่าใช้จ่าย ระบบความเย็นและขนาดของเครื่องที่ใช้ลดอุณหภูมิเบื้องต้นนั้น ควรได้รับการประเมินจากปริมาณของผลผลิตที่มีมากที่สุดในแต่ละวัน ในกรณีที่มีปริมาณมากจะสามารถกำจัดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

4) ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) และค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของทั้งผลผลิตและตัวกลาง หมายถึงความสามารถในการพาความร้อนระหว่างผลผลิตกับตัวกลาง และการนำความร้อนในผลผลิต

5) อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของผลผลิตที่ต้องการ จะมีผลต่อ ระยะเวลาในการทำ ความเย็น กำหนดได้จากอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ลดความร้อน

6) ปริมาตรและความเร็วของตัวกลางที่ไหลผ่านผลผลิต เป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น

7) ภาชนะบรรจุ รูปแบบของภาชนะบรรจุ มีอิทธิพลต่ออัตราการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นของผลผลิต ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสม

8) ด้านเศรษฐกิจ มูลค่าและค่าบำรุงรักษาของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นแต่ละชนิด ควรศึกษาต้นทุนการผลิตและมูลค่าการตลาด ตลอดจนผลตอบแทน เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจลงทุน และต้องคำนึงถึงการขยายตัวของกิจการในอนาคต

2.1.2.4 ระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)

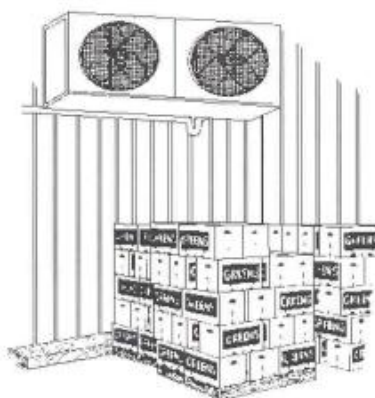
1) การลดอุณหภูมิเบื้องต้น ด้วยอากาศเย็น (room cooling) ระบบห้องเย็น สามารถใช้กับผลผลิตส่วนใหญ่ แต่ไม่เหมาะสำหรับ ผลผลิตที่ต้องการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว นิยมใช้เก็บรักษาผลผลิตหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้น อัตราการลดของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับขนาดของ เครื่องปรับอากาศ และขนาดของพัดลมที่ใช้หมุนเวียนอากาศที่ผ่านผลผลิต ดังรูปที่ 2.7

2) การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยการเป่าอากาศเย็น (force-air cooling) ระบบนี้จะใช้ เครื่องปรับอากาศที่ทำให้อุณหภูมิต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์สูง และติดตั้งพัดลม เพื่อการหมุนเวียนและถ่ายเทอากาศผ่านผลผลิต ระยะเวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศและความเร็วของลมที่ผ่านผลผลิตในภาชนะบรรจุ ระบบนี้จะลดอุณหภูมิได้เร็วกว่าระบบห้องเย็น 75-90 % ควรติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (thermostat) เพื่อให้พัดลมหยุดทำงาน เมื่ออุณหภูมิในผลผลิตลดลงตามที่กำหนด เพื่อประหยัดพลังงานและป้องกันการสูญเสียน้ำของผลผลิต สามารถประยุกต์ใช้ในห้องเก็บรักษา รถห้องเย็น หรือในอุโมงค์โดยมีสายพานลำเลียงผลผลิตผ่าน ดังรูปที่ 2.8

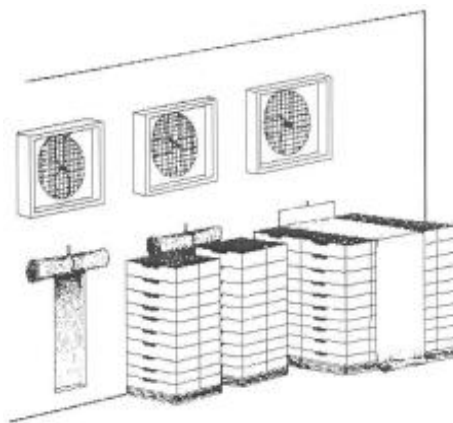
3) การลดอุณหภูมิเบื้องต้น ด้วยน้ำเย็น (hydro-cooling) ผลผลิตบางชนิดต้องการความชื้นสูง และทนทานต่อการเน่าเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ โดยใช้ น้ำเย็นจัดไหลผ่าน ผลผลิตอย่างรวดเร็ว หรือให้ผลผลิต ผ่านตามสายพานและผ่านน้ำเย็นที่พ่นออกมา ซึ่งเป็นวิธีที่ลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และมี

ประสิทธิภาพสูง แต่อุณหภูมิของน้ำจะต้องต่ำพอเพียงที่จะถ่ายเทความร้อนจากผลผลิต และค่อนข้างใช้เวลานาน การใช้ระบบน้ำหมุนเวียน จะช่วยทำความสะอาด ผลผลิต และกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคเน่าในที่เกี่ยวข้อง ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานประมาณ 20-40 % ผลผลิตที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นด้วยน้ำเย็น คือ หน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดหวาน ผักชีฝรั่ง ขึ้นฉ่าย แครอท แรดิช ปวยเล้ง เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9

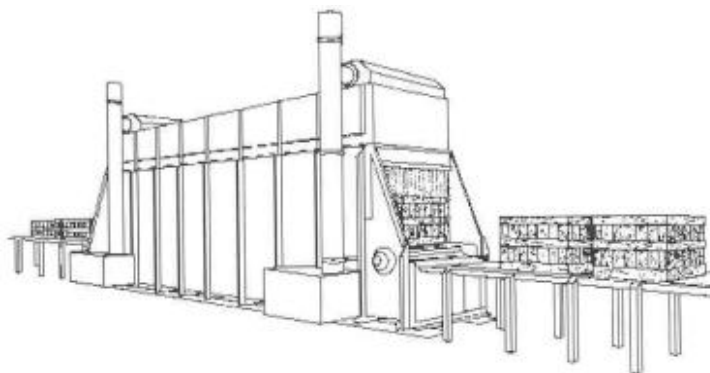
4) การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแข็ง (ice cooling) การใช้น้ำแข็งเกล็ดใส่ด้านบนของผลผลิตในภาชนะบรรจุ เป็นวิธีการหนึ่งที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิผลผลิตที่มีขนาดของใบสูงกว่าปริมาณ ช่วยลดอุณหภูมิในผลผลิตและป้องกันความร้อนที่เกิดจากการหายใจ น้ำแข็งใช้กำจัดความร้อนแฝงในผลผลิตที่บรรจุแน่นในภาชนะ ที่ไม่สามารถลดอุณหภูมิด้วยการเป่าอากาศเย็นได้ นอกจากนี้จะเหมาะสำหรับผลผลิตที่มีการหายใจสูง เช่น ข้าวโพดหวาน ผักกาดหอม ปวยเล้ง เป็นต้น น้ำแข็ง 1 ปอนด์ สามารถลดอุณหภูมิใน ผลผลิต น้ำหนัก 3 ปอนด์ จาก 29.4 องศาเซลเซียส เหลือ 4.4 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.7 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยอากาศเย็น ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)



รูปที่ 2.8 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยการเป่าอากาศเย็น ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)



รูปที่ 2.9 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)



รูปที่ 2.10 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแข็ง ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล. 2553)

5) การลดอุณหภูมิเบื้องต้น ด้วยสุญญากาศ (vacuum cooling) การลดอุณหภูมิ ผลผลิตในสุญญากาศ เริ่มพัฒนาและนำมาใช้ในปี ค.ศ. 1948 นิยมใช้มากในผักกาดหอม ผักกาดหอมห่อ ผักชีฝรั่ง กะหล่ำดอก และข้าวโพดหวาน ซึ่งไม่สามารถลดอุณหภูมิผลผลิตด้วยการเป่าอากาศเย็น หรือการใช้น้ำเย็น ซึ่งจะ บรรจุผลผลิต ในภาชนะบรรจุและลดอุณหภูมิในห้องหรือท่อโลหะขนาดใหญ่ ที่ดูดอากาศออกจากห้องหรือท่อ ความดันของอากาศจะลดลงประมาณ 4.6 มิลลิเมตรของสารปรอท ซึ่งในความดันระดับนี้ น้ำจะมีจุดเดือดที่ 0 องศาเซลเซียส ในระหว่างการลดอุณหภูมิผลผลิตที่เป็นใบจะสูญเสียน้ำร้อยละ 1.5-4.7 หรือประมาณร้อยละ 1 ต่ออุณหภูมิที่ลดลง 12.2 องศาเซลเซียส วิธีนี้จะทำให้น้ำระเหยจากผลผลิตอย่างรวดเร็ว ผลผลิตอาจจะเหี่ยว เนื่องจากสูญเสียน้ำมาก ถ้าหากใช้เวลานานเกินไป ดังนั้นก่อนนำผลผลิตเข้าลดอุณหภูมิจะต้องใช้น้ำเย็นฉีดพ่นให้ใบเปียก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวโพดหวาน อัตราการลดของอุณหภูมิใน ผลผลิตขึ้นอยู่กับอัตราการสูญเสียน้ำ หลังจากลดอุณหภูมิจำเป็นต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำและขนส่งโดยรถห้องเย็น

6) การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยการระเหย (evaporative cooling) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และใช้ต้นทุนต่ำ โดยการใช้อากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ พ่นหมอกผ่านผลผลิตที่มีความชื้น สูงและผลผลิตที่มีความชื้นสูงถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศที่มีความชื้นต่ำ นิยมใช้ในพื้นที่ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 65 % สามารถลดอุณหภูมิได้ 9.4-12.2 องศาเซลเซียส

การผลิตเพื่อการค้าในต่างประเทศจะนิยมเก็บเกี่ยวก่อนที่จะมีแสงสว่าง เพื่อให้ผลผลิตมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะประหยัดเวลาและพลังงาน ตัวอย่างผลผลิตทางการเกษตรและข้อมูลการลดอุณหภูมิเบื้องต้นแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5

2.1.3 การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ(hydro-cooling) (คณัย บุญเกียรติ. 2553)

วิธีนี้ลดอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่าวิธีการใช้อากาศเย็นประมาณ 15 เท่า วิธีนี้จะช่วยทำให้ผลผลิตมีเนื้อสัมผัสและความสด ดีขึ้น สามารถดำเนินการในระดับที่มี ผลผลิตจำนวนมากหรือปรับให้เข้ากับจำนวนผลผลิตน้อยๆ ได้ด้วย แต่มีข้อจำกัด คือ ใช้ได้กับผลผลิตที่ทนต่อการเปียกน้ำเท่านั้น และโรคพืชหลายชนิดสามารถพัฒนาได้เมื่อผลผลิตเปียกน้ำ นอกจากนั้นยังเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าวิธีอื่น และอาจจะมีข้อจำกัดกับการใช้ภาชนะบรรจุบางชนิด

1. การปล่อยให้น้ำเย็นไหลผ่าน (flooding) เป็นการปล่อยให้น้ำเย็นไหลผ่านผลผลิต ที่บรรจุในภาชนะเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเคลื่อนที่ไปตามสายพานหรือรางเลื่อนผ่านกระแสน้ำที่ปล่อยในอุโมงค์

2. การพ่นฝอยน้ำเย็น (spraying) เป็นการฉีดพ่นน้ำเย็นออกจากหัวฉีด ที่อยู่ด้านบนเป็นน้ำฝอยๆ หรืออาจทำเป็นอุโมงค์ให้ ผลผลิต ไหลผ่านก็ได้ วิธีการฉีดพ่นน้ำเย็นนี้อาจจะเป็นลักษณะที่ผลผลิตไหลไปตามระบบสายพานแล้วผ่านเข้าไปในอุโมงค์ ดังรูปที่ 2.9 ที่มีการฉีดพ่นน้ำเย็นลงมาโดยผลผลิตเคลื่อนที่อัตราเร็ว 1 ฟุตต่อนาที แต่ทั้งนี้แล้วแต่การออกแบบด้วย ความยาวของอุโมงค์ขึ้นอยู่กับ การออกแบบหรือความต้องการของผู้ใช้ วิธีนี้เป็นวิธีการที่ใช้น้ำมาก นอกจากนั้นอาจจะเป็นลักษณะแบบกะ (batch hydrocooler) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งปล่อยน้ำฉีดพ่นลงมา โดยที่ผลผลิตไม่เคลื่อนที่ ผลผลิต จะอยู่ในห้องที่มีน้ำฉีดพ่นลงมา วิธีนี้อาจจะมีการนำน้ำไปใช้หมุนเวียนได้อีก เครื่องลดอุณหภูมิชนิดนี้อาจ ออกแบบให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่ตามความต้องการของผู้ใช้ได้

3. การจุ่มในน้ำเย็น (Immersion) เป็นวิธีการจุ่มภาชนะบรรจุที่บรรจุผลผลิตแล้ว ใส่งในถังน้ำเย็นซึ่งอาจเป็นถังขนาดใหญ่ หรือเป็นถังน้ำแช่แข็งก็ได้ ระยะเวลาที่จุ่มจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิต ตามปกติภาชนะบรรจุจะถูกนำเข้าสู่ระบบทางด้านหนึ่งของเครื่องแล้วเคลื่อนที่ ในขณะที่

ตารางที่ 2.4 ผลผลิตเกษตรและการลดอุณหภูมิเบื้องต้น ก ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2553)

ผลผลิตเกษตร	สุญญากาศ	อากาศเย็น	การเป่าอากาศเย็น	น้ำเย็น	น้ำแข็ง
หน่อไม้ฝรั่ง				*	*
ถั่วเขียวฝักสด	*	*	*	*	
บล็อกโคลี				*	*
กะหล่ำปลี		*	*		
แคนตาลูป				*	*
แครอท			*	*	
ผักขึ้นฉ่าย	*			*	*
แตงกวา			*	*	
มะเขือยาว		*	*		
ต้นหอม				*	*
ผักกาดหอม	*		*		
กระเจี๊ยบมอญ		*	*		
ถั่ว			*	*	
พริกไทย			*	*	
พืชมินต์สดอ่อน			*	*	
พืชตระกูลน้ำเต้า		*	*		
ผักขม	*			*	*
สตรอเบอร์รี่		*	*		
ข้าวโพดหวาน		*	*		
มันฝรั่งหวาน		*			
มะเขือเทศ		*	*		
หัวผักกาด		*			

ตารางที่ 2.5 ผลผลิตเกษตรกรและการลดอุณหภูมิเบื้องต้น ข ที่มา : (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2553)

ผลผลิตเกษตรกร	การลดอุณหภูมิเบื้องต้น
ผักกาดหอมห่อ	การใช้สุญญากาศ อุณหภูมิ -1 ถึง 1 องศาเซลเซียส หรือการเป่าอากาศเย็น อุณหภูมิที่ต้องการ 4.5 องศาเซลเซียส
ผักกาดหอม	การใช้น้ำเย็น อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส ใช้พัดลมเป่าหรือใช้ตระแกรงหมุนเหวี่ยงให้แห้ง ใสน้ำแข็งเกล็ดในภาชนะบรรจุ
ถั่วแขก	การใช้น้ำเย็น อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต้องการ 4.4 ถึง 6.1 องศาเซลเซียส อาจจะใช้การเป่าอากาศเย็น หรือสุญญากาศก็ได้
ปวยเล้ง	ใสน้ำแข็งเกล็ดด้านบนในภาชนะบรรจุ อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส อาจจะใช้น้ำเย็นหรือสุญญากาศ บรรจุในถุงพลาสติกประกอบด้วย CO ₂ 10-40 % O ₂ 10%
ถั่วลันเตา	การเป่าอากาศเย็น อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 % อุณหภูมิที่ต้องการ 1.1 องศาเซลเซียส การใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิ -1.1 ถึง 1.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที สำหรับตลาดใน ท้องถิ่น บรรจุในถุงพลาสติก ประกอบด้วย CO ₂ 5-7 % ใสน้ำแข็งเกล็ดในภาชนะบรรจุ
ข้าวโพดหวาน	การใช้สุญญากาศ ก่อนลดอุณหภูมิควรพ่นน้ำให้เปียก และหลังจากนั้นใสน้ำแข็งเกล็ดใน ภาชนะบรรจุ ลดอุณหภูมิจาก 29.4 ถึง 4.4 องศาเซลเซียส หรือการใช้น้ำเย็น อุณหภูมิที่ต้องการ 0 ถึง 3.3 องศาเซลเซียส
ผักขึ้นฉ่าย	การใช้น้ำเย็น อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส การใช้สุญญากาศ เหมาะสำหรับการขนส่งตลาดที่ห่างไกล การเป่าอากาศเย็น ใสน้ำแข็งเกล็ดในภาชนะบรรจุ บรรจุในถุงพลาสติก ประกอบด้วย CO ₂ 5 % O ₂ 3%
ผักชีฝรั่ง	การใสน้ำแข็งเกล็ด อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส บรรจุในถุงพลาสติก ประกอบด้วย CO ₂ 11 % O ₂ 10%
แครอท	การใช้น้ำเย็นหรือการเป่าอากาศเย็น อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส
บัตือคโคลี	การใช้น้ำเย็น หรือการใสน้ำแข็งเกล็ด อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส บรรจุในถุงพลาสติก ประกอบด้วย CO ₂ 10 % O ₂ 1%
ราดิชิโอ	การใช้สุญญากาศ อุณหภูมิ 1.1 องศาเซลเซียส
รูบาร์บ	การใช้น้ำเย็น หรือ การเป่าอากาศเย็น อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส
วอเตอร์เครส	การใสน้ำแข็งเกล็ด อุณหภูมิที่ต้องการ -0.5 ถึง 5.0 องศาเซลเซียส

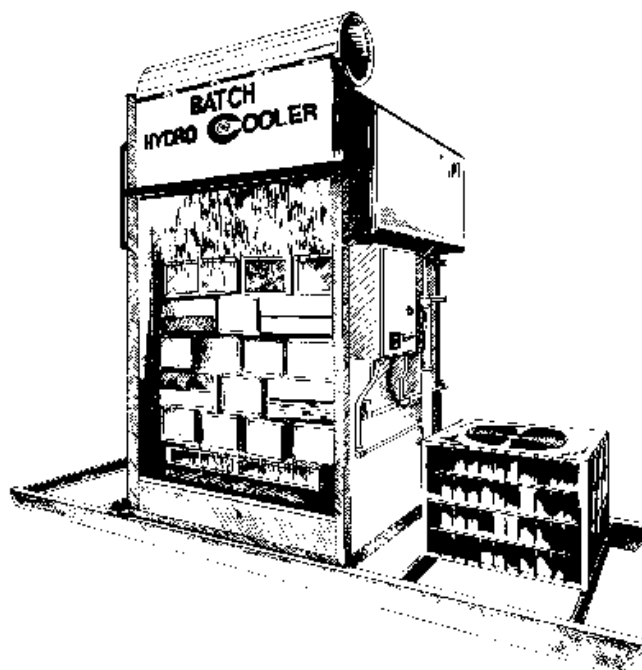
จมอยู่ในน้ำไปอีกด้านหนึ่งของเครื่องซึ่งบริเวณนั้นภาชนะบรรจุจะถูกนำขึ้นจากน้ำ ความเย็นอาจจะได้มาจากเครื่องทำความเย็นหรือน้ำแข็ง น้ำในถังจะต้องเคลื่อนที่ตลอดเวลา ระยะเวลาที่ ผลผลิตอยู่ในน้ำแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.12

การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ จะช่วยลดอุณหภูมิของผลผลิตได้อย่างรวดเร็ว น้ำที่ใช้แช่ควรเติมคลอรีนลงไปด้วยเพื่อทำให้น้ำสะอาดปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ข้อที่ควรระวังในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำคือ ต้องควบคุมให้มีการหมุนเวียนของน้ำให้ไหลผ่านผิวของผลผลิตอย่างเพียงพอ และอุณหภูมิของน้ำต้องไม่ต่ำเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายต่อ ผลผลิต น้ำควรมีอุณหภูมิใกล้ 0 องศาเซลเซียส ยกเว้นผลผลิตที่อ่อนแอและเกิดความเสียหายจากน้ำเย็นได้ง่าย ควรเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ใช้ให้สูงขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ใช้น้ำแล้วยังคัดแปลงใช้น้ำแข็งได้บ้างในบางกรณี เช่น การใช้น้ำแข็งวางทับ โดยให้น้ำแข็งสัมผัสโดยตรงกับผลผลิต (contact icing) หรืออาจทูนน้ำแข็งให้มีขนาดเล็กๆ บรรจุใส่ถุงพลาสติกแล้ววางทับ (package icing) หรืออาจใช้น้ำแข็งวางไว้เฉพาะด้านบนของภาชนะบรรจุ (top icing)

การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นของข้าวโพดหวาน ได้มีการศึกษาไว้หลายท่านดังนี้ครั้งนี้คือ สุกัลยา ภูทองและคณะ (2548) ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่มีต่อการยืดอายุการเก็บรักษาและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของข้าวโพดหวานพันธุ์ ไฮบริดซ์ 3 และ อินทรี 2 โดยทำการลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ได้แก่ อุณหภูมิห้อง 5 องศาเซลเซียส และ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที ก่อนการเก็บรักษา พบว่า ข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที มีแนวโน้มที่จะสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการคือ ชะลอการสูญเสียปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total Soluble Solids, TSS) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลซูโครสและลดอัตราการหายใจ รวมทั้งชะลอการสร้างแป้ง ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับข้าวโพดหวานที่ไม่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งและน้ำตาลมีความสัมพันธ์กับการทำงานของ ADP-Glucose pyrophosphorylase (ADPGlc PPase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการสร้างแป้ง พบว่าข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที มีการทำงานของ ADPGlc PPase ที่ลดลงกว่าข้าวโพดหวานที่ไม่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยน้ำ

Romphophak (2007) ศึกษาคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวโพดหวาน 16 พันธุ์ ที่ผ่านลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ แล้วเก็บรักษาในกล่องโฟมที่ใส่น้ำ แข็ง ที่อุณหภูมิ 1-2 องศาเซลเซียส และ

ความชื้นสัมพัทธ์ 99 % การทดลองพบว่าสีของเมล็ดเปลี่ยนแปลงเพียง 2-3 พันธุ์ แต่ความสดและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หลังจากเก็บไว้ถึง 7 วันแล้วไม่มีการเสียหายเนื่องจากความเย็นและคุณภาพยังคงเดิม



รูปที่ 2.11 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแบบกะ ที่มา : (Boyette, Estes and Rubin. 2010)



รูปที่ 2.12 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแบบจุ่ม ที่มา : (Boyette, Estes and Rubin. 2010)

Vigneault et.al. (2006) ศึกษาผลกระทบของการวางตัวของผักข่าโพดหวานต่อสมรรถนะของการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำและคุณภาพของ ข่าโพดหวาน โดยใช้ข่าโพดหวาน 3 พันธุ์ นำมาลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำทันทีหลังจากเก็บเกี่ยวโดยใช้เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ โดยใช้การไหลของน้ำ 2 แบบ คือ แบบจุ่มและสเปรย์ โดยวางตัวขนานและตั้งฉากกับการไหลของน้ำ ผักข่าโพด ที่ลดอุณหภูมิด้วยอากาศถูกใช้เป็นตัวควบคุม โดยวางไว้ในห้องเย็น ทั้งการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำและอากาศจะถูกเก็บไว้ในห้องเย็นเป็นเวลา 7 และ 21 วัน ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 90-95% โดยที่ half-cooling time และคุณสมบัติของข่าโพดหวานจะถูกวัดเพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเปรียบเทียบกับ การลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยอากาศ การไหลแบบจุ่มและการวางตัวแบบตั้งฉากกับการไหลของน้ำจะลดเวลาในการ ลดอุณหภูมิของข่าโพดหวานลงมาก ซึ่งข่าโพดหวาน ที่ลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ จะรักษาคุณภาพไว้ได้สูงถึง 21 วัน โดยยังคงรักษาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณความชื้น และดัชนีคุณภาพได้ดีเยี่ยม ค่า half-cooling time ลดลง 42.3 % เมื่อข่าโพดจุ่มไปในน้ำอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และรูปแบบการไหลแบบตั้งฉากเมื่อเทียบกับการไหลของน้ำแบบขนานและแบบสเปรย์ภายใต้สภาวะเดียวกัน half-cooling time จะลดลงถึง 3.7 เท่าของค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ คือค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแกนข่าโพดหวานที่ติดกับเมล็ดสามารถลดลงจาก 24 ถึง 12 องศาเซลเซียส ในเวลา 16 นาที และ 19.2 นาที สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ตามลำดับ

2.1.4 อัตราในการลดอุณหภูมิและเวลาในการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (Cortbaoui, 2005)

อัตราการลดอุณหภูมิแตกต่างกันไปตามวิธีการและสภาวะในการทำความเย็น (Kays, 1997) ดังนั้นอัตราการลดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการรวมถึงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผลผลิตและตัวกลาง อัตราการไหลของตัวกลางในการทำความเย็น (น้ำ, อากาศและ สูญญากาศ), สมบัติกายภาพและเชิงความร้อนของผลผลิต (Dincer, 1997)

กฎการทำความเย็นของนิวตันสามารถใช้ในการกำหนดอัตราการ ลดอุณหภูมิ ของผลผลิต ด้วยเหตุนี้บางพารามิเตอร์ที่สามารถคำนวณได้ เช่น สัมประสิทธิ์ในการลดอุณหภูมิ (cooling coefficient, C) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ 2.1 (Mohsenin, 1980)

$$C = \frac{hA}{\rho C_p V} \quad (2.1)$$

เมื่อ	C	คือ สัมประสิทธิ์ในการลดอุณหภูมิ (s^{-1})
	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	V	คือ ปริมาตรของผลผลิต (m^3)
	A	คือ พื้นที่ผิวของผลผลิต (m^2)
	ρ	คือ ความหนาแน่นเนื้อของผลผลิต (kg/m^3)
	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะของผลผลิต ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)

ค่าสัมประสิทธิ์ในการลดอุณหภูมิเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการ ลดอุณหภูมิของผลผลิต ระหว่างกระบวนการ ลดอุณหภูมิ ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิผลผลิตต่อหน่วยของเวลา (Dincer, 1997) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ในการ ลดอุณหภูมิ เป็นความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง ลอการิทึมของอัตราส่วนอุณหภูมิกับเวลา (Guillou, 1958) วิธีอื่น ๆ สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ ในการลดอุณหภูมิสามารถพบได้ในรายงานต่างๆ (Gariépy et al., 1987; Goyette et al., 1996)

พารามิเตอร์สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิเบื้องต้นคือ ระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิหรือการทำความเย็น ที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์ เวลานี้เรียกกันว่า half-cooling time ตาม Mohsenin (1980) กล่าวไว้ว่า half-cooling time คือ "เวลาที่ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง ผลผลิตและตัวกลาง เป็นครึ่งหนึ่งของความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มต้น" สามารถพิจารณาจากสมการ

$$\text{half-cooling time} = \frac{\ln(0.5)}{C} \quad (2.2)$$

การคำนวณ half-cooling time ถ้าทราบ half-cooling time ของผลผลิตที่ต้องการ ลดอุณหภูมิ ทำให้เราสามารถคำนวณระยะเวลา ที่จะทำให้ ผักสดผล อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิ ที่ต้องการได้ half-cooling time ของผลผลิตบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.6 ตัวอย่าง การคำนวณ เช่น ผลผลิตมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นำไปแช่ในห้องเย็นซึ่งมีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และ half-cooling time ของผลิตผล คือ 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.6 half-cooling time ของผลิตผลบางชนิด (ดัดแปลงจาก คณัยและนิธิยา, 2535)

ผลิตผล	ตัวกลาง □	สภาพระหว่างลดอุณหภูมิ	half-cooling time (นาที)
หน่อไม้ฝรั่ง	น้ำ	แต่ละหน่อแยกกัน	1.1
	น้ำ	อยู่ในภาชนะบรรจุในแนวตั้ง	2.2
บล็อคโคลี	น้ำ	แต่ละดอกแยกกัน	2.1
แคนตาลูป	น้ำ	แต่ละผลแยกกัน	15
	อากาศ-น้ำแข็ง	น้ำแข็งโปะข้างบน พัดลมเป่า	180
กะหล่ำดอก	น้ำ	แต่ละดอกแยกกัน ตัดแต่งแล้ว	7.2
	การเป่าอากาศ	อยู่ในกล่องกระดาษเรียงชั้นเดียว แต่ละหัว มีพลาสติกห่อ	90
ข้าวโพดหวาน	น้ำ	มีเปลือกหุ้ม แต่ละฝักแยกกัน	20
	น้ำ	ในถังไม้ ซ้อนกัน 5 ฝัก	28
มะเขือเทศ	น้ำ	แต่ละผลแยกกัน	10
	การเป่าอากาศ	ในกล่องกระดาษ	47

1) half-cooling time

ความแตกต่างของอุณหภูมิผลิตผลและตัวกลาง คือ $20-0 = 20$ องศาเซลเซียส

ครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิต่างกัน คือ $20/2 = 10$ องศาเซลเซียส

half-cooling time ครั้งที่ 1 จึงเป็นเวลา que อุณหภูมิของผลิตผลลดลง 10 องศาเซลเซียส

เวลาที่ผลิตผลมีอุณหภูมิ = อุณหภูมิเริ่มต้น - ความแตกต่างกันระหว่างผลิตผลและตัวกลาง

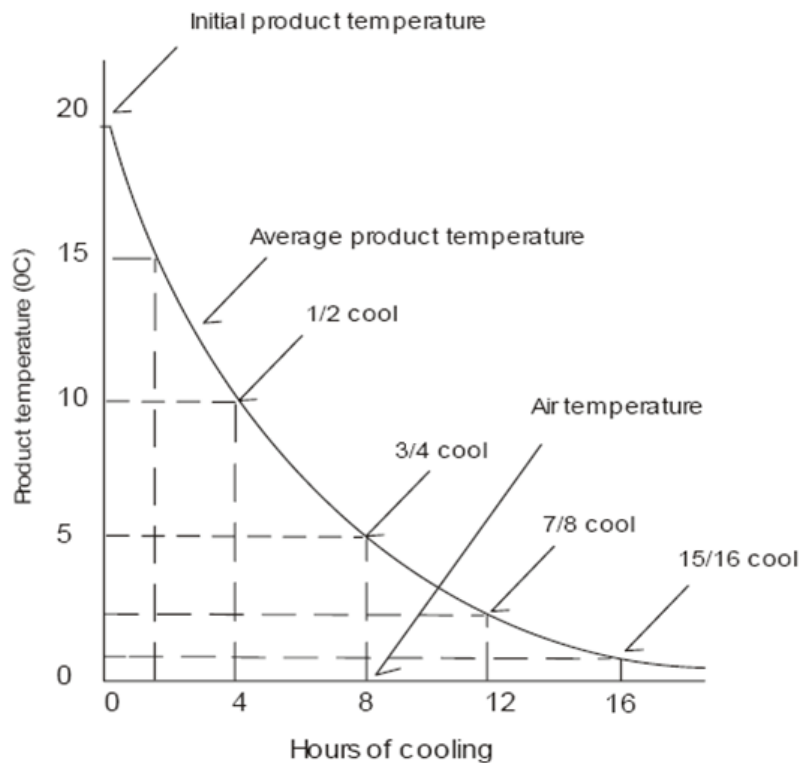
$$= 20 - 10$$

$$= 10 \quad \text{องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง}$$

2) 3/4 cooling time, 7/8 cooling time และ 15/16 cooling time

นั่นคือ half-cooling time ครั้งที่ 2, 3 และ 4 โดยใช้เวลา 8, 12 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ

อัตราการลดอุณหภูมิแสดงใน รูปที่ 2.13 เมื่อเริ่ม ลดอุณหภูมิ อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการในการลดอุณหภูมิ จะช้าลง half-cooling time เป็นอิสระจากอุณหภูมิผลิตผลเริ่มต้นและเริ่มคงที่ในช่วงท้ายของการลดอุณหภูมิ (Kays, 1997)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการลดอุณหภูมิและอุณหภูมิของผลผลิตและตัวกลาง
ที่มา : (Cortbaoui, 2005)

เพื่อให้ประสบผลสำเร็จในการ ลดอุณหภูมิ ในเชิงพาณิชย์ของ ผลผลิต ควรใช้เวลาถึง 3/4 cooling time หรือ 7/8 cooling time (Singh and Chakraverty, 2001) สามารถพิจารณาได้จาก

$$\text{Temperature}_{7/8\text{cooling}} = T_i - \frac{7}{8}(T_i - T_a) \quad (2.3)$$

เมื่อ	Temperature 7/8 cooling time	คือ อุณหภูมิที่ 7/8 cooling time (°C)
	T_i	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลผลิต (°C)
	T_a	คือ อุณหภูมิของตัวกลาง (°C)

นอกจากนี้อัตราการลดอุณหภูมิใน ขณะนั้น (instantaneous cooling rate, CRins) สามารถ
คำนวณได้ในเวลาใดๆโดยสมการดังต่อไปนี้ (Singh and Chakraverty, 2001)

$$CR_{ins} = \frac{2.08 (T_{ins} - T_a)}{T_{7/8}} \quad (2.4)$$

เมื่อ	CR _{ins}	คือ อัตราการลดอุณหภูมิในขณะนั้น (°C/s)
	T _{ins}	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลผลิตในขณะนั้น (°C)
	T _a	คือ อุณหภูมิของตัวกลาง (°C)
	T _{7/8}	คือ 7/8 cooling time (s)

งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการลดอุณหภูมิมีดังนี้ Becker and Fricke (2002) ศึกษาเกี่ยวกับสมการที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น ซึ่งใช้การประมาณโดยวิธี half-cooling time, สัมประสิทธิ์ในการทำความเย็น, แฟกเตอร์ f and j (แฟกเตอร์ในการล่าช้า), การถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันต่อขนาด (equivalent heat transfer dimensionality) และการคำนวณจากแบบจำลองที่กำหนดให้ผลผลิตเป็นรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย (analytical solutions) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของผักและผลไม้ 9 ชนิด ได้แก่ แอปเปิ้ล แอปปริคอต แตงกวา มะเขือยาว ลูกพีช ลูกแพร์ ลูกพลัม สควอช และมะเขือเทศ โดยวิธี half-cooling time ได้ค่าผิดพลาดรวมน้อยที่สุด เท่ากับ 16.9 เปอร์เซ็นต์

Jain et.al. (2005) ศึกษาการทำปลาให้เย็น ด้วยน้ำแข็งโดยการใช้แบบจำลองแบบ เอ็กโปเนนเชียล (exponential) และ ลอการิทึมมิก (logarithmic) ที่ใช้อธิบายการทำความเย็นของ ปลา ค่า half cooling time และ 7/8 cooling time ถูกนำมาคำนวณสำหรับตัวปลาที่น้ำหนัก ต่างๆ โดยหาค่า half cooling time และ 7/8 cooling time จากความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature (θ) โดยค่า θ หาจากสมการที่ 2.5 กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ได้สมการที่เป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลดังสมการที่ 2.6 ดัดแปลงจาก Dincer (1995a, 1995b) และ J คือเวลาที่ชั่วระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวและที่จุดกึ่งกลางของผลผลิต

$$\frac{\text{อุณหภูมิใดๆ} - \text{อุณหภูมิน้ำ}}{\text{อุณหภูมิเริ่มต้นของผลผลิต} - \text{อุณหภูมิน้ำ}} \quad (2.5)$$

$$\theta = J \exp(-Ct) \quad (2.6)$$

แทนค่า θ เท่ากับ 0.5 และ 0.125 ลงในสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ค่า half cooling time และ 7/8 cooling time ตามลำดับ

$$\text{half cooling time} = \frac{\ln(2J)}{C} \quad (2.7)$$

$$7/8 \text{ cooling time} = \frac{\ln(8J)}{C} \quad (2.8)$$

2.2 การออกแบบ และสร้างเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน

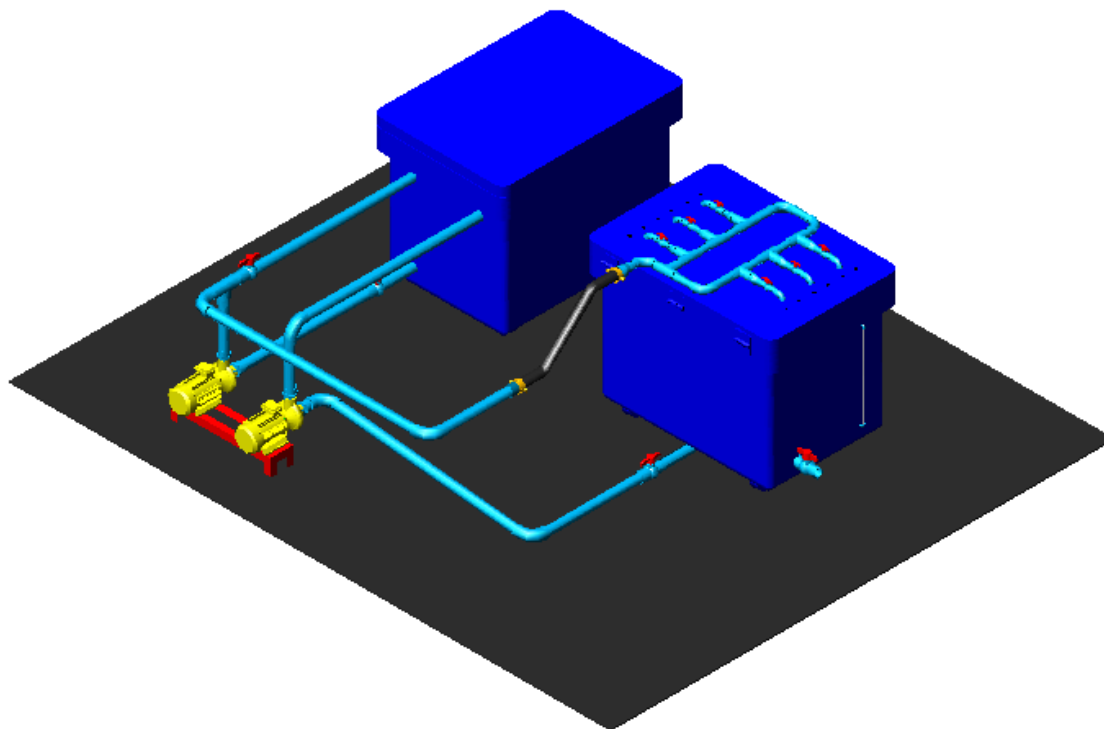
เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ มีลักษณะเป็นตู้แลกเปลี่ยนความเย็น ถอดประกอบได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน จากงานวิจัยของ Vigneault et.al. (2006) พบว่าระบบสเปรย์น้ำเย็นรักษาคุณภาพของข้าวโพดหวานไว้ได้ ซึ่งน้ำจะยังคงไม่ทำลายข้าวโพดหวาน ให้เสียหาย ซึ่งเราใช้น้ำแข็งผลิตน้ำเย็นให้และมีระบบหมุนเวียนน้ำและผ่านตัวกรองเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการประหยัดน้ำและลดภาระในการทำความเย็นอีกด้วย ซึ่งเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำนี้ต้องการให้น้ำออกเป็นฝอยๆ จากแนวคิดเริ่มต้นนั้นคือต้องให้ระบบอยู่ในถังแช่พลาสติก 2 ถัง ซึ่งถังหนึ่งให้เป็นแหล่งน้ำโดยใช้น้ำแข็งเป็นแหล่งความเย็น อีกถังหนึ่งให้ใส่ ข้าวโพดหวาน ซึ่งมีฝาเปิดปิดได้ และถังนั้นเองก็จะติดท่อส่งน้ำเย็นเอาไว้เป็นแผงด้านบน จากรูปที่ 2.15 คือ การต่อท่อด้านบนของฝาเปิดถัง จากท่อ 2 นิ้ว ที่ต่อมาจากแหล่งน้ำใส่ท่อลด 1.5 นิ้ว และต่อท่อแยกเป็น 2 ทาง ด้านซ้ายลดด้านขวา แต่ละด้านนั้นต่อท่อ 1 นิ้ว ไปอีก 3 ท่อ เพื่อต่อท่อไปยังด้านล่างของฝาดัง โดยมียอดยึดแผงท่อด้านล่างให้ติดกับฝาดัง ด้านบน ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีจำนวนท่อทั้งหมด 8 ท่อ และทุกท่อนั้นเจาะรู เพื่อสเปรย์น้ำเย็นให้ ข้าวโพดหวาน โดยแต่ละท่อนั้นเจาะรูเป็น 3 แถว ยกเว้นท่อริมทั้ง 2 ด้าน ส่วนด้านล่างของถังนั้นต้องการทำการเจาะเพื่อทำการสูบน้ำไปยังแหล่งน้ำ ดังรูปที่ 2.17 โดยมีตัวกรองเพื่อกรองเศษดิน เศษใบไม้ ไม้ให้เข้าปั๊ม

2.2.1 วัสดุที่นำมาสร้างเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

1) ถังแช่พลาสติก

ระบบสเปรย์น้ำถูกติดตั้งไว้ในถังแช่น้ำแข็งพลาสติก โดยมีโพลีเอทิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์จากโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ชนิดความหนาแน่นต่ำแอลดีพีอี (low Density Polyethylene, LDPE) โดยมีคุณสมบัติของการเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ $0.03 \text{ W/m}\cdot\text{C}$ มีความหนาแน่นนี้ ด้านบนหนา 142 มิลลิเมตร ด้านล่างหนา 45 มิลลิเมตร ด้านข้าง(ด้านหน้าถัง)

หนา 98 มิลลิเมตร และด้านข้าง (ด้านข้างตั้ง) หนา 77 มิลลิเมตร ถูกหุ้มด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีน มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ $0.039 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ทั้งภายในและภายนอก หนา 2.5 มิลลิเมตร ขนาดภายใน $670 \times 960 \times 700$ มิลลิเมตร ขนาดภายนอก $875 \times 1123 \times 897$ มิลลิเมตร เป็นแบบขาสูง มีบานพับ

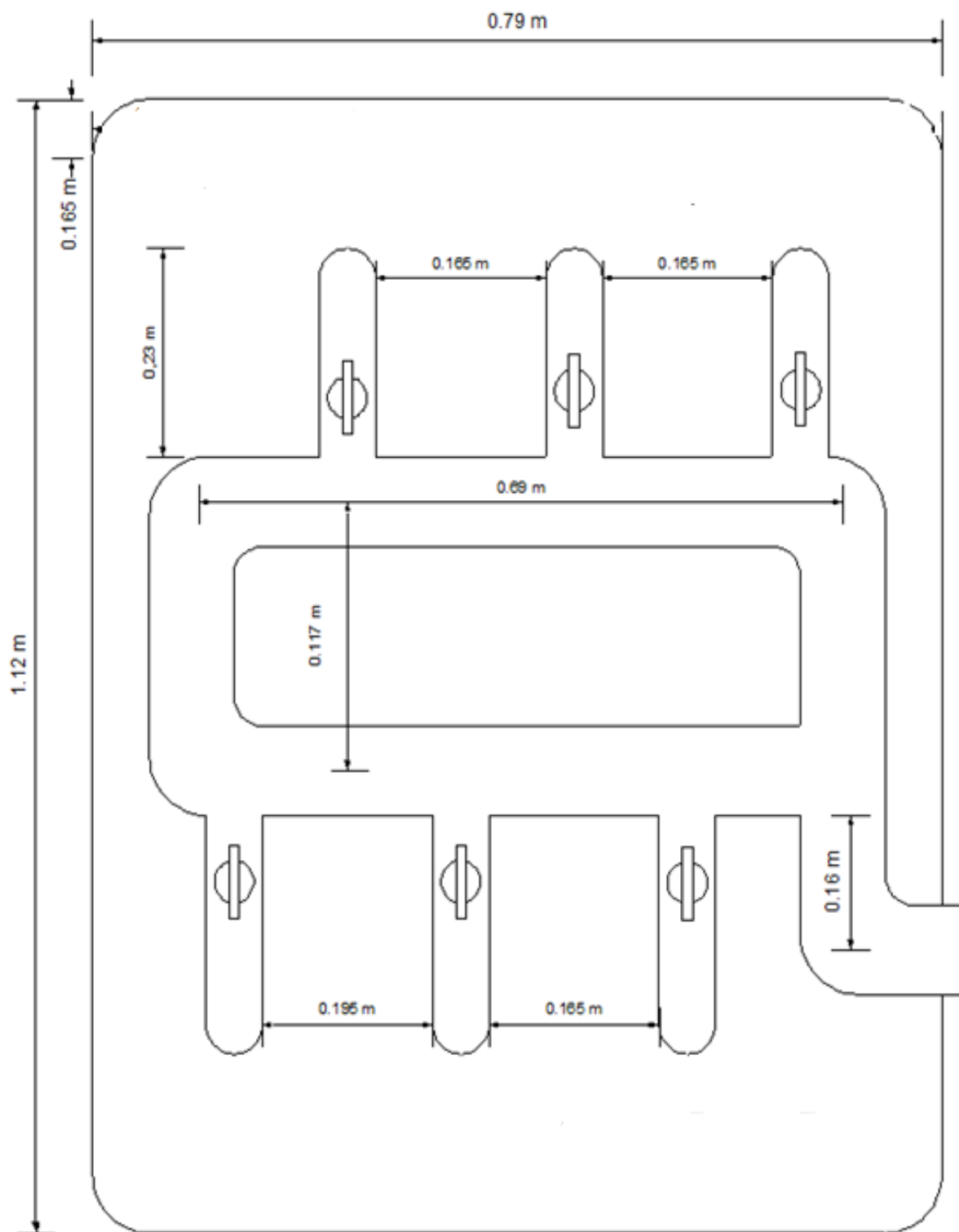


รูปที่ 2.14 เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

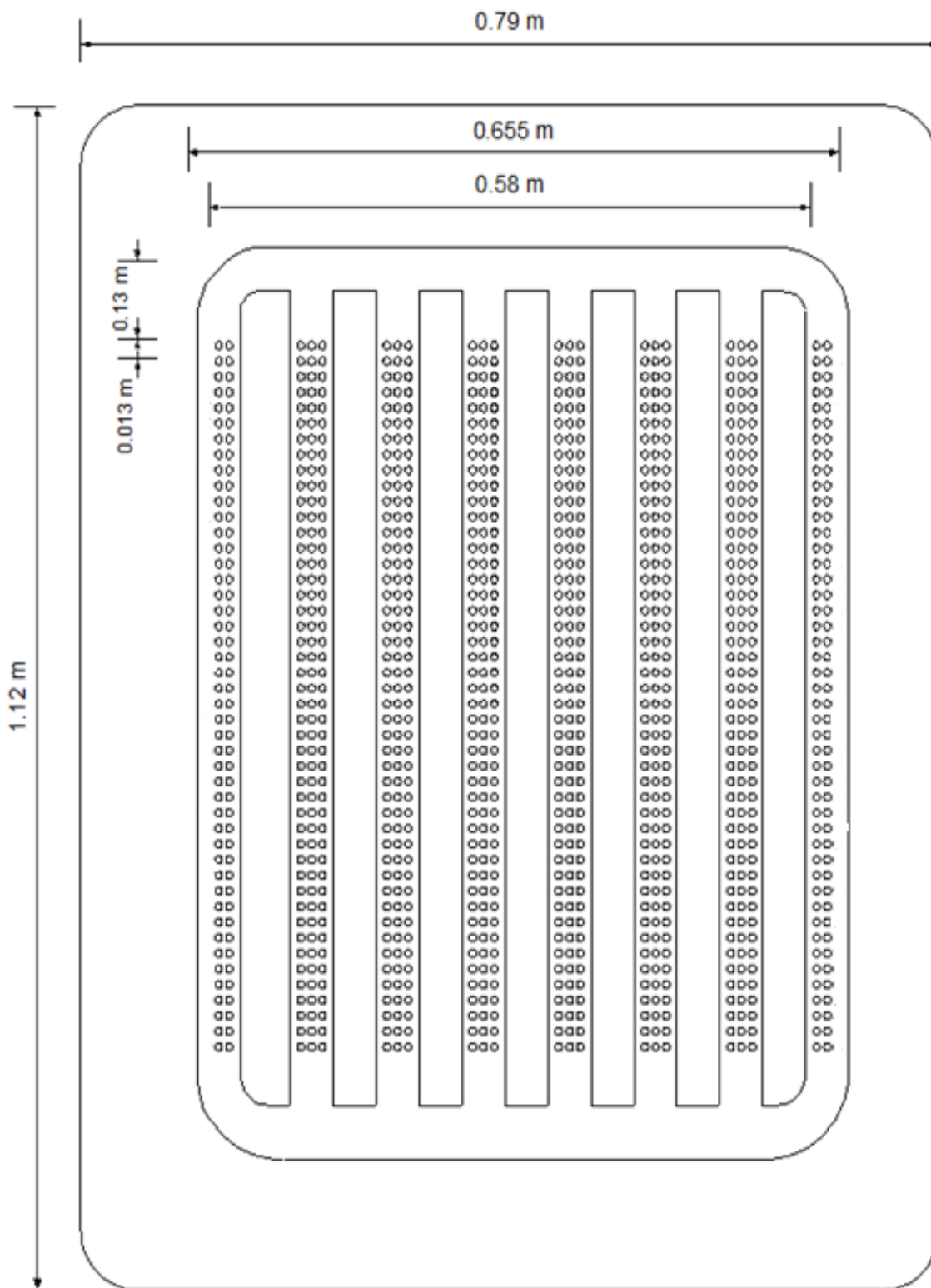
2) ท่อ PVC (สำนักบริการคอมพิวเตอร์, 2550)

ท่อ PVC มีราคาถูก หาซื้อง่าย น้ำหนักเบา เชื่อมต่อได้ง่ายโดยใช้กาวและข้อต่อเกลียว โดยสามารถต่อเชื่อมกับท่อชนิดอื่นได้ด้วย นอกจากนี้ยังไม่เป็นสนิม และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี แต่มีข้อเสียที่แตกหักง่าย ถ้ามีน้ำหนักมากๆ กดทับ ท่อพีวีซี ผลิตรุ่นยาวท่อละ 4 เมตร และมี 3 ระดับชั้นความดัน (หรือสามารถทนความดันได้) คือ ชั้น 5 , 8.5 , และ 13.5 เมกะปาสกาล มีขนาด 1.5 – 16 นิ้ว (18 – 600 มิลลิเมตร) โดยปกติชนิดสีฟ้าเท่านั้นที่เหมาะสมสำหรับระบบให้น้ำ เพราะท่อสีอื่นมีความบางกว่า ทำให้ไม่สามารถทนความดันน้ำได้สูง

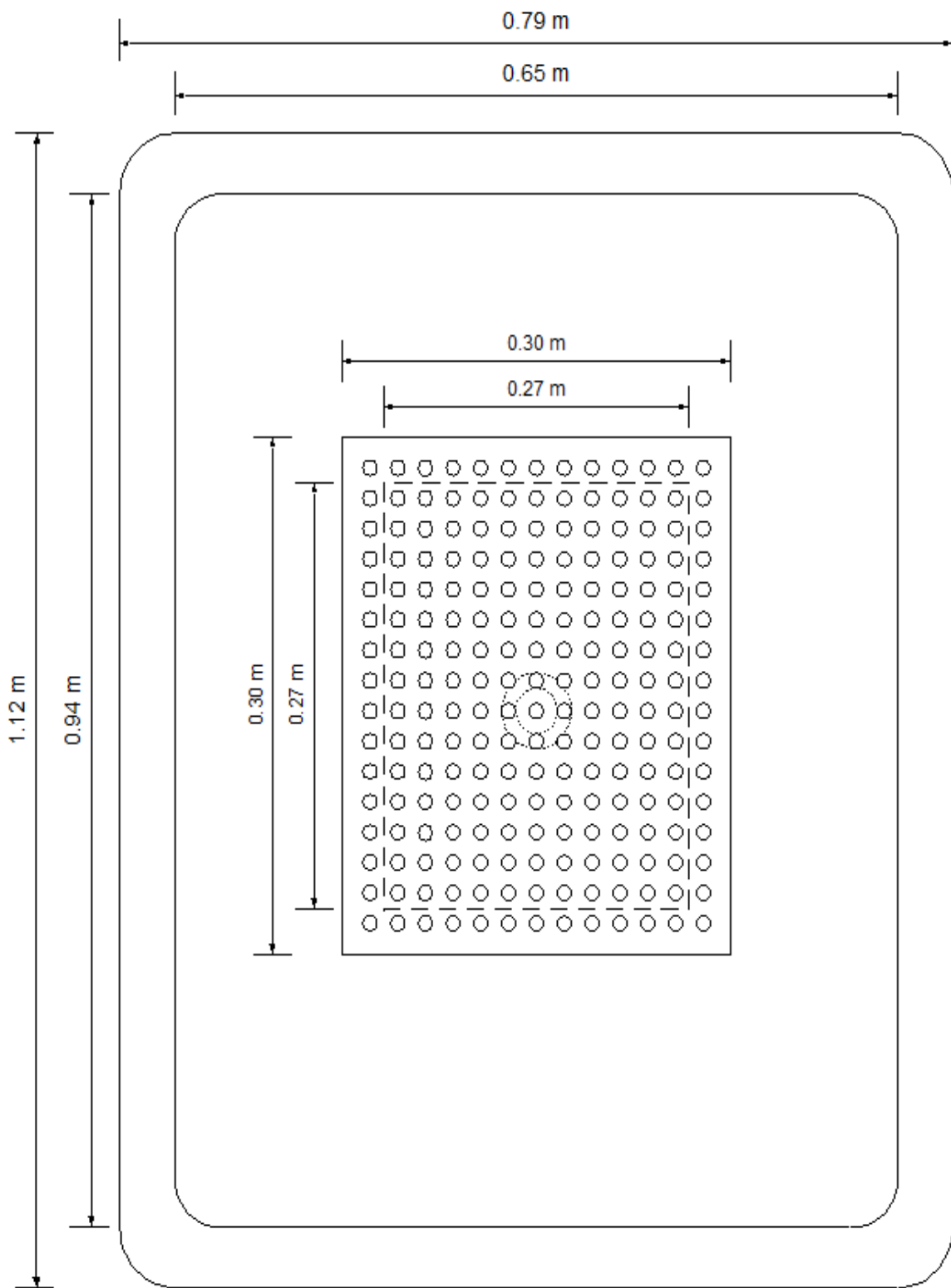
ข้อต่อพีวีซี ก็เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ดังนั้นเมื่อจะต่อท่อให้เป็นตามแบบที่ต้องการ จึงต้องอาศัยข้อต่อมายึดเข้าด้วยกัน ข้อต่อดังกล่าวมีหลายแบบ เช่น สามทาง สี่ทาง ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม ฝาอุดปลายท่อ



รูปที่ 2.15 แบบ 2 มิติ ด้านบนของฝาเปิดของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ



รูปที่ 2.16 แบบ 2 มิติ ด้านล่างของฝาเปิดของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ



รูปที่ 2.17 แบบ 2 มิติ ด้านในของเครื่องเมื่อมองจากด้านบน

วาล์ว เป็นวาล์วที่จะปล่อยให้ น้ำไหลไปในทิศทางที่ต้องการ ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลให้ได้ตามที่ต้องการ

3) ปั๊มน้ำ

เนื่องจากได้ศึกษางานวิจัยของ Vigneault et.al. (2006) ได้ใช้อัตราการไหลของน้ำ 3.93 ลิตรต่อ นาที ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเป็นค่าที่แนะนำโดย Kader (2002) คือใน 1 นาที จะมีน้ำไหลผ่าน 235.8 ลิตร จึงเลือกปั๊ม (KOJIMA รุ่น HFM-5B ขนาด 2 นิ้ว \times 1 HP, บริษัท นครินทร์กรุงเทพ จำกัด) เป็นปั๊ม หอยโข่งซึ่งมีราคาถูก และเลือกขนาดปั๊ม โดยเลือกจากกราฟประสิทธิภาพของปั๊ม โดยเลือกรุ่น HFM-5B ปริมาณอัตราการไหลสูงสุดที่ทำได้คือ 350 ลิตรต่อ นาที

2.2.2 แนวความคิดในการออกแบบระบบสเปรย์น้ำ

1) การเจาะรูของท่อน้ำ

การเจาะรูของท่อน้ำมีแนวคิดคือ ต้องการให้น้ำที่สเปรย์ออกมา มีพื้นที่สัมผัสกับข้าวโพดหวานมากที่สุด ดังนั้นจึงได้ เจาะรูขนาด 3 มิลลิเมตร 3 รูในระนาบเดียวกัน มีระยะห่าง ระหว่างรูเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.18 เจาะตามแนวยาวของท่อ เหมือนกันทุกท่อที่แฉงท่อสเปรย์น้ำด้านล่าง ยกเว้นท่อที่อยู่ริมสุดทั้ง 2 ท่อ จะเจาะเพียง 2 รูเท่านั้น

2) การต่อท่อของแฉงท่อสเปรย์น้ำ

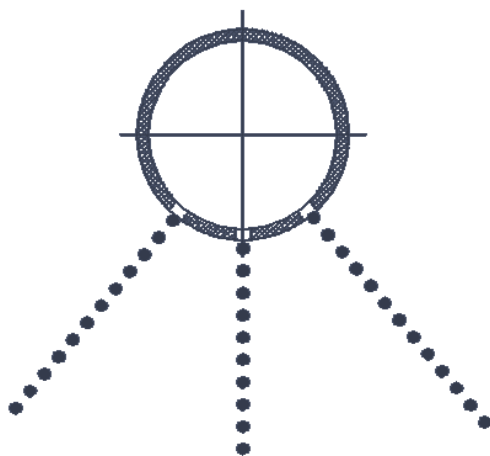
จากรูปที่ 2.19 น้ำเย็นจะถูกปล่อยลงมาโดยผ่านท่อเมนขนาด 2 นิ้ว ใส่ท่อลดจาก 2 นิ้ว เป็น 1.5 นิ้ว และแยกเป็น 2 ทางคือด้านซ้ายกับด้านขวาของถัง แต่ละข้างก็จะต่อท่อแยกไปอีก 3 ทาง ท่อหลัก 2 ทางนั้นก็ต่อเชื่อมกันเพื่อให้ น้ำมีความสม่ำเสมอ จากท่อทั้ง 6 ทางใส่ท่อลดอีกจาก 1.5 นิ้ว เป็น 1 นิ้ว และต่อเข้าแฉงสเปรย์น้ำด้านล่างดังรูปที่ 2.20 โดยมีทิศทางการไหลดังรูปที่ 2.21 และได้มีการทดสอบการสเปรย์น้ำจริงก่อนการติดตั้งดังรูปที่ 2.22

3) ถังเก็บน้ำเย็น

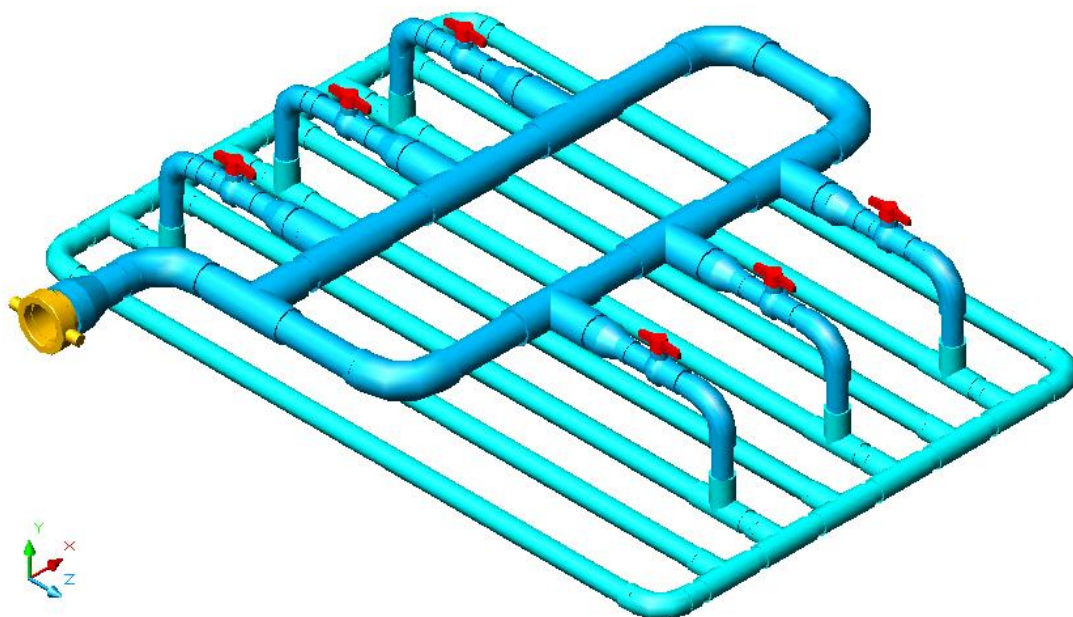
ถังเก็บน้ำเย็นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยมีตะแกรงพลาสติกกั้นน้ำแข็งบดไว้เพื่อป้องกันน้ำแข็งเข้าปั๊ม โดยจะใช้น้ำแข็งซอง ลักษณะของน้ำแข็งซองเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ มีขนาด $11 \times 22 \times 60$ นิ้ว น้ำหนักประมาณ 150 กิโลกรัมต่อก้อน เมื่อนำไปใช้จะต้องตัดให้เป็นก้อนขนาดเล็กหรือนำไปเข้าเครื่องโม่น้ำแข็ง โดย ด้านขวาของถังจะเป็นส่วนที่ใส่น้ำแข็งบดละเอียดและมีท่อส่งน้ำที่ผ่านการลดอุณหภูมิข้าวโพดหวาน มาแล้วกลับคืนให้กับระบบ ส่วนด้านซ้ายของถัง จะมีท่อดูดส่งน้ำไปเพื่อลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานหมุนเวียนกันเป็นระบบ ดังรูปที่ 2.23

4) ตัวกรอง

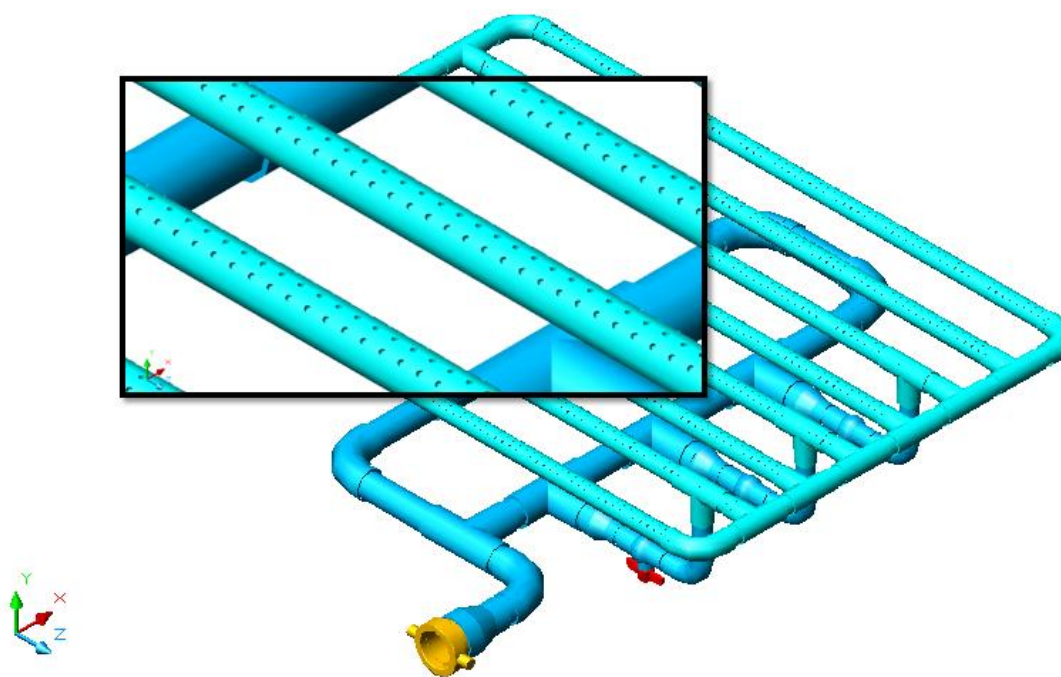
เป็นตะแกรงอะคริลิก 2 ชั้นคือ ชั้นนอกจะเป็นตะแกรงรูขนาด 10 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างรู 10 มิลลิเมตร ชั้นในจะเป็นตะแกรงรูขนาด 5 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างรู 10 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับ ชั้นนอก ภายในบรรจุด้วยไฮโพลีเอสเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่จับเอาเศษพืชหรือเศษดินออก ไม่ให้เข้าไปใน ปัม



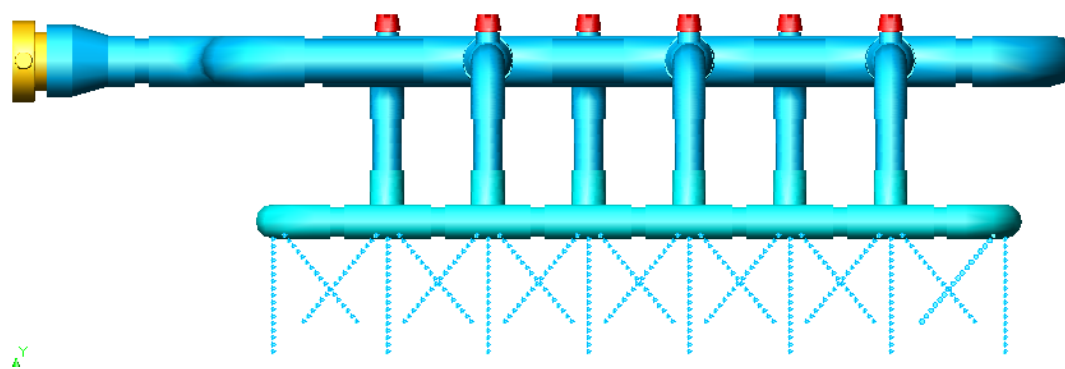
รูปที่ 2.18 การเจาะรูของท่อน้ำ



รูปที่ 2.19 แผงท่อสเปร์ย์น้ำด้านบนของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ



รูปที่ 2.20 แผงท่อสเปร์ย์น้ำด้านล่างของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ



รูปที่ 2.21 ทิศทางการสเปร์ย์น้ำของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

2.2.3 ระบบโดยรวมของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

จากรูป 2.24 ปุ่มหมายเลข 3 จะสูบน้ำจากถังเก็บน้ำเย็นหมายเลข 1 โดยมีวาล์วเปิด-ปิด หมายเลข 2 น้ำจากปุ่มหมายเลข 3 จะถูกส่งไปที่ถังสเปร์ย์น้ำหมายเลข 6 โดยผ่านท่อส่งหมายเลข 5 และมีท่อส่งน้ำกลับคืนถังเก็บน้ำเย็น โดยมีวาล์วเปิด-ปิด หมายเลข 4 ไว้ใช้ปรับอัตราการไหลได้ น้ำเมื่อผ่านการลดอุณหภูมิให้ ข้าวโพทหวาน แล้ว ปุ่มหมายเลข 8 จะสูบน้ำผ่านตัวกรองและผ่านท่อ

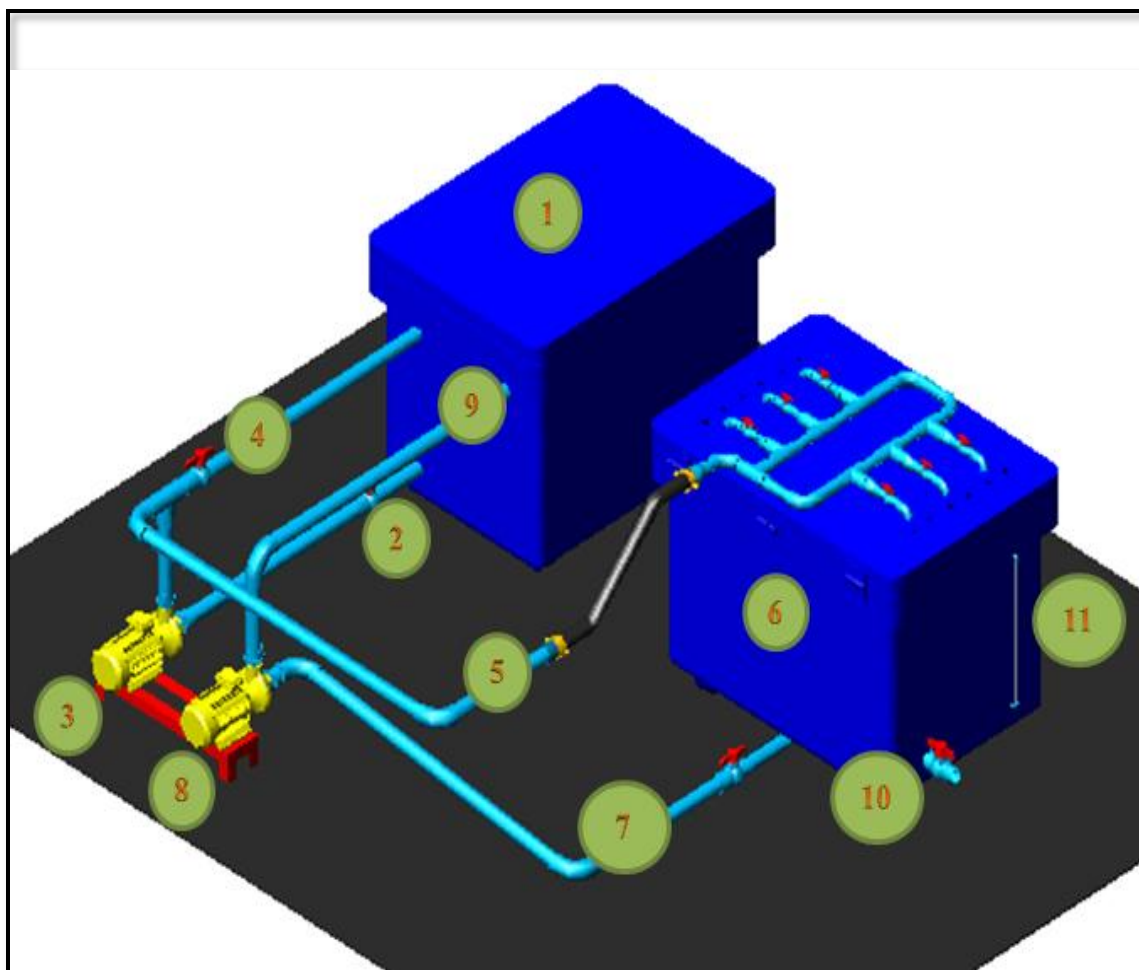
หมายเลข 7 และปล่อยน้ำคืนสู่ถังเก็บน้ำเย็นผ่านท่อส่งหมายเลข 9 ไหลเวียนแบบนี้เป็นระบบ แต่เมื่อน้ำแข็งละลายมากน้ำจะเกินในระบบ สังเกตที่อย่างหมายเลข 11 ถ้าน้ำเกินก็ปล่อยน้ำออกโดยวาล์วเปิด-ปิด หมายเลข 10 ซึ่งเครื่องลดอุณหภูมินี้มีรูปแบบการไหล 2 แบบ คือ แบบจุ่ม และสเปรย์ โดยมีอัตราการไหลสูงสุดที่ 350 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 2.22 การทดลองเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขณะสเปรย์น้ำ



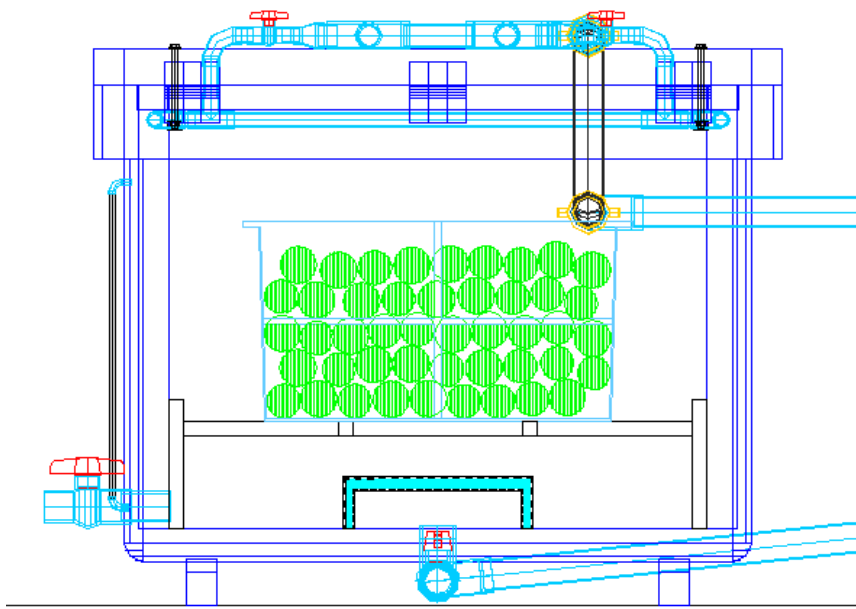
รูปที่ 2.23 ถังเก็บน้ำเย็นของการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ (ประมาณ 2 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 2.24 ระบบโดยรวมของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน

การทดสอบ สมรรถนะ เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ทำได้โดยนำ ข้าวโพดหวาน ใส่ใน ตะกร้าพลาสติกขนาด $365 \times 585 \times 325$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25 เปิดปั๊มทั้ง 2 ตัว เพื่อให้น้ำเย็นไหลเวียน กันในระบบเพื่อลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานจากประมาณ 28 องศาเซลเซียส จนใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำ (2 องศาเซลเซียส) ประมาณ 3 ชั่วโมง โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ล type K เชื่อมต่อกับ เครื่องบันทึก อุณหภูมิ (HIOKI 8422-51 MEMORY HI LOGGER, Japan) โดยวัดอุณหภูมิในส่วนของแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน บันทึกอุณหภูมิทุก 1 นาที ดังรูปที่ 2.26 โดยทำการทดสอบการไหลแบบ จุ่ม และสเปรย์ ความสามารถของเครื่องคือ 16 กิโลกรัมต่อ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 2.25 ภายในของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขณะลดอุณหภูมิข้าวโพดหวาน



รูปที่ 2.26 การวัดอุณหภูมิแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ลเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

2.3.1 อุณหภูมิของข้าวโพดหวานหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

2.3.1.1 วัสดุ

1) ข้าวโพดหวาน พันธุ์ ไฮบริด 3 ซึ่งนำมาจากไร่ในตอนเช้าจาก อำเภอสองพี่น้อง จังหวัด สุพรรณบุรี ขนส่งมายังห้องปฏิบัติการ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทำการทดลองทันที ซึ่งใช้ประมาณ 16 กิโลกรัม

2) น้ำและน้ำแข็ง

2.3.1.2 อุปกรณ์

1) เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

2) สายเทอร์โมคัปเปิล type K

3) ตะกร้าผลไม้

4) เข็ม

5) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (HIOKI 8422-51 MEMORY HI LOGGER, Japan) ดังรูป



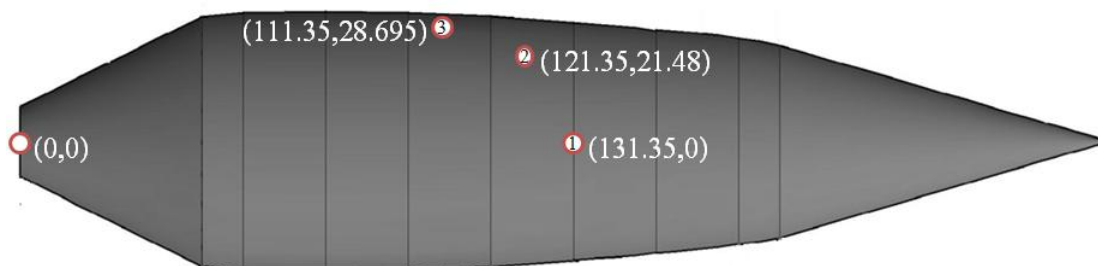
รูปที่ 2.27 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ที่มา : (HIOKI. 2000-2010)

2.3.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) เตรียมข้าวโพดหวาน โดยลอกเปลือกออกบางส่วน

2) เตรียมเครื่องลดอุณหภูมิด้วยน้ำ โดยใช้ น้ำแข็งเป็นตัวทำน้ำเย็น เปิดบ่มทิ้ง 2 ตัว เพื่อให้ น้ำกับน้ำแข็งเกิดการถ่ายเทความเย็นได้เร็วขึ้น และให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการที่ประมาณ 2 องศาเซลเซียส

3) เสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ล type K ที่เชื่อมต่อเครื่องบันทึกอุณหภูมิกับข้าวโพดหวานโดยใช้เข็มเสียบเข้าไปก่อนเพื่อให้เสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ลได้ง่ายขึ้น โดย 1 ฝักจะวัด 3 จุด ในส่วนของเปลือก เมล็ด และแกนดังรูป



รูปที่ 2.28 การวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งที่ 1 คือ แกน, 2 คือ เมล็ด และ 3 คือ เปลือก

4) ใส่ข้าวโพดหวานที่เสียบเทอร์โมคัปเปิ้ล ชั้นบน ชั้นกลาง ชั้นล่างของตะกร้า โดยใช้ข้าวโพดหวานจำนวนชั้นละ 3 ฝัก และใส่ข้าวโพดหวานที่ไม่ได้เสียบเทอร์โมคัปเปิ้ล ให้เต็มตะกร้า นำเข้าเครื่องลดอุณหภูมิด้วยน้ำ

5) ลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น ทั้งการไหลแบบจุ่ม และสเปรย์

2.3.2 การตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

การตรวจสอบคุณภาพนั้นทำโดยเปรียบเทียบคุณภาพก่อนและหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำทันที และหลังการเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

2.3.2.1 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของมวล

2.3.2.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OHAUSS รุ่น ARC 120 ขนาด 3000 กรัม)
- 2) ข้าวโพดหวาน จำนวน 10 ฝัก เหมือนกับข้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1

2.3.2.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) มวลของข้าวโพดหวานถูกวัดทันที ทั้งก่อน หลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ และหลังการเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

2) การเพิ่มขึ้นของมวลแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลเริ่มต้น โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของมวล} = \frac{\text{ความแตกต่างระหว่างมวลเริ่มต้นกับมวลสุดท้าย}}{\text{มวลเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.9)$$

2.3.2.2 เปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้น

2.3.2.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (SHIMADZU รุ่น BX300 ขนาด 300 กรัม ความละเอียด 0.001 กรัม)
- 2) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OHAUSS รุ่น ARC 120 ขนาด 3000 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม)
- 3) ตู้อบลมร้อน (memmert ช่วงอุณหภูมิการใช้งาน 30-210 องศาเซลเซียส ความละเอียด ± 1 องศาเซลเซียส)
- 4) โถคู่ความชื้น
- 5) ถาดแก้ว
- 6) ข้าวโพดหวาน จำนวน 10 ฟัก เหมือนกับ ซ้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1

2.3.2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) เปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวโพดหวาน ใช้เมล็ดเต็มเมล็ดแกะออกมาผสมกัน และแบ่งประมาณตัวอย่างละ 25 กรัม นำมาใส่ถาดแก้วและ อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ± 0.005 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และถูกนำไปเก็บไว้ในโถคู่ความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะวัดมวลด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งก่อนอบและหลังอบ เปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) ตามวิธีมาตรฐานคำนวณได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น(ฐานเปียก)} = \frac{\text{ความแตกต่างระหว่างมวลก่อนอบและหลังอบ}}{\text{มวลก่อนอบ}} \times 100 \quad (2.10)$$

2) เปอร์เซ็นต์ ความชื้นของเปลือกข้าวโพดหวาน ตัดเปลือกข้าวโพดหวานทั้งความหนา ออกเป็น 30×30 มิลลิเมตร 3 ตำแหน่ง คือตรงกลางฝักข้าวโพดหวาน 1 ตำแหน่ง ตรงกลางของฝักขวา และฝักซ้ายของฝักข้าวโพดหวาน อย่างละ 1 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 2.29 ให้ชื้นเปลือกทั้ง 3 ตำแหน่ง เป็น 1 ตัวอย่าง ตัดเปลือกแบบเดิมอีกฝักหนึ่งของข้าวโพดหวาน เป็นอีก 1 ตัวอย่าง รวมเป็นฝักละ 2 ตัวอย่างหาความชื้นด้วยวิธีเดียวกับเมล็ด

3) เปอร์เซ็นต์ความชื้นของแกนข้าวโพดหวาน หั่นแกนเป็นแว่นๆ หนา 3 มิลลิเมตร ตัวอย่าง ละ 5 ชิ้น หาความชื้นด้วยวิธีเดียวกับเมล็ด

4) เปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวโพดหวานทั้งฝัก คำนวณได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวโพดหวานทั้งฝัก} = \frac{(R_p \times M_p) + (R_s \times M_s) + (R_c \times M_c)}{100} \quad (2.11)$$

เมื่อ R_p คือ สัดส่วนเปลือก = (น้ำหนักเปลือก/น้ำหนักข้าวโพดทั้งฝัก) $\times 100$

R_s คือ สัดส่วนเมล็ด = (น้ำหนักเมล็ด/น้ำหนักข้าวโพดทั้งฝัก) $\times 100$

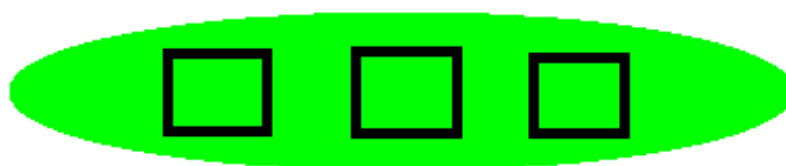
R_c คือ สัดส่วนแกน = (น้ำหนักแกน/น้ำหนักข้าวโพดทั้งฝัก) $\times 100$

M_p คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของเปลือก

M_s คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ด

M_c คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของแกน

โดยที่ชั่งน้ำหนักข้าวโพดหวานทั้งฝัก น้ำหนักข้าวโพดที่เปลือกเปลือก และแกนข้าวโพดหวาน นำน้ำหนักมาหักลบกันจะได้ น้ำหนักของเปลือกและเมล็ด



รูปที่ 2.29 การตัดเปลือกข้าวโพดหวานขนาด 30×30 มิลลิเมตร 3 ตำแหน่ง

2.3.2.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้

2.3.2.3.1 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) (กอกิมพงษ์. 2550)

เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อนำไปใช้แยกสารหรืออนุภาค โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความหนาแน่น ขนาดของสารหรืออนุภาคนั้นๆ โดยทั่วไป เครื่องหมุนเหวี่ยงมักใช้ในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง และใช้ปั่นแยกสาร สำหรับวิเคราะห์ มักจะใช้แยกตัวอย่างส่วนที่เป็นของแข็งออกจากตัวอย่างส่วนของเหลว หรือใช้เพื่อแยกของเหลวหลายๆชนิดที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันให้เกิดการแยกชั้น สำหรับการใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงนั้นก่อนใช้ควรทำการศึกษาจากคู่มือ และผู้เชี่ยวชาญก่อน เพื่อลดความผิดพลาดและเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งาน

1) หลักการทำงานของเครื่องหมุนเหวี่ยง

เครื่องหมุนเหวี่ยง เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับเร่งการตกตะกอนของอนุภาคที่ไม่ละลายออกจากของเหลว หรือใช้แยกของเหลวหลายๆ ชนิดที่มีความถ่วงจำเพาะต่างกันออกจากกัน โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge force) ที่เกิดจากการหมุนรอบจุดหมุน (center of rotation) เครื่องหมุนเหวี่ยงมีแกนหมุนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และทำให้แกนมอเตอร์หมุน ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที, rpm) ควบคุมด้วยวงจรไฟฟ้า ส่วนเวลาที่ใช้ในการหมุนควบคุมด้วย สวิตช์ปิด-เปิด หรือนาฬิกา

2) ความเร็วรอบและแรงหนีศูนย์กลาง

การแยกสารด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงต้องมีการกำหนดเวลา และแรงหนีศูนย์กลางสำหรับงานนั้นๆ เสมอ ซึ่งในบางครั้งจะพบว่า มีการกำหนดเป็นค่าความเร็วรอบของการหมุน โรเตอร์ ซึ่งอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานในกรณีที่ต้องการความถูกต้องของแรงหนีศูนย์กลาง แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ (Relative centrifugal force) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรัศมีการหมุนไม่เท่ากัน ดังนั้นการกำหนดวิธีการแยกสารด้วยค่าความเร็วรอบจึงไม่ใช่วิธีการที่เป็นมาตรฐาน ปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตจึงมักจะเตรียมตารางเทียบค่าทั้งสองที่ใช้กับโรเตอร์แต่ละชนิดของผู้ผลิตไว้แล้ว หรือผู้ใช้สามารถทำการคำนวณได้เอง โดยการใช้สมการ

$$RCF = 1.12r (RPM/1000)^2 \quad (2.12)$$

$$\text{หรือ} \quad RPM = 103(RCF/1.12r)^{0.5} \quad (2.13)$$

เมื่อ RCF คือ แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ หน่วยเป็น $\times g$

RPM คือ อัตราความเร็วรอบ (rpm)

r คือ รัศมีแกนหมุน (mm)

2.3.2.3.2 วัสดุอุปกรณ์

- 1) Refractometer แบบดิจิตอล (ATAGO รุ่น Pocket PAL – 1, Japan)
- 2) บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3) น้ำกลั่น
- 4) กระดาษทำความสะอาด
- 5) มีด
- 6) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Labnet รุ่น Spectrafuge 7M, USA)
- 7) เมล็ดข้าวโพดหวาน เหมือนกับข้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1

2.3.2.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของ ข้าวโพดหวาน ถูกวัดทันทีทั้งก่อน หลังการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำ และหลังการเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส
- 2) เอาเมล็ดเต็มเมล็ดประมาณ 150 กรัมแกะออกมาผสมกัน และปั่นเป็นเวลา 1 นาที และแยกสารที่ต่างกันด้วยแรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลางอีก 15 นาที ที่ 6000 รอบต่อนาที ($2540.16 \times g$) ดังรูป



รูปที่ 2.30 การแยกสารในเมล็ดข้าวโพดหวานที่ต่างกันด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง

3) เทสารที่อยู่ด้านบน 2-3 หยด ในช่องที่ใส่ตัวอย่างของ Refractometer แล้วอ่านค่าเปอร์เซ็นต์บริกซ์

4) จากนั้นเทตัวอย่างออกจาก Refractometer นิดล้างด้วยน้ำกลั่นและใช้กระดาษเช็ดให้แห้ง โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ

2.3.3 half cooling time และ 7/8 cooling time

เวลาในการลดอุณหภูมิได้ใช้สมการที่ดัดแปลงจาก Dincer (1999a,1999b) ซึ่งใช้สำหรับผลผลิตที่มีรูปร่างกลมอ้างอิงจาก Jain et.al (2005) ที่นำสมการที่ 2.7 และ 2.8 มาใช้กับการลดอุณหภูมิของปลาด้วยน้ำแข็ง การคำนวณ half cooling time และ 7/8 cooling time จะใช้ข้อมูลอุณหภูมิข้าวโพดหวานชุดเดียวกับหัวข้อ 2.3.1 แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และสร้างเส้นแนวโน้มแบบเอ็กโปเนนเชียล ได้รูปแบบสมการ คือ $\theta = J \exp(-Ct)$ นำค่า C และ J ที่ได้มาคำนวณค่า half cooling time และ 7/8 cooling time จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

2.4 การประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม

เมื่อสร้างเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแล้ว ก็จำเป็นต้องทราบว่าต้องลดอุณหภูมิของข้าวโพดหวานเป็นจำนวนเท่าไร จึงจะมีความคุ้มทุนซึ่งเรียกว่า “จุดคุ้มทุน” ซึ่งในการทดสอบเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ ใช้แรงงานในการปฏิบัติงาน 1 คน สามารถลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานได้เป็นจำนวน 1 ตะกร้าเฉลี่ยได้ 16 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 1.5 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง เมื่อกำหนดให้ใช้งานเครื่องวันละ 2 ครั้ง ปีละ 260 วัน สามารถประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาทต่อกิโลกรัม) และระยะเวลาคืนทุน ของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำได้ดังนี้

2.4.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน

2.4.1.1 ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost)

1) ค่าเสื่อมราคา (Depreciation, DP) คิดค่าเสื่อมราคา DP แบบ Straight-line method $DP=(P-S)/L$ โดยราคาของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ (P) เท่ากับ 50,000 บาท มูลค่าซากของเครื่องเมื่อสิ้นปีที่ 10 เหลือ 10% ของราคาเครื่อง

ดังนั้น มูลค่าซากของเครื่อง (S) $= (10/100)P = 5000$ บาท

$$\text{ค่าเสื่อมราคา DP} = (50000-5000)/10 = 4500 \text{ บาท}$$

2) ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (Interest or investment) คิดค่าเสียโอกาส

$$I = \frac{(P+S)}{2} \times \frac{i}{100} \text{ โดยที่กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยต่อปี(i) เท่ากับ 6.4397 \% ต่อปี}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่าเสียโอกาสต่อปี I} &= \frac{(P+S)}{2} \times \frac{6.4397}{100} \\ &= 1770.92 \text{ บาท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รวมต้นทุนคงที่ต่อปี (Fixed Cost)} &= \text{ค่าเสื่อมราคา (DP)} + \text{ค่าดอกเบี้ย (I)} \\ &= 6,270.92 \text{ บาทต่อปี} \end{aligned}$$

2.4.1.2 ต้นทุนแปรผัน (Variable Cost)

1) ค่าไฟฟ้า ใช้ปั๊มน้ำ 2 ตัว เพื่อให้ให้น้ำในเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ หมุนเวียนในระบบ สิ้นเปลืองพลังงาน 1,500 วัตต์ วันละ 12 ชั่วโมง ใน 1 ปี ทำงาน 260 วัน ค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.9780 บาท คิดเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ $(1,500 \times 12 \times 260 \times 2.9784) / 1000 = 13,937.04$ บาทต่อปี

2) ค่าน้ำแข็ง 300 บาท ต่อ 1 วัน ใน 1 ปี ทำงาน 260 วัน คิดเป็น $300 \times 260 = 78,000$ บาท ต่อปี

3) ค่าน้ำ 1,000 ลิตร ราคา 9.5 บาท ต่อ 1 วัน ใน 1 ปี ทำงาน 260 วัน วันละ 4 ครั้ง คิดเป็น $9.5 \times 260 \times 4 = 9,880$ บาทต่อปี

4) ค่าแรงงาน 1 คน วันละ 250 บาท ใน 1 ปี ทำงาน 260 วัน คิดเป็น $250 \times 260 = 6,5000$ บาทต่อปี

5) ค่าข้าวโพดหวานกิโลละ 7 บาท ใน 1 ปี ทำงาน 260 วัน วันละ 4 ครั้ง ครั้งละ 16 กิโลกรัม คิดเป็น $7 \times 260 \times 4 \times 16 = 116,480$ บาทต่อปี

6) ค่าน้ำยาล้างจาน 12 บาทต่อขวด ใช้จำนวน 10 ขวด ใน 1 ปี คิดเป็น $12 \times 10 = 120$ บาทต่อปี

รวมต้นทุนผันแปร = 283,417.04 บาทต่อปี

2.4.2 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกลงทุนในโครงการต่างๆต้องการทราบว่าจำนวนผลผลิตที่ผลิตแล้วคุ้มทุนควรเป็นเท่าไร เพื่อเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจ จุดคุ้มทุน (break-even point) คือจุดที่รายได้

เท่ากับรายจ่าย นั่นคือกำไรเป็นศูนย์ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน เป็นการวิเคราะห์ หามสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่างๆ

กำหนดให้	C	= ต้นทุนรวมในการผลิต
	F	= ต้นทุนคงที่ ($\frac{6,270.92}{260 \times 4} = 6.03$ บาท ต่อครั้ง)
	V	= ต้นทุนแปรผัน ($\frac{283,417.04}{260 \times 4} = 272.52$ บาท ต่อครั้ง)
	N*	= จำนวนที่ผลิตที่จุดคุ้มทุน
	N	= จำนวนการผลิตที่จุดใดๆ
	v	= ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย ($\frac{272.52}{16} = 17.03$ บาท ต่อหน่วย)
	R	= รายได้
	P	= ราคาขายต่อหน่วย (20 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม)

$$\text{ต้นทุนรวมในการผลิต } C = F + vN \quad (2.14)$$

$$V = vN \quad (2.15)$$

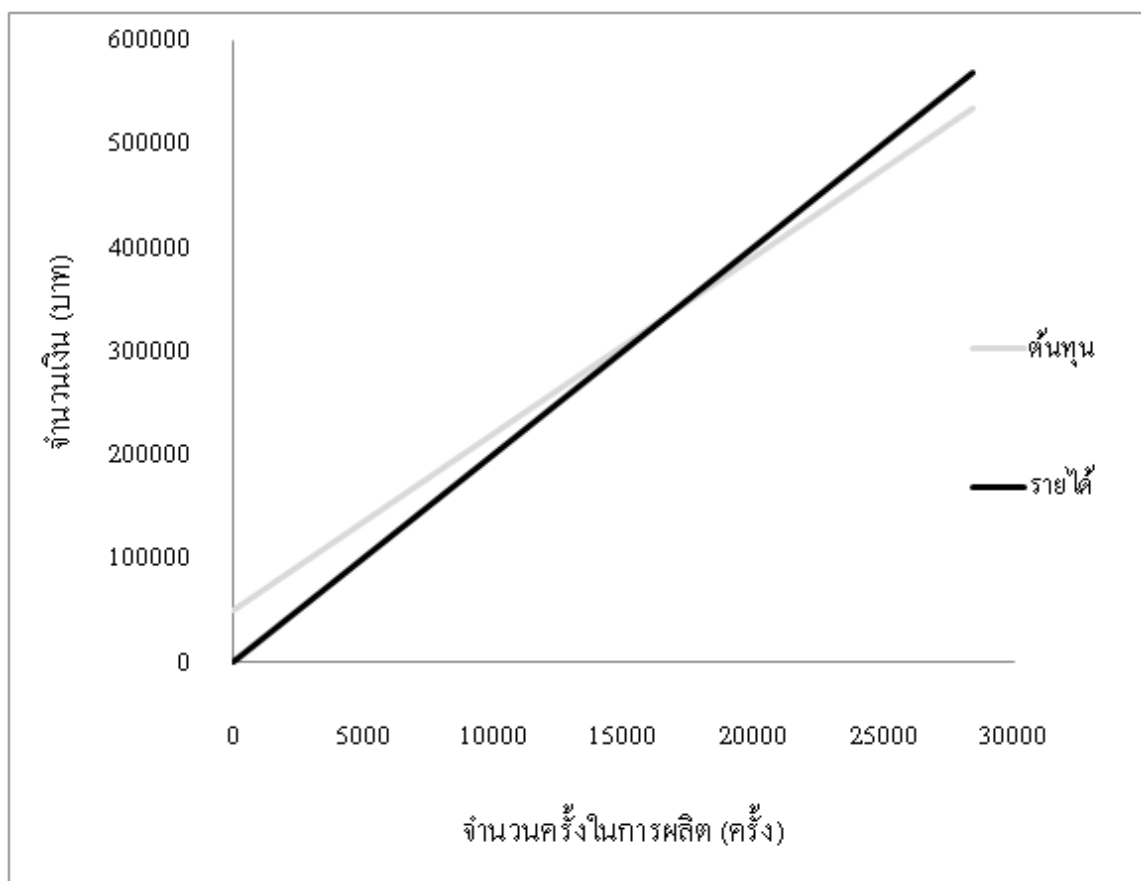
$$\text{จึงได้ว่า } C = F + vN \quad (2.16)$$

$$\text{รายได้ } R = pN \quad (2.17)$$

$$\text{และ } N^* = F / (p - v) \quad (2.18)$$

เมื่อ N^* เป็นปริมาณที่จุดผลิตคุ้มทุนพอดี แสดงได้ในรูปที่ 2.31

พิจารณาจุดตัดที่ได้จากการพล็อตกราฟ ของสมการ $C = F + vN$ และสมการ $R = pN$ จะได้ จุดตัดตรงที่บริเวณที่มีต้นทุนกับรายได้ที่เท่ากัน คือครั้งที่ 16,800 หรือที่ 16.15 ปี ซึ่งเรียกว่าจุดคุ้มทุน ดังนั้นจุดคุ้มทุนจึงเป็นจุดที่ต้องทำการลดอุณหภูมิของข้าวโพดหวานจำนวน 268,800 กิโลกรัม ซึ่งระยะเวลาในการคุ้มทุน อาจจะน้อยกว่านี้ได้ถ้าขายข้าวโพดหวานได้ในจำนวนที่มากขึ้น และราคาขายต่อกิโลกรัมเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.31 กราฟการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

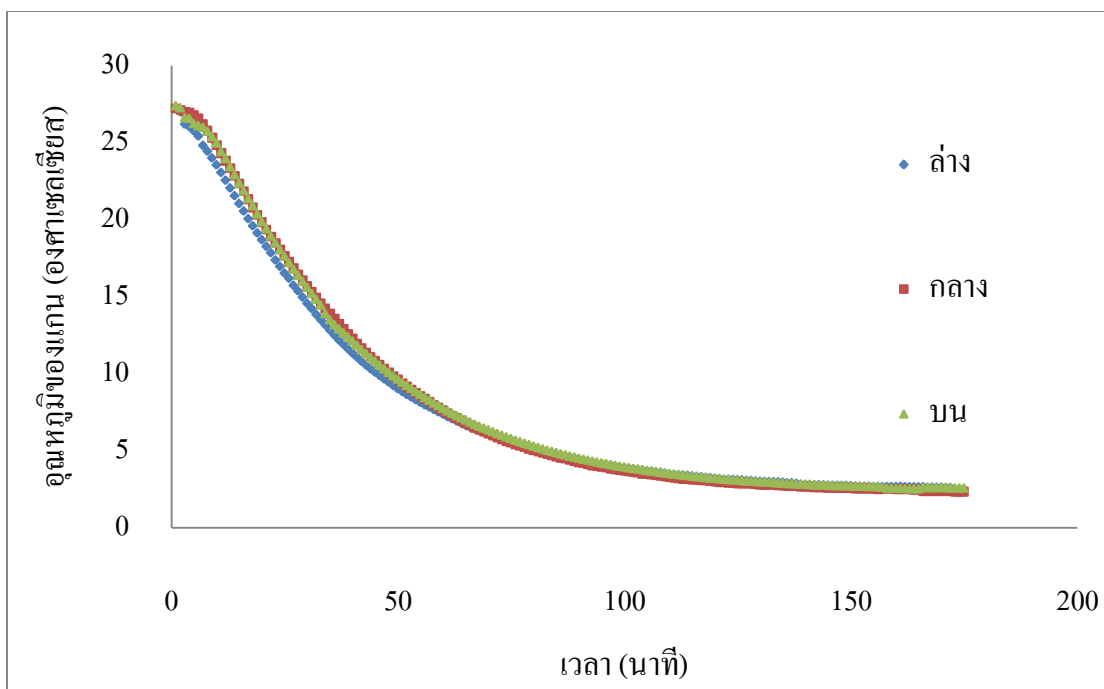
2.5 ผลการทดลอง

2.5.1 อุณหภูมิของข้าวโพดหวานหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

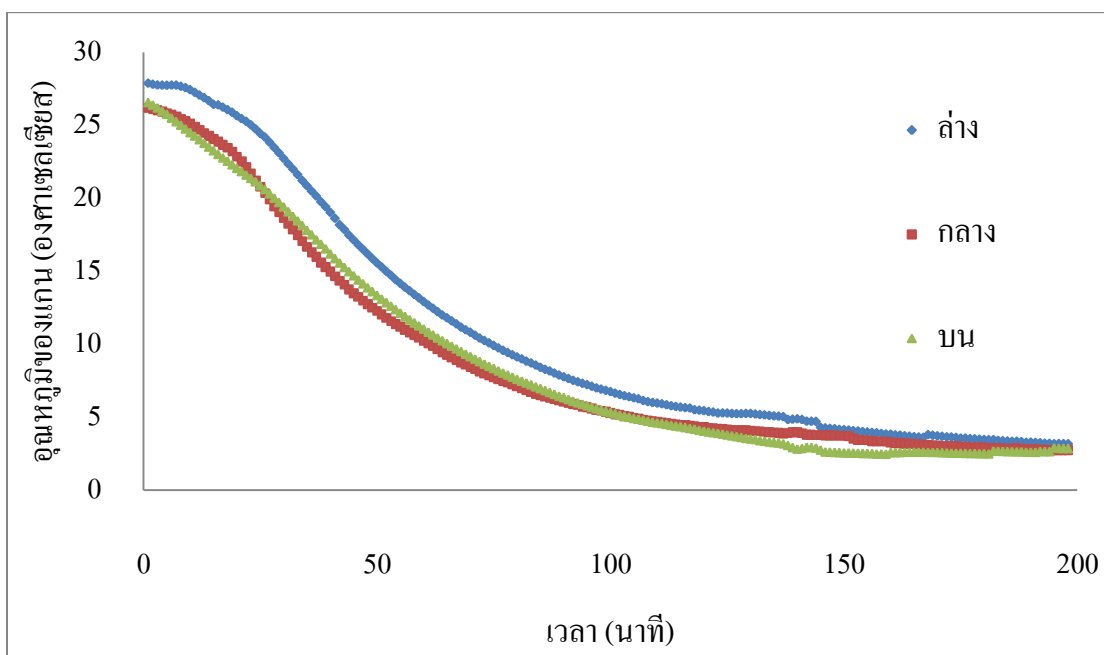
จากผลการทดลองการไหลแบบ จุ่ม จะมีการลดลงของอุณหภูมิที่เร็วกว่าการไหลแบบ สเปรย์ และในชั้นของตะกร้าคือ ชั้นบน ชั้นกลาง ชั้นล่าง นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันในส่วน of แกนและเมล็ด ยกเว้น ในส่วนของเปลือกนั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ ชั้นบนอุณหภูมิจะลดลงเร็วที่สุด รองลงมาคือชั้นกลาง และชั้นล่าง ตามลำดับ ส่วน การไหลแบบ สเปรย์ ในส่วนของแกนเมล็ด และเปลือก ชั้นบนและชั้นกลางนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันในส่วน of แกนและเมล็ด อุณหภูมิของชั้นบนและชั้นกลางลดลงเร็วกว่าชั้นล่างของตะกร้า ดังรูปที่ 2.32 ถึง 2.37

2.5.2 การตรวจสอบคุณภาพของข้าวโพดหวานหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

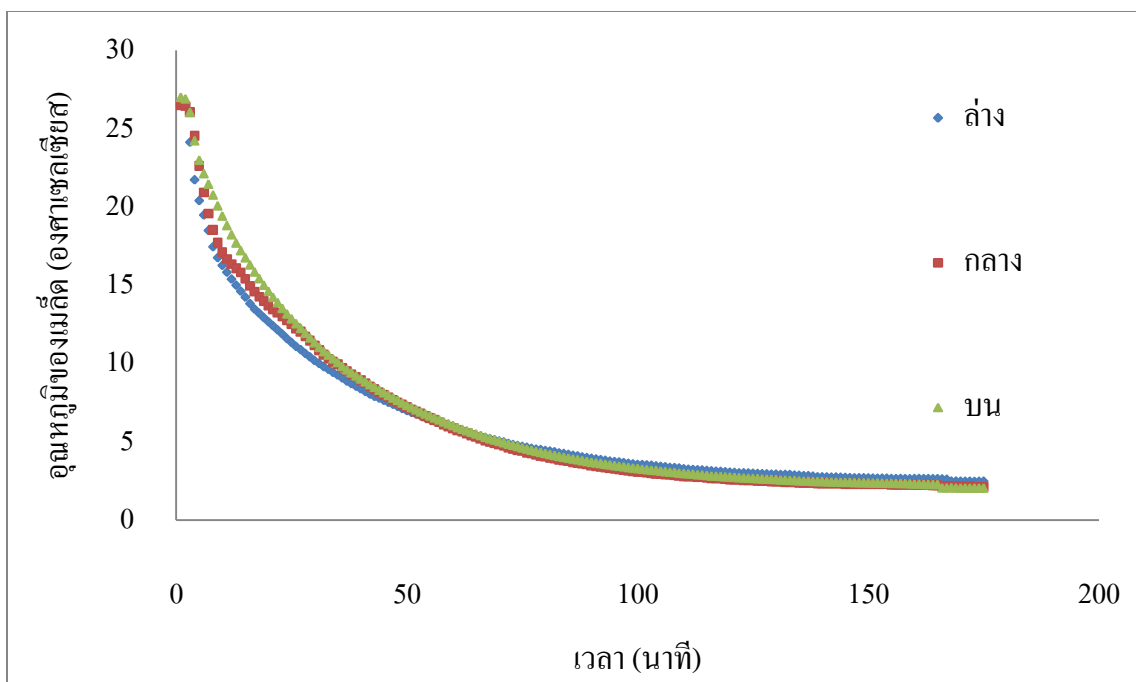
จากผลการทดลองพบว่าหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำทันทีและหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำแล้วเก็บรักษาไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส การไหลแบบจุ่มมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของมวลน้อยกว่าแบบสเปรย์ เป็นเพราะระยะเวลาในการลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานให้ใกล้เคียงน้ำเย็นนั้นการไหลแบบจุ่มใช้เวลาสั้นกว่าเพราะมีการสัมผัสกับน้ำได้ทั่วข้าวโพดหวานทั้งตะกร้าจึงลดอุณหภูมิได้เร็วทำให้ไม่ต้องแช่ในน้ำนาน และเมื่อนำ ข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นแล้วนำไปเก็บรักษาไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของมวลลดลงเล็กน้อย ส่วนตัวควบคุมจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของมวลถึง 1.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเปอร์เซ็นต์ความชื้นนั้นการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน การไหลแบบจุ่มอาจจะมากกว่าเล็กน้อยเท่านั้น เป็นเพราะคำนวณความชื้นของข้าวโพดหวานทั้งฝักโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความชื้นของทั้งเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวานมาคำนวณ เปอร์เซ็นต์ความชื้นของเปลือกที่การไหลแบบจุ่มจะมีมากกว่าแบบสเปรย์ ส่วนเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดและแกนนั้นใกล้เคียงกัน ทำให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นของการไหลแบบจุ่มมากกว่าแบบสเปรย์ และเมื่อนำข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นไปเก็บรักษาไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากขึ้นอาจเป็นเพราะคำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นของข้าวโพดหวานทั้งฝักโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความชื้นของทั้งเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวานมาคำนวณเช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น น้ำที่อยู่ในเปลือกหรือน้ำที่อยู่รอบข้าวโพดหวาน (ในถุงซิปลาสติก) อาจมีการซึมเข้าเมล็ดและแกน ทำให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นเพิ่มขึ้นทั้งการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ส่วนตัวควบคุมจะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงเล็กน้อยเพียง 0.92 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้นั้นการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ค่อนข้างใกล้เคียงกันหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นทันทีและเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้น้อยกว่าเป็นเพราะน้ำซึมเข้าไปในข้าวโพดหวาน แต่เมื่อนำข้าวโพดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นไปเก็บรักษาไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าการไหลแบบสเปรย์จะมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้มากที่สุดโดยค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับข้าวโพดหวานตอนเริ่มต้นทำการทดลอง ส่วนตัวควบคุมและการไหลแบบจุ่มจะใกล้เคียงกันคือมีการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ถึง 1.7-1.8 เปอร์เซ็นต์ บริกซ์ ผลการตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน แสดงในตารางที่ 2.7



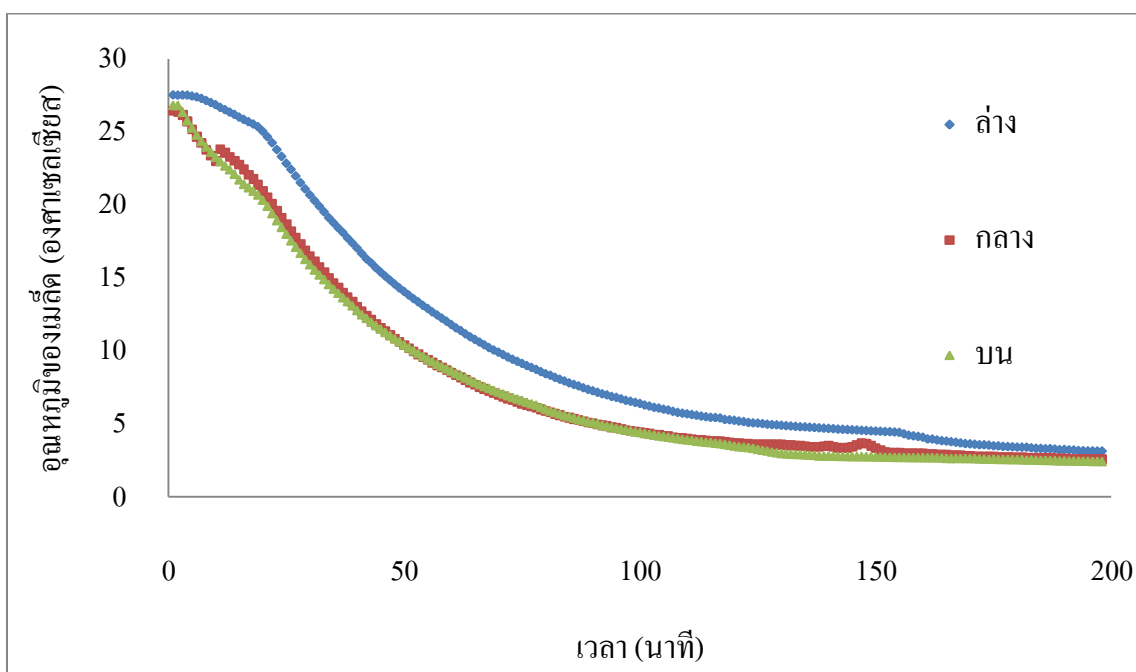
รูปที่ 2.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาที) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของการไหลแบบจุ่ม



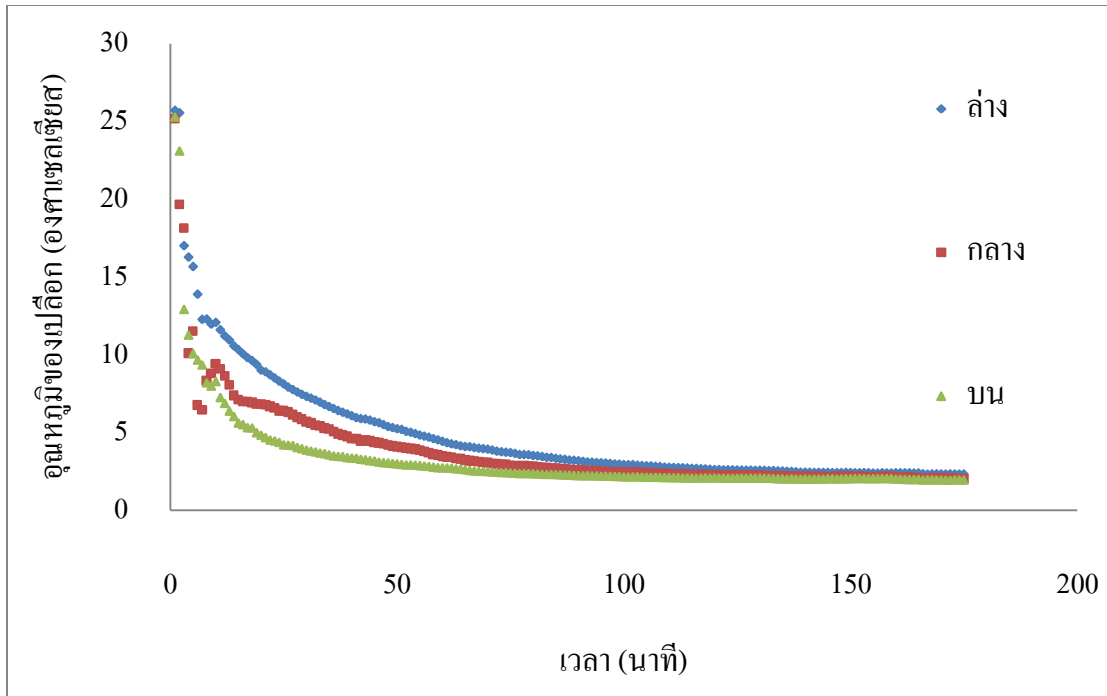
รูปที่ 2.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาที) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของการไหลแบบสเปรย์



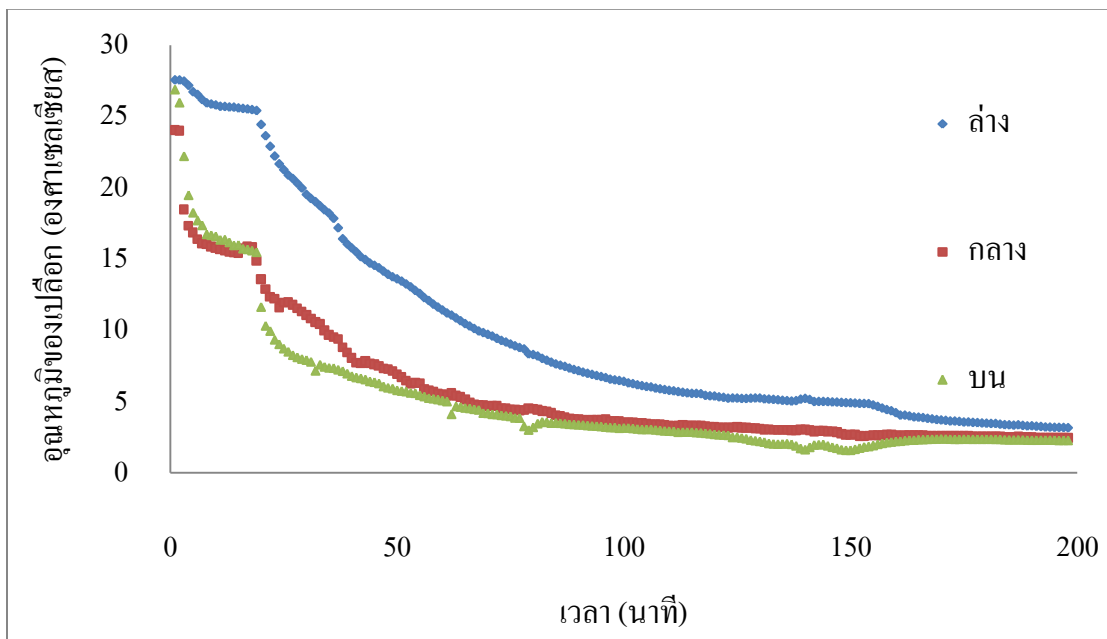
รูปที่ 2.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทื) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเมล็ดที่การไหลแบบจุ่ม



รูปที่ 2.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาทื) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของเมล็ดที่การไหลแบบสเปรย์



รูปที่ 2.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาที) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของการไหลแบบจุ่ม



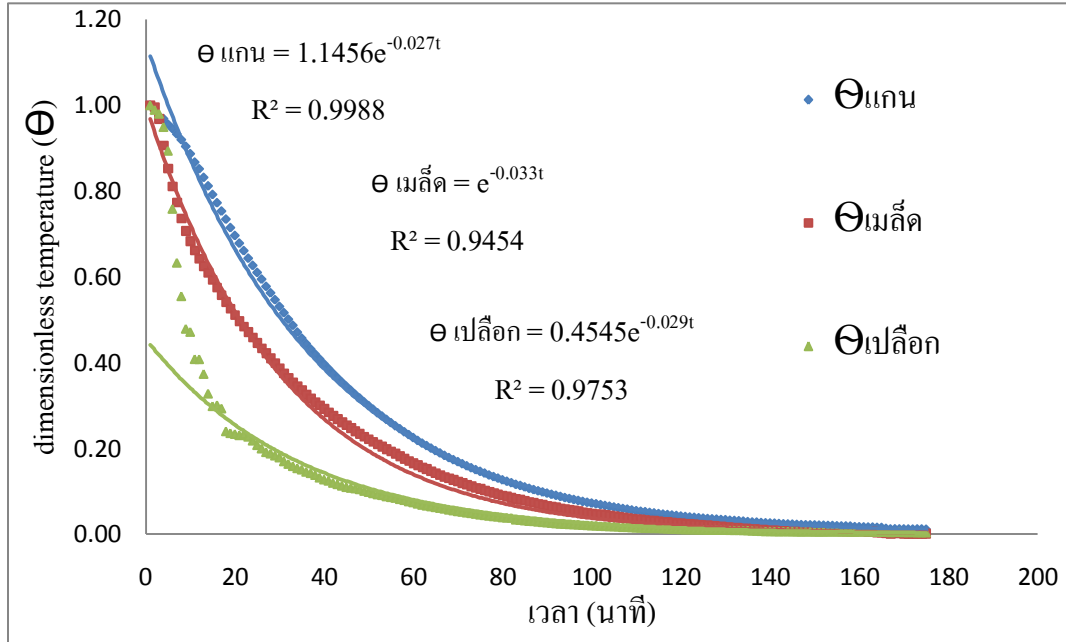
รูปที่ 2.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) กับเวลา (นาที) ในการลดอุณหภูมิ เบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของการไหลแบบสเปรย์

ตารางที่ 2.7 ผลการตรวจสอบคุณภาพหลังการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน

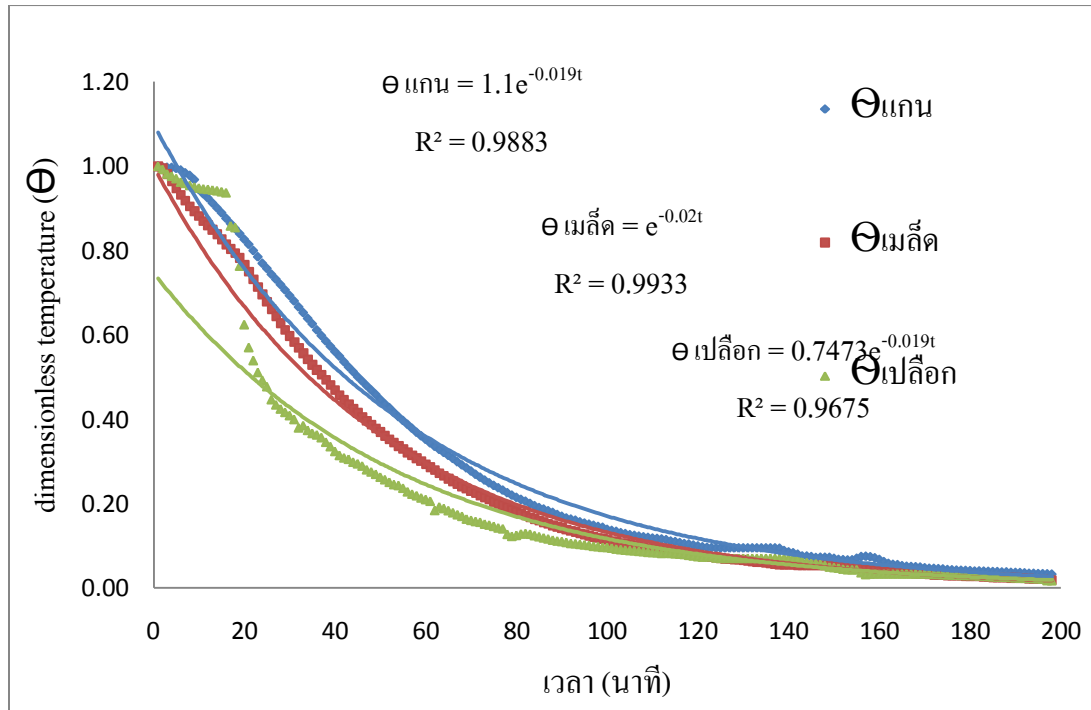
สถานะของการลดอุณหภูมิ		จำนวนตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของมวล	เปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้น	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้
ควบคุม		10	0.0	77.87±1.09	15.0±0.7
หลังลดอุณหภูมิทันที	จุ่ม	20	3.6±1.5	80.90±1.58	14.7±0.5
	สเปรย์	20	11.4±2.7	77.69±0.41	14.6±0.3
หลังลดอุณหภูมิและเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 °C	ควบคุม	10	-1.3±0.3	76.95±12.0	13.3±0.8
	จุ่ม	20	2.6±1.5	81.43±2.23	13.2±0.7
	สเปรย์	20	9.2±2.6	78.36±1.99	14.9±0.5

2.5.3 half cooling time และ 7/8 cooling time

จากผลการทดลอง ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ของแกนข้าวโพดหวาน สามารถลดลงจาก 28 ถึง 15 องศาเซลเซียส (half cooling time) ในเวลา 30.71 และ 41.50 นาที และจาก 28 ถึง 3.25 องศาเซลเซียส (7/8 cooling time) ในเวลา 82.05 และ 114.46 นาที สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ Vigneault et.al. (2006) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ แกนข้าวโพดหวานที่ติดกับเมล็ด สามารถลดลงจาก 24 ถึง 12 องศาเซลเซียส (half cooling time) ในเวลา 16 นาที และ 19.2 นาที สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าใช้เวลาน้อยกว่าเพราะวัสดุอุณหภูมิที่จุดแตกต่างกัน ที่คล้ายกันก็คือที่การไหลแบบจุ่มจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิมากกว่า ส่วนของ คณัยและนิธิยา (2535) ข้าวโพด โดยแต่ละฝักแยกกันจะใช้ half cooling time 20 นาที แต่ถ้าใส่ในถังไม้ซ้อนกัน 5 ฝัก จะใช้ half cooling time 28 นาที ซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ การไหลแบบจุ่ม ผลของ half cooling time และ 7/8 cooling time ของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน เมื่อลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ แสดงในตารางที่ 2.8 โดยคำนวณ half cooling time และ 7/8 cooling time จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลา ดังรูปที่ 2.38 และ 2.39



รูปที่ 2.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature (Θ) กับเวลาของข้าวโพดหวานที่
การไหลแบบจุ่ม



รูปที่ 2.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature (Θ) กับ เวลาของข้าวโพดหวานที่
การไหลแบบสเปรย์

ตารางที่ 2.8 half cooling time และ 7/8 cooling time ของข้าวโพดหวานเมื่อลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ

รูปแบบการไหลของน้ำ	half cooling time (นาที)			7/8 cooling time (นาที)		
	เปลือก	เมล็ด	แกน	เปลือก	เมล็ด	แกน
จุ่ม	3.29	21.00	30.71	44.51	63.01	82.05
สเปรย์	21.15	34.66	41.50	94.11	103.97	114.46

2.6 สรุปผลการทดลอง

จะเห็นได้ว่าสามารถ เครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำขนาดเล็ก ที่กลุ่มเกษตรกรรายย่อย สามารถนำไปใช้ได้ และข้าวโพดหวานยังคงคุณภาพ ทั้งความหวาน ความสด มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นทำให้ราคาขายต่อฝักมากขึ้นไปด้วย และสามารถลดอุณหภูมิข้าวโพดหวานทั้งตะกร้าได้ใกล้เคียงกันสำหรับไหลแบบจุ่มซึ่งการวางตำแหน่งในชั้นบน ชั้นกลาง และชั้นล่างของตะกร้า ไม่มีผลต่ออัตราการลดลงของอุณหภูมิ แต่สำหรับการไหลแบบสเปรย์นั้นชั้นบนจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่เร็วกว่าเพราะได้สัมผัสน้ำเย็นอย่างเต็มที่ อาจจะแก้ปัญหาโดยติดตั้งสเปรย์น้ำเย็นที่ด้านข้างและด้านล่างของเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้น

บทที่ 3

สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน

3.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1.1 สมบัติเชิงกายภาพ

สมบัติเชิงกายภาพที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางในแนวต่างๆ ความหนาของชั้นเปลือก เมล็ดและแกน ปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อ ความหนาแน่นเนื้อปรากฏ พื้นที่ผิว และเปอร์เซ็นต์ความชื้น(ฐานเปียก) ซึ่งได้มีผู้นำเอาสมบัติเชิงกายภาพไปใช้ในแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน คือ Jain and Pathare (2007) ศึกษาการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายอุณหภูมิของปลาในน้ำแข็ง โดยใช้สมบัติทางกายภาพคือ ปริมาตรของปลา วัดโดยใช้แทนที่น้ำ (Rahman, 1995) ความหนาแน่นของปลา คือ น้ำหนักหารด้วยปริมาตร และ พื้นที่ผิวของปลาหาโดยวิธี Simpson (Sastry, 1985) และสัดส่วนความชื้นของปลา เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายอุณหภูมิของปลาในน้ำแข็ง

3.1.2 สมบัติเชิงความร้อน

ในการออกแบบกระบวนการทางความร้อน และเครื่องมือหรืออุปกรณ์ ในกระบวนการทางความร้อน จะต้องทราบสมบัติเชิงความร้อน ของวัสดุ และวัสดุอื่นที่ใช้ในกระบวนการ ทางความร้อน การที่จะได้มาซึ่ง สมบัติเชิงความร้อนนั้น ต้อง อาศัยข้อมูลจาก ตำราและ การทำนาย จาก สมการทางคณิตศาสตร์ ที่มีผู้เคยศึกษาไว้ โดย กำหนดตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์กับ สมบัติเชิงความร้อน แล้วสร้างแบบจำลองขึ้นมา ซึ่งสมบัติเชิงความร้อนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) และค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p)

3.1.2.1 ค่าการนำความร้อน

การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุที่เป็นของแข็ง จากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอม ความร้อนจะเดินทางจากบริเวณที่มี อุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ วัสดุแต่ละชนิดจะนำความร้อนได้ต่างกัน โดยโลหะจะมีค่าการนำความร้อนสูง ส่วนอโลหะของโลหะ เซรามิก และวัสดุสารอินทรีย์ (ผลผลิตทางการเกษตร) จะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า ซึ่งค่าการนำความร้อน จะ

บอกได้ว่า ผลผลิตกันที่นั้น เป็นฉนวนหรือตัวนำความร้อน ค่าการนำความร้อน คือ อัตราการ ถ่ายเทความร้อนในวัสดุหนา 1 หน่วย ที่มีอุณหภูมิต่างกัน 1 องศาเซลเซียส ตามกฎของฟูเรียร์สามารถเขียนสมการ การนำความร้อนได้ดังสมการ

$$\frac{q}{A} = \frac{k(T_1 - T_2)}{z} \quad (3.1)$$

เมื่อ	q	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (w)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	k	คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot ^\circ C$)
	z	คือ ความหนาของวัสดุ (m)
	T_1 และ T_2	คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ ($^\circ C$)

3.1.2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อน

1) ความชื้น

ผลผลิตที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าผลผลิตที่มีปริมาณความชื้นต่ำ เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในผลผลิตนั้น มีค่าการนำความร้อนที่สูง ($0.6 W/m \cdot ^\circ C$) ได้มีผู้สร้างสมการของค่าการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้นไว้หลายท่านดังนี้

Sweat (1974) ทดลองวัดค่าการนำความร้อนของผักและผลไม้หลายชนิด (ความชื้นอยู่ในช่วง 65-95%) ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าค่าการนำความร้อนที่ได้มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับความชื้น ยกเว้นผลไม้ที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า ซึ่งเกิดจากช่องว่าง (Void space) ภายใน แล้วเสนอแบบจำลองทำนายค่าการนำความร้อนจากความชื้นด้วยสมการเส้นตรง (สมการที่ 3.2) และแนะนำว่าควรเพิ่มปัจจัยอุณหภูมิในสมการเพื่อให้ทำนายได้ดีขึ้นด้วย

$$k = C_1 + C_2 M \quad (3.2)$$

เมื่อ M คือสัดส่วนความชื้น

Vagenas et.al. (1990) ศึกษาค่าการนำความร้อนของอุ้งและลูกเกิดในช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น (ฐานเปียก) 14-80 % พบว่าค่าการนำความร้อน ขึ้นอยู่กับความชื้น แต่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 39-51 องศาเซลเซียส และความพรุน 0.37-0.49 เป็นเพราะช่วงอุณหภูมิและความพรุนที่ศึกษาค่อนข้างแคบ ทำให้ไม่เห็นผลจากปัจจัยดังกล่าว และได้สมการทำนายค่าการนำความร้อนเช่นเดียวกับ Sweat (1974) ในสมการ 3.2

Wang and Brennan (1992) ศึกษาค่าการนำความร้อนของมันฝรั่งที่มีความชื้นต่างกัน เนื่องจากอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส โดยมันฝรั่งสดมีความชื้น 82.1% พบว่าความชื้นมีผลต่อค่าการนำความร้อนคือ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิช่วง 40-70 องศาเซลเซียส ส่งผลกระทบต่อค่าการนำความร้อนเพียงเล็กน้อย และแสดงสมการทางคณิตศาสตร์ทำนายค่าการนำความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น ได้ดังสมการ

$$k = 0.271 + 0.308 \log M \quad (3.3)$$

Wang and Brennan (1993) ศึกษาผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำความร้อนของมันฝรั่งในช่วงสัดส่วนความชื้นอยู่ในช่วง 0-4.13 (กรัมของน้ำ/กรัมของแข็ง) และที่อุณหภูมิ 40-70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการนำความร้อนของมันฝรั่งขึ้นกับความชื้นแต่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษา ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความชื้นที่แสดงด้วยสมการ เซมิลอการิทึมมิค (semi-logarithmic) ดังสมการ

$$k = C_1 + C_2 \log (M) \quad (3.4)$$

Rapusas and Driscoll (1995) ศึกษาค่าการนำความร้อนของหัวหอมใหญ่หั่นบางสดและอบแห้ง พบว่าค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงตามความชื้นอย่างเป็นเส้นตรง โดยไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิในช่วง 30.7-33 องศาเซลเซียส และความพรุน 0.09-0.27 และได้สมการทำนายค่าการนำความร้อนเช่นเดียวกับ Wang and Brennan (1993) ในสมการ 3.4

Singh and Goswami (2005) ศึกษาเกี่ยวกับ สมบัติเชิงความร้อนของเมล็ดยี่ห่วยที่อุณหภูมิและความชื้นต่างกัน เพื่อให้ทราบว่าสมบัติเชิงความร้อนของเมล็ดยี่ห่วยเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกับความชื้น

2) อุณหภูมิ

สภาพการนำความร้อนหรือการถ่ายเทพลังงานความร้อนจะแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิต่างกัน ดังนั้นการทราบค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆจึงมีความจำเป็นในการนำไปใช้ประโยชน์ (Mohsenin, 1980) ได้มีผู้สร้างสมการของค่าการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิไว้หลายท่าน ดังนี้

Ramaswamy and Tung (1981) ศึกษาการนำความร้อนของแอปเปิ้ลที่มีความชื้นร้อยละ 85.8 ในช่วงอุณหภูมิ - 25 ถึง 25 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และแบ่งช่วงของค่าการนำความร้อนได้ 2 ช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งและช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยค่าการนำความร้อนของแอปเปิ้ลที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของแอปเปิ้ลที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง เขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและอุณหภูมิได้ดังนี้

$$k = 0.394 + 0.00212T \quad ; T > T_f \quad (3.5)$$

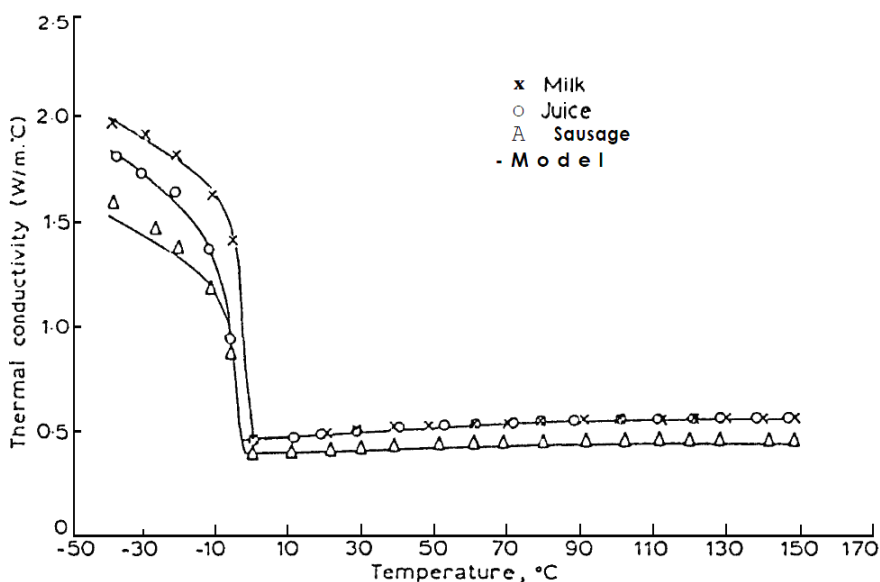
$$k = 1.294 + 0.0095T \quad ; T \leq T_f \quad (3.6)$$

Choi and Okos (1986) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของนม น้ำผลไม้ และไส้กรอก โดยใช้อุปกรณ์วัดแบบขดลวดความร้อน จากผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่าค่าการนำความร้อนของอาหารทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน และที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ค่าการนำความร้อนของอาหารมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งประมาณ 4 เท่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งขององค์ประกอบต่างๆในอาหาร

Califano and Calvelo (1991) ศึกษาผลของอุณหภูมิช่วง 50-100 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อมันฝรั่ง โดยการจุ่มมันฝรั่งรูปทรงกระบอก ลงในอ่างน้ำมันที่ควบคุมอุณหภูมิ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบ เปรียบเทียบกับทองแดงทรงกระบอกที่ทราบคุณสมบัติทางความร้อน มันฝรั่งที่ใช้มีความชื้น 85% ความหนาแน่น 1070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตัวอย่างจาก 50 เป็น 100 องศาเซลเซียสค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.545 เป็น 0.957 W/m²·°C โดยที่

ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่าการนำความร้อนเป็นแบบโพลีโนเมียล เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$k = 1.05 - 1.96 \times 10^{-2}T + 1.90 \times 10^{-4}T^2 \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.1 ค่าการนำความร้อนของนม น้ำผลไม้ และไส้กรอกที่อุณหภูมิต่างๆ ที่มา : (Choi and Okos, 1986)

Zainal et.al. (2000) ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำความร้อนของน้ำฝรั่งสีชมพู ที่ความเข้มข้น 9 และ 11 องศาบริกซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 65-85 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ค่าการนำความร้อนของน้ำฝรั่งลดลงเล็กน้อย คือ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยได้สมการจากการวิเคราะห์แบบถดถอย ดังนี้

$$k = 0.522 - 0.00002T \quad (9^\circ \text{Brix}) \quad (3.8)$$

$$k = 0.512 - 0.00002T \quad (11^\circ \text{Brix}) \quad (3.9)$$

3) องค์ประกอบทางเคมี

ผลผลิต แต่ละชนิดย่อมมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าการนำความร้อนนั้นแตกต่างกัน นอกจากความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนมากที่สุดแล้ว ยังมีองค์ประกอบ

ทางเคมีอื่นๆด้วย เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้า Heldman and Singh (1961) ได้สร้างสมการของค่าการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับองค์ประกอบทางเคมีไว้ดังนี้

$$k = aX_w + bX_p + cX_c + dX_f + eX_a \quad (3.10)$$

เมื่อ a, b, c, d และ e คือ ค่าคงที่
 X_w, X_p, X_c, X_f และ X_a คือ สัดส่วนมวลของน้ำ, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมันและเถ้า ตามลำดับ

4) ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของผลผลิต เช่น ความหนาแน่น จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อน้ำในผลผลิตระเหยออกมาจะทำให้ลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนไป ความพรุนจะมากขึ้น ความหนาแน่นจะลดลง ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนไปด้วย โดยใน ผลผลิตแต่ละ ชนิด มีลักษณะ ทางกายภาพ ที่ต่างกัน ผลผลิตที่มีความหนาแน่นน้อยหรือมีความพรุนมาก (หมายถึงมีอากาศแทรกอยู่ภายในมากซึ่งอากาศมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ค่าการนำความร้อนของอากาศเท่ากับ $0.025 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) ย่อมมีช่องว่างภายในอยู่มาก ค่าการนำความร้อนจึงควรต่ำกว่า ผลผลิตที่มีความหนาแน่นมากกว่าหรือมีความพรุนน้อยกว่า (Stanby. 1963) ซึ่งได้มีผู้ศึกษาค่าการนำความร้อนที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพไว้ดังนี้

Kustermann Scherer and Kutzbach (1981) ศึกษาการนำความร้อนของเมล็ดข้าวโพด (shell corn) ทั้งแบบเมล็ดเดี่ยวและแบบกลุ่ม โดยสังเกตผลของความชื้น อุณหภูมิและความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ที่มีต่อค่าการนำความร้อน จากการทดลองพบว่า ข้าวโพดแบบเมล็ดเดี่ยวที่มีความชื้นร้อยละ 8-45 ในช่วงอุณหภูมิ 5-45 องศาเซลเซียส มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.13-0.40 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเช่นกัน แต่ผลของอุณหภูมิมีน้อยมากจนไม่ต้องคำนึงถึงก็ได้ ส่วนเมล็ดข้าวโพดหวาน แบบกลุ่ม ที่มีความชื้นร้อยละ 2-40 ในช่วงอุณหภูมิ 22-45 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นโดยรวม $620-720 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ พบว่าผลของความชื้นและอุณหภูมิลักษณะเช่นเดียวกันกับเมล็ดข้าวโพดแบบเมล็ดเดี่ยว ผลของความพรุนมีมากกว่าผลของอุณหภูมิ และค่าการนำความร้อนของเมล็ด ข้าวโพดแบบกลุ่มน้อยกว่าแบบเมล็ดเดี่ยว เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเมล็ดซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ ทำให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าค่าการนำความร้อนของเมล็ดแบบกลุ่ม

Chang (1986) ศึกษาค่าการนำความร้อนของข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าวฟ่าง จากผลกระทบของความหนาแน่นโดยรวม และความชื้น ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นอยู่ในช่วง 10-18 % และความหนาแน่นอยู่ในช่วง 750-850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าการนำความร้อนของข้าวสาลีประเภท soft wheat อยู่ในช่วง 0.167-0.190 W/m²°C ข้าวสาลีประเภท hard wheat อยู่ในช่วง 0.181-0.202 W/m²°C ข้าวโพดอยู่ในช่วง 0.162-0.186 W/m²°C และข้าวฟ่างอยู่ในช่วง 0.160-0.184 W/m²°C ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นต่อค่าการนำความร้อนของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

Vagenas et.al. (1990) พัฒนาสมการทำนายค่าการนำความร้อนของผักผลไม้และธัญญาหาร โดยใช้ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงด้วยวิธี Regression เสนอสมการที่ได้จากการทดลองที่เป็นสมการเส้นตรงกับความชื้น (X_w) อุณหภูมิ(T) และความหนาแน่นโดยรวม (ρ_b) สำหรับพวกธัญญาหาร แสดงดังสมการ

$$k = C_1 + C_2T + C_3X_w + C_4\rho_b \quad ; \text{ธัญญาหาร} \quad (3.11)$$

$$k = C_1 + C_2T + C_3X_w \quad ; \text{ผักผลไม้} \quad (3.12)$$

Rahman (1992) ศึกษาค่าการนำความร้อนของอาหาร 4 ชนิด คือ เนื้อ แอปเปิ้ล มันฝรั่ง และปลาหมึก ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการอบแห้ง โดยให้ค่าการนำความร้อนของอาหารขึ้นอยู่กับความพรุนและความชื้นของอาหาร โดยได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่าการนำความร้อนของอาหารระหว่างการอบแห้ง คือ

$$(K_d / K_o)(1/1 - \varepsilon) = 1.82 - 1.66 \exp(-0.85)(X_w / X_{wo}) \quad (3.13)$$

- เมื่อ
- K_o คือ ค่าการนำความร้อนของอาหารก่อนการทำแห้ง (W/m²°C)
 - K_d คือ ค่าการนำความร้อนของอาหารระหว่างการทำแห้ง (W/m²°C)
 - X_{wo} คือ ปริมาณความชื้นของอาหารก่อนการทำแห้ง
 - X_w คือ ปริมาณความชื้นของอาหารระหว่างการทำแห้ง
 - ε คือ ความพรุนของอาหาร

งานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนมีหลายปัจจัย ทั้งจากตัวผลผลิตเองและสภาพแวดล้อม ที่ระดับอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด จากตัวผลผลิต คือความชื้น รองลงมา คือ องค์ประกอบทางเคมี และ ลักษณะทางกายภาพ เป็นต้น จากสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิ ผลผลิตกลุ่มผัก ผลไม้และเนื้อสัตว์ จะมีผลกระทบในทิศทางเดียวกัน มากน้อยต่างกันตามชนิดของผลผลิตเอง

3.1.2.1.2 Line Heat Source Probe Method (ทัศนัย, นริศ และณัฐ. 2550)

ในปัจจุบันเครื่องวัดค่าการนำความร้อนมีอยู่หลายชนิด เครื่องวัดที่เป็นที่นิยมแบ่งตามเทคนิคการวัดคือ แบบสภาวะคงที่ (steady state) ได้แก่ guard hot plate, heat flux meter (ASTM C 518. 2004) และแบบสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) ได้แก่ ขดลวดความร้อน (hot wire probe) (ASTM D 5334. 2004) เครื่องวัดแต่ละเครื่องมีข้อจำกัดต่างกัน ข้อดีที่เห็นได้ชัดของเครื่องมือวัดแบบขดลวดความร้อนคือ ใช้เวลาในการวัดน้อยเมื่อเทียบกับแบบอื่น สามารถพกพาได้ มีให้เลือกหลายแบบซึ่งออกแบบมาเพื่อให้สะดวกในการวัดค่าตามลักษณะงาน นอกจากนี้ยังไม่จำกัดขนาดของวัสดุที่ใช้วัดและสามารถใช้กับวัสดุได้หลายประเภทอีกด้วย

Thermal conductivity Probe ภายนอกเป็นเข็มสแตนเลส ภายในประกอบด้วยขดลวดให้ความร้อน (evanohm heater) และ เทอร์มิสเตอร์ (thermister : ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับอาร์ทีดี) ค่าการนำความร้อนของวัสดุจะหาได้จากทำการเสียบเข็มสแตนเลสเข้าไปในวัสดุ และให้พลังงานกับขดลวดความร้อน และตรวจสอบการเพิ่มของอุณหภูมิกับเทอร์มิสเตอร์ โดยที่คำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่ให้กับขดลวดความร้อนและความชันของ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของขดลวดความร้อนกับ ลอการิทึม ของเวลา ซึ่งใช้ช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงขึ้น 1 ถึง 2 นาที ระหว่างช่วงที่ ให้พลังงานกับขดลวดความร้อน การหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยอาศัยทฤษฎีแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวดเป็นตัวให้ความร้อนที่มีความยาวมากๆ ได้ถูกนำเสนอโดย Caslaw และ Jaeger (1964) ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. ลวดให้ความร้อนมีความยาวมากๆ เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด และไม่มีการหดตัวหรือคลายตัว หรือเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ใช้งาน
2. ลักษณะของตัวอย่างที่นำมาวัดต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และมีขนาดใหญ่จากหลักการและข้อสมมติฐานดังกล่าว สามารถหาค่าการนำความร้อนได้จากสมการ

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4 \pi k} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3.14)$$

$$k = \frac{Q}{4 \pi k} \left[\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) / T_2 - T_1 \right] \quad (3.15)$$

เมื่อ	Q	คือ อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดต่อความยาวของหัววัด (W/m)
	T ₁	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการให้ความร้อน (°C)
	T ₂	คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการให้ความร้อน (°C)
	t ₁	คือ เวลาเริ่มต้นในการวัดอุณหภูมิ (s)
	t ₂	คือ เวลาสุดท้ายในการวัดอุณหภูมิ (s)

จาก $Q = I^2 R$ ได้เป็นสมการ

$$k = \frac{I^2 R}{4 \pi (\text{slope})} \quad (3.16)$$

เมื่อ	slope	คือ ความชันของสมการเส้นตรงในสมการที่ (3.21) มีค่าเท่ากับ $\left[T_2 - T_1 / \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right]$
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (A)
	R	คือ ความต้านทานของขดลวด (Ω)

3.1.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะนี้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวิเคราะห์ กระบวนการ ทางความร้อนของ ผลผลิต หรือการออกแบบอุปกรณ์เครื่องมือในอุตสาหกรรม ค่าความร้อนจำเพาะ นี้จัดเป็นสมบัติเชิง ความร้อนของวัสดุ โดยเป็นฟังก์ชันของความถี่ องค์ประกอบ ทางเคมี และ อุณหภูมิ ค่าความร้อน จำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในอาหารสูงขึ้น สำหรับแก๊ส ค่าความร้อนจำเพาะที่ความถี่คงตัวให้ สัญลักษณ์เป็น C_p จะมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนจำเพาะที่ระดับปริมาตรคงตัวให้สัญลักษณ์เป็น C_v ส่วน ในทางด้านอาหารจะใช้ C_p มากกว่า C_v เนื่องจากถือว่าความถี่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ยกเว้นใน กระบวนการที่ใช้ความถี่สูงๆ (มณฑล. 2553) นิยามของค่าความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ ทำให้วัสดุที่มีมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ

หรือปริมาณความร้อนที่วัสดุสะสมไว้ สามารถเขียนสมการความร้อนจำเพาะได้ดังสมการ (Califano and Calvelo. 1991)

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (3.17)$$

เมื่อ	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·°C)
	Q	คือ ปริมาณความร้อน(kJ)
	m	คือ มวล (kg)
	T	คือ อุณหภูมิ (°C)

3.1.2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ

1) ความชื้น

ปริมาณความชื้นนั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความร้อนจำเพาะ ดังนั้นสมการส่วนใหญ่จึงแสดงค่าความร้อนจำเพาะให้เป็นฟังก์ชันกับปริมาณ ความชื้น หนึ่งในสมการที่ใช้ในการคำนวณหา ค่าความร้อนจำเพาะ ยกตัวอย่างจากการนำเสนอของ Siebel (1982) ดังสมการ

$$C_p = 0.837 + 3.349 M \quad (3.18)$$

2) องค์ประกอบทางเคมี

ผลผลิตแต่ละชนิดย่อมมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้ค่า ความร้อนจำเพาะ นั้นแตกต่างกัน นอกจากความชื้นซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนมากที่สุดแล้ว ยังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆด้วย เช่น Charm (1978) ศึกษาสมการค่าความร้อนจำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับองค์ประกอบทางเคมีดังสมการที่ 3.19 เมื่อค่า X คือ สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบทางเคมี ตัวห้อย f แทนไขมัน, s แทนด้วยของแข็งปราศจากมันเนย (non-fat solids) และ w คือน้ำ ในเทอมทางขวามือตัวเลขสัมประสิทธิ์คือค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบ ทางเคมีของผลผลิต ตามลำดับ ค่า 4.187 เป็นค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และ 2.093 ก็เป็นค่าความร้อนจำเพาะของไขมัน

$$C_p = 2.093X_f + 1.256X_s + 4.187X_w \quad (3.19)$$

Heldman and Singh (1981) ศึกษาสมการค่าความร้อนจำเพาะที่ครอบคลุมองค์ประกอบทางเคมีดังสมการที่ 3.20 เมื่อให้ X เป็นสัดส่วนโดยมวล และสัญลักษณ์ตัวห้อยต่างๆ ทางเทอมขวามือ คือ c , p , f , a และ w แทนคาร์โบไฮเดรต, โปรตีน, ไขมัน, เถ้า และน้ำ ตามลำดับ

$$C_p = 1.424X_c + 1.549X_p + 1.675X_f + 0.875X_a + 4.187X_w \quad (3.20)$$

3) อุณหภูมิ

จากสมการที่นำเสนอมาข้างไม่ครอบคลุมไปถึงอุณหภูมิ แต่ในการคำนวณเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เราจะใช้แบบจำลองเพื่อทำนายค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งจะรวมไปถึงความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิด้วย Choi and Okos (1986) ศึกษาแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่าความร้อนจำเพาะที่มีผลมาจากองค์ประกอบของอาหารและอุณหภูมิไว้ในสมการ

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_{pi} \cdot X_i \quad (3.21)$$

เมื่อ X_i คือ สัดส่วนขององค์ประกอบชนิดที่ i , n คือ จำนวนขององค์ประกอบทั้งหมดในอาหาร และ C_{pi} คือค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบ i ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งให้ค่าความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ

3.1.2.2.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ค่าความจุความร้อนจำเพาะสามารถใช้ในการศึกษาสมบัติเฉพาะของวัสดุ โดยอธิบายถึงปริมาณความร้อนที่วัสดุต้องการเพื่อทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส นับว่าเป็นสมบัติที่สำคัญในการคำนวณทางความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่าความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของวัสดุ สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วและง่าย เพียง ใช้เทคนิค DSC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุโดยการตรวจวัดพลังงานความร้อนที่เครื่องต้องการเพื่อชดเชย (Power Compensation) ให้วัสดุตัวอย่าง และวัสดุอ้างอิง ที่มีอุณหภูมิเท่ากัน (Stanby, 1963)

ตารางที่ 3.1 สมการค่าความร้อนจำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ที่มา : Choi and Okos (1986)

องค์ประกอบ	สมการค่าความร้อนจำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ	SE
โปรตีน	$C_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2$	0.1147
ไขมัน	$C_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2$	0.0236
คาร์โบไฮเดรต	$C_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2$	0.0986
เส้นใย	$C_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2$	0.0293
เถ้า	$C_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2$	0.0296
น้ำ ^a	$C_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3} T + 9.9516 \times 10^{-6} T^2$	0.0988
น้ำ ^b	$C_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-3} T + 5.4731 \times 10^{-4} T^2$	0.0159

หมายเหตุ ^a ใช้เมื่ออุณหภูมิอยู่ในระหว่าง -40 ถึง 0°C

^b ใช้เมื่ออุณหภูมิอยู่ในระหว่าง 0 ถึง 150°C

SE คือ standard error

DSC เป็นเทคนิคที่ใช้วัดอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้โปรแกรมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ และยังสามารถศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาได้อีกด้วย มีหลักการทำงาน คือ วัสดุตัวอย่างและ วัสดุอ้างอิงที่เชื่อมต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่บรรจุในถ้วยอะลูมิเนียมขนาดเล็ก (ทองแดงหรือแกรไฟต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง) จะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ มีในตัวอย่างจะถูกตรวจวัด และแปรผล ขนาดของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.5 - 1.0 มิลลิกรัม สำหรับเทคนิค DSC วัสดุตัวอย่างและ วัสดุอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ดังรูปที่ 3.2 ค่าพลังงานความร้อน ($d\Delta Q/dt$) ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และสารอ้างอิงให้เท่ากัน จะถูกบันทึกไว้ (เต็มสุข และคณะ. 2547)

โปรแกรมการวัดค่าความร้อนจำเพาะใน DSC ซอฟต์แวร์ที่ใช้มีวิธีการประเมิน CP ดังนี้ (เมทเลอร์-โทเลโด. 2553)

- ศึกษาค่าความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิทั้งแบบทำ blank (การวัดโดยไม่ใส่ตัวอย่างในภาชนะ) และไม่ทำ blank ได้อย่างรวดเร็วและง่าย

- วิเคราะห์หาค่าความร้อนจำเพาะ โดยใช้ แซฟไฟร์ (Sapphire) ตามมาตรฐาน DIN 51007 ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

นอกเหนือจากนี้ตัวอย่างจริง และ ทำ blank สำหรับวิธี sapphire การวัด sapphire จะต้องทำ เพราะค่าความร้อนจำเพาะที่ทราบของ sapphire จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ แม้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้นจะได้รับเมื่อช่วงอุณหภูมิในการหาซึ่งไม่ได้วิเคราะห์ห้อย่างเป็นเส้นตรง แต่แบ่งออกเป็นกลุ่ม short dynamic กับการหยุดกระบวนการ isothermal และสมการที่ใช้คำนวณคือ

$$C_p = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{1}{\beta_s \cdot m_0} \quad (3.22)$$

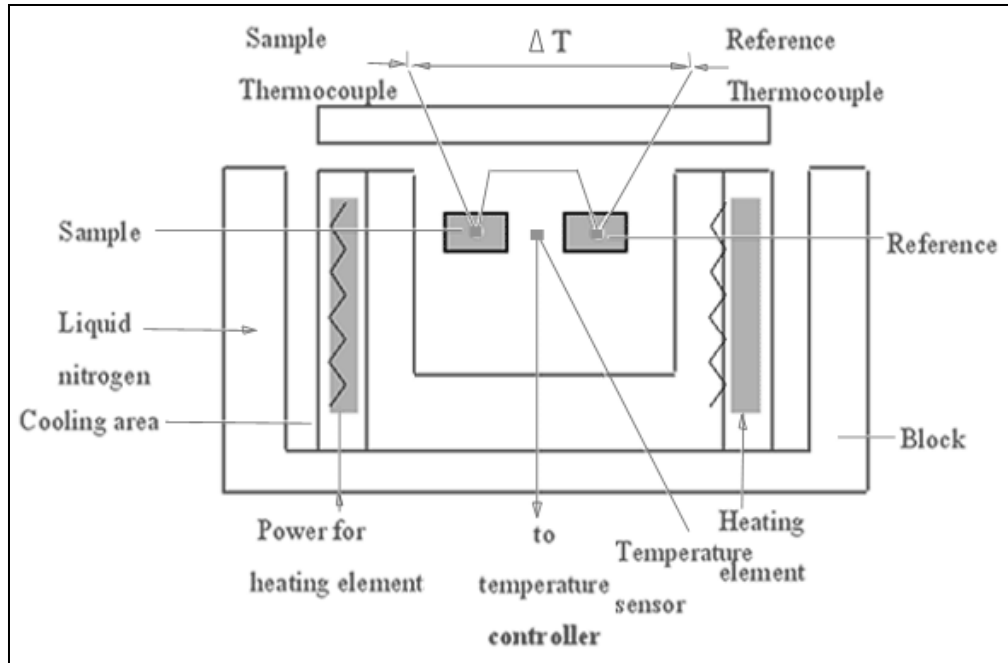
เมื่อ $\frac{dH}{dt}$ คือ การไหลของความร้อนที่ตัวอย่าง

β_s คือ ช่วงการให้ความร้อนของตัวอย่าง

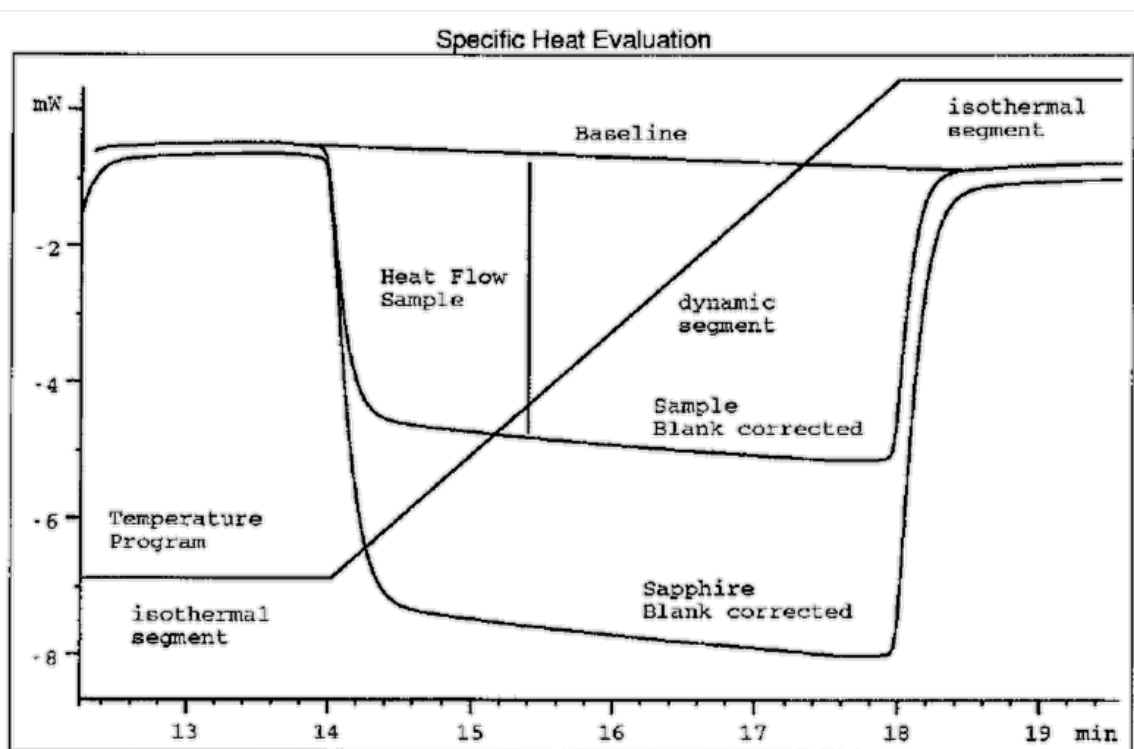
m_0 คือ น้ำหนักของตัวอย่าง

ตามมาตรฐานของ DIN 51007 ความโค้งของเส้น DSC ของตัวอย่างจะเทียบกับของ sapphire และค่าความร้อนจำเพาะจะถูกคำนวณหากขั้นตอน isothermal ได้รับการวัดก่อนและหลังช่วง dynamic จะถูกต้องถ้าเกิด isothermal drift ลักษณะแบบแผนของการประเมินค่า ค่าความร้อนจำเพาะ โปรแกรมอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.3

พลังงานที่ระบบให้กับวัสดุทั้งสองจะเท่ากับพลังงานที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง ไป โดยเป็นเทคนิคที่ทำการวัดพลังงานที่เปลี่ยนไปโดยตรง แสดงผลในรูปแบบเทอร์โมแกรม (Thermogram) หรือความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิตัวอย่าง (Stanby, 1963) โดยผลจะมีรูปแบบเป็น 3 ลักษณะดังนี้



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของ DSC (เต็มสุข และคณะ. 2547)



รูปที่ 3.3 ลักษณะแบบแผนของการประเมินค่า C_p โปรแกรมอุณหภูมิ (isothermal, dynamic), การวัด sapphire ตัวอย่าง และbaseline (isothermal drift) ที่มา : (เมทเลอร์-โทเลโด. 2553)

1. วัสดุดูดความร้อน ความร้อนที่ระบบให้วัสดุตัวอย่างจะมีอุณหภูมิลดลง ระบบให้พลังงานไปที่แหล่งความร้อนของวัสดุตัวอย่าง ได้ค่าสูงสุดของการดูดความร้อนทางด้านบวกของเส้น Baseline
2. วัสดุคายความร้อน ความร้อนที่ระบบให้วัสดุตัวอย่างจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ระบบให้พลังงานไปที่แหล่งให้ความร้อนของวัสดุอ้างอิง ได้ค่าสูงสุดของการคายความร้อนทางด้านลบของเส้น Baseline
3. วัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ได้เทอร์โมแกรมเป็นเส้นตรง

3.2 การหาสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน

3.2.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน (ปานมันัสและคณะ. 2538)

3.2.1.1 วัสดุ

- 1) ข้าวโพดหวานจำนวน 10 ฟัก เหมือนกับข้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1
- 2) สารละลายโทลูอีน (Toluene)

3.2.1.2 อุปกรณ์

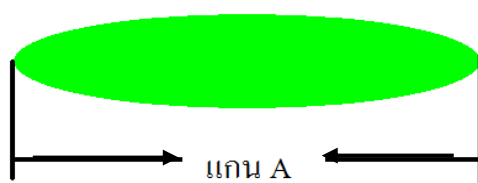
- 1) เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัล (ABSOLUTE DIGIMATIC รุ่น 500-173 ขนาด 300 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร)
- 2) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (SHIMADZU รุ่น BX300 ขนาด 300 กรัม ความละเอียด 0.001 กรัม)
- 3) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OHAUSS รุ่น ARC 120 ขนาด 3000 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม)
- 4) อุปกรณ์ในการปลอกเปลือกและแกะเมล็ด เช่น มีด เขียง
- 5) ขวดรูปชมพู่ (Volumetric flask)

3.2.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

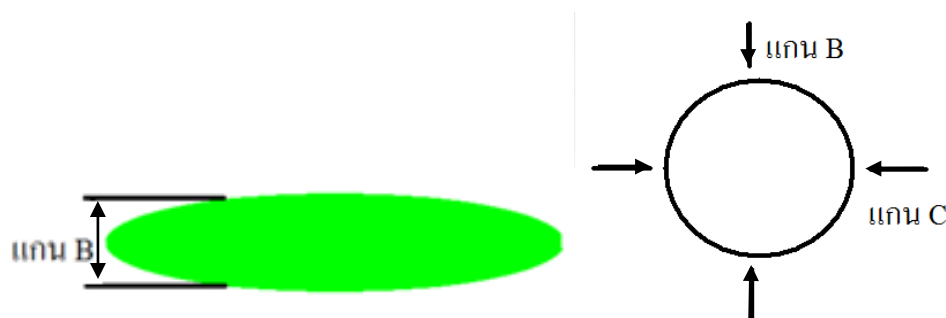
- 1) ขนาดของข้าวโพดหวาน

วัดขนาดฝักด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิทัล (ABSOLUTE DIGIMATIC รุ่น 500-173 ขนาด 300 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร) โดยวัดความยาวเป็นเส้นตรงทั้งหมด 3 แกน คือ 1)

แกน A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดของฝัก ดังรูปที่ 3.4 2) แกน B คือ วัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับแกน A และ 3) แกน C คือ วัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับแกน A และแกน B ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดของฝัก



รูปที่ 3.5 เส้นผ่านศูนย์กลางแกน B และแกน C

2) ความหนาของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวานด้านตั้งฉากกับแกนที่ยาวที่สุด

วัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล (ABSOLUTE DIGIMATIC รุ่น 500-173 ขนาด 300 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร) ก่อนปอกเปลือกทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ตรงกลางฝักข้าวโพดหวาน 1 ตำแหน่ง ตรงกลางของฝักขวาและฝักซ้ายของฝักข้าวโพดหวาน อย่างละ 1 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.6 โดยวัดตำแหน่งละ 2 ครั้งคือ วัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมอีกครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย ปอกเปลือกข้าวโพดหวานแล้วทำเหมือนกับฝักข้าวโพดหวานก่อนปอกเปลือก แกะเมล็ดออกให้เหลือแต่แกนแล้วทำเหมือนกับฝักข้าวโพดหวานก่อนปอกเปลือก คำนวณความหนาของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน ในสมการที่ 3.23, 3.24 และ 3.25 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ตำแหน่ง

$$\text{ความหนาของเปลือก} = \frac{\emptyset \text{ ของทั้งฝัก} - \emptyset \text{ ของข้าวโพดหวานที่ปอกเปลือก}}{2} \quad (3.23)$$

$$\text{ความหนาของเมล็ด} = \frac{\emptyset \text{ ของทั้งฝัก} - (\text{ความหนาของเปลือก} \times 2) - \emptyset \text{ ของแกนข้าวโพดหวาน}}{2} \quad (3.24)$$

$$\text{ความหนาของแกน} = \frac{\emptyset \text{ ของแกนข้าวโพดหวาน}}{2} \quad (3.25)$$

เมื่อ \emptyset คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)

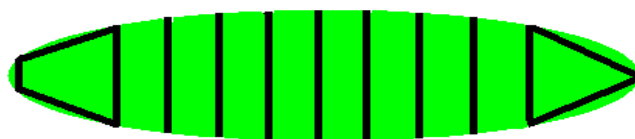
3) ปริมาตรของชิ้นเปลือกบางส่วน เมล็ด แกน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน

3.1) ปริมาตรของชิ้นเปลือกบางส่วน ตัดเปลือกข้าวโพดหวานทั้งความหนาออกเป็น 30×30 มิลลิเมตร 3 ตำแหน่ง คือตรงกลางฝักข้าวโพดหวาน 1 ตำแหน่ง ตรงกลางของฝักข้าวและฝักซ้ายของฝักข้าวโพดหวาน อย่างละ 1 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.29 ในบทที่ 2 แล้วหาค่าเฉลี่ย ความหนาของข้าวโพดหวานหาได้จากข้อที่ 2 คำนวณ V ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \\ &= 30 \times 30 \times \text{ความหนาของเปลือก (m}^3) \end{aligned} \quad (3.26)$$

3.2) ปริมาตรแกน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน ข้าวโพดหวานจะถูกแบ่งออกตามยาวเป็นชิ้นขนาดเท่าๆกัน กว้าง 20 มิลลิเมตร และส่วนที่เหลือตรงส่วนปลายฝักทั้ง 2 ด้าน ให้คิดเป็นทรงกรวยและทรงกรวยตัด ดังรูปที่ 3.7 วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของตรงกลางแต่ละส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์

แบบดิจิทัล (ABSOLUTE DIGIMATIC รุ่น 500-173 ขนาด 300 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร) โดยวัดตำแหน่งละ 2 ครั้งคือ วัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมอีกครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย คำนวณปริมาตรทรงกระบอกได้จากสมการที่ 3.27 ปริมาตรทรงกรวย ปริมาตรของทรงกรวยตัด และ ปริมาตรของฝักข้าวโพดหวานทั้งหมด ได้จากสมการที่ 3.28, 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ สำหรับแกนข้าวโพดหวานก็ทำเช่นเดียวกันกับฝักข้าวโพดหวานทั้งฝัก



รูปที่ 3.7 การแบ่งข้าวโพดหวานออกเป็นชิ้นๆ

$$V \text{ ทรงกระบอกแต่ละส่วน} = \pi \times R \text{ ของทรงกระบอกแต่ละส่วน}^2 \times 20 \text{ (mm)} \quad (3.27)$$

$$V \text{ ทรงกรวย} = \frac{1}{3} \pi \times \text{รัศมีของฐาน}^2 \times \text{ความสูง} \quad (3.28)$$

$$V \text{ ทรงกรวยตัด} = \frac{1}{3} \pi \times \text{ความสูง} \times (R_{\text{ฐาน}}^2 + R_{\text{ยอด}}^2 + (R_{\text{ฐาน}} \times R_{\text{ยอด}})) \quad (3.29)$$

$$V \text{ ของฝักข้าวโพดหวานทั้งหมด} = V \text{ ทรงกระบอกแต่ละส่วน} + V \text{ ทรงกรวย} + V \text{ ทรงกรวยตัด} \quad (3.30)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตร (m^3) และ R คือ รัศมี (mm)

3.3) ปริมาตรของเมล็ด หาด้วยการแทนที่เมล็ดข้าวโพดหวานด้วย สารละลายโทลูอิน ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 200 มิลลิลิตร คำนวณปริมาตรของเมล็ดข้าวโพดหวานจากสมการ

$$V_m = \frac{m}{\rho_L} \quad (3.31)$$

เมื่อ	V_m	คือ ปริมาตรของเมล็ดข้าวโพดหวาน (m^3)
	m_L	คือ มวลของสารละลายโทลูอินที่ถูกแทนที่ (kg)
	ρ_L	คือ ความหนาแน่นของสารละลายโทลูอิน (867 kg/m^3)

4) ความหนาแน่นของเปลือก เมล็ด แคน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน

4.1) ความหนาแน่นเนื้อปรากฏของเปลือก ชั่งน้ำหนักเปลือกที่ได้จากการหาปริมาตร 3 ตำแหน่ง ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (SHIMADZU รุ่น BX300 ขนาด 300 กรัม ความละเอียด 0.001 กรัม) และคำนวณความหนาแน่นเนื้อของเปลือกข้าวโพดหวาน ตามสมการ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.32)$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นเนื้อ (kg/m^3)
	m	คือ มวล (kg)
	V	คือ ปริมาตร (m^3)

4.2) ความหนาแน่นเนื้อปรากฏของแกน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน ชั่งน้ำหนักแกน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน ที่ได้จากการหาปริมาตร ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OHAUSS รุ่น ARC 120 ขนาด 3000 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม) และคำนวณความหนาแน่นเนื้อของแกน และทั้งฝักข้าวโพดหวาน ตามสมการที่ 3.32

4.3) ความหนาแน่นเนื้อของเมล็ด นำน้ำหนักของเมล็ดข้าวโพดหวานที่ได้จากการชั่งในขั้นตอนการหาปริมาตร ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (SHIMADZU รุ่น BX300 ขนาด 300 กรัม ความละเอียด 0.001 กรัม) คำนวณความหนาแน่นเนื้อของเมล็ดข้าวโพดหวาน ตามสมการที่ 3.32

5) พื้นที่ผิวของข้าวโพดหวานทั้งฝัก

คำนวณพื้นที่ผิวทรงกระบอกแต่ละส่วน พื้นที่ผิวด้านข้างของทรงกรวย และพื้นที่ผิวด้านข้างรวมกับพื้นที่ผิวยอดของทรงกรวยตัด ได้เป็นพื้นที่ผิวรวมของข้าวโพดหวาน ทั้งฝัก จากสมการที่ 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 และ 3.37 ตามลำดับ

$$S \text{ ทรงกระบอกแต่ละส่วน} = 2\pi \times \text{รัศมีของทรงกระบอกแต่ละส่วน} \times 20 \text{ มิลลิเมตร} \quad (3.33)$$

$$S \text{ ด้านข้างกรวย} = \pi \times \text{รัศมีของฐาน} \times \text{ความสูงเอียง} \quad (3.34)$$

$$S \text{ ด้านข้างกรวยตัด} = \pi \times \text{สูงเอียง} \times (\text{รัศมีของยอด} + \text{รัศมีของฐาน}) \quad (3.35)$$

$$S \text{ ยอดของทรงกรวยตัด} = \pi \times \text{รัศมีของยอด}^2 \quad (3.36)$$

$$S \text{ รวม} = S \text{ ทรงกระบอก} + S \text{ ด้านข้างกรวย} + S \text{ ด้านข้างกรวยตัด} + S \text{ ยอดของทรงกรวยตัด} \quad (3.37)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิว (m^2)

6) เปรอร์เซ็นต์ความชื้น หาด้วยวิธีการเดียวกับบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.3.2.2

3.2.2 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวาน

3.2.2.1 วัสดุ

1) เปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน ใช้วัสดุเหมือนกับข้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1

2) กาวซิลิโคน

3.2.2.2 อุปกรณ์

1) Thermal conductivity Probe ขนาดความยาว 60 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 มิลลิเมตร ภายในบรรจุด้วยลวด คให้ความร้อน กับเทอร์โมคัปเปิ้ล Type E (East 30 Sensors รุ่น TC-18, USA) ดังรูป



รูปที่ 3.8 Thermal conductivity Probe : ที่มา (East 30 Sensors. 2010)

2) ครอบกใส่ตัวอย่าง (Sample holder) ทำจากวัสดุทองแดงรูปทรงครอบก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร มีฝาปิดด้านบน ตรงกลางฝาปิดด้านบนของครอบกเจาะรูสำหรับเสียบ Probe ดังรูป



รูปที่ 3.9 ครอบกทองแดงสำหรับบรรจุตัวอย่าง

3) แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (ถ่านไฟฉายขนาด 1.5 volt 2 ก้อนต่อขนานกัน) เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ขนาด 3 Volt ให้กับหลอดความร้อน โดยใช้กระแสไฟฟ้า (I) เท่ากับ 0.043 A และค่าความต้านทาน (R) เท่ากับ 1041.5Ω

4) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Agilent รุ่น 34970A, USA) ดังรูป



รูปที่ 3.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ : ที่มา (Agilent Technologies. 2000-2010)

5) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Poly Science รุ่น PW 9502A12E) โดยมีสารควบคุมอุณหภูมิคือ Ethylene Glycol จากบริษัท POCH SA

6) คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำเร็จรูป (Computer and Software)

3.2.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) เตรียมตัวอย่างแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน ใส่ตัวอย่างที่ได้ลงในกระบอกทองแดง ปิดฝา เชื่อมรอยต่อบริเวณฝาและตัวกระบอกด้วยกาวซิลิโคนให้สนิท และเสียบ Thermal conductivity Probe ส่วนแกนก็ใส่ถุงพลาสติกดังรูป



รูปที่ 3.11 เตรียมตัวอย่างแกน เมล็ด และเปลือกข้าวโพดหวาน

2) นำกระบอกตัวอย่างมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิโดยใช้สารควบคุมอุณหภูมิ ที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 องศาเซลเซียส ดังรูป



รูปที่ 3.12 การวัดค่าการนำความร้อนของตัวอย่างในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3) ต่อชุดอุปกรณ์การวัด ได้แก่ Thermal conductivity Probe ที่ใส่กระบอกตัวอย่าง ไว้แล้ว เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังและเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

4) บันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุก 1 วินาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลวดความร้อนกับลอการิทึมของเวลา หาความชันจากกราฟเส้นตรง

5) ทำการคำนวณหาค่าการนำความร้อน จากสมการที่ 3.16 โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ

3.2.3 ค่าความร้อนจำเพาะของข้าวโพดหวาน

3.2.3.1 วัสดุเหมือนกับข้อย่อย 1 ในหัวข้อ 2.3.1.1

- 1) เปลือกข้าวโพดหวาน หั่นเป็นชิ้นเล็กชิ้นเดียว ประมาณ 2-4 มิลลิกรัม
- 2) เมล็ดข้าวโพดหวาน บดเมล็ดเต็มเมล็ด 1 เมล็ด แล้วแบ่งใส่ภาชนะ ประมาณ 16-18 มิลลิกรัม
- 3) แกนข้าวโพดหวาน แบ่งมาส่วนหนึ่งแล้วสับให้ละเอียดแล้วแบ่งใส่ภาชนะ ประมาณ 2-4 มิลลิกรัม

3.2.3.2 อุปกรณ์

- 1) Differential Scanning Calorimeter (Mettler-Toledo DSC 1. Switzerland) ดังรูป

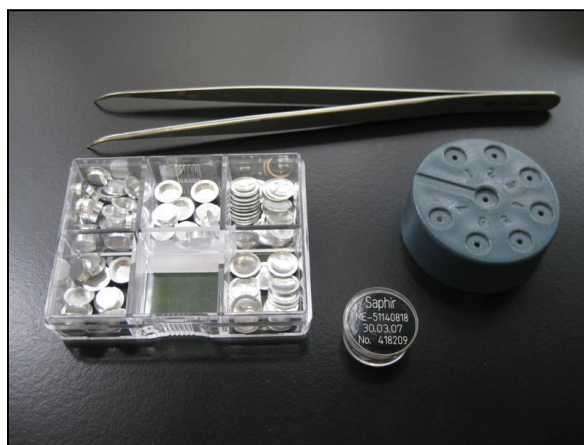


รูปที่ 3.13 Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่มา : เมทเลอร์-โทเลโด (2553)

2) ภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับใส่ตัวอย่าง (crucible), ที่รอง crucible, ที่คืบ และ sapphire ดังรูปที่ 3.14

- 3) เครื่องปิดผนึก crucible แบบกด ดังรูปที่ 3.15

4) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Mettler AT261 DeltaRange, Switzerland)



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้คือ crucible, ที่รอง crucible, ที่คีบ และ sapphire ที่มา : เมทเลอร์-โทเลโด (2553)



รูปที่ 3.15 เครื่องปิดผนึก crucible แบบกด ที่มา : (เมทเลอร์-โทเลโด. 2553)

3.2.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) เตรียม crucible ไว้จำนวน 7 ชิ้น โดยที่ แยกไว้เป็น crucible เป่า 1 ชิ้น (reference crucible), crucible ที่ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น คือเปลือก เมล็ด และแกนของ ข้าวโพดหวาน อย่างละ 2 ตัวอย่างและ ชั่งน้ำหนักของ crucible ทั้งหมดโดยใช้ที่คีบ และที่รอง crucible ปิดผนึกสำหรับ crucible ที่ใส่ตัวอย่างโดยใช้เครื่องปิดผนึก crucible แบบกด

2) นำ sapphire มาชั่งน้ำหนัก โดยใช้ sapphire ชิ้นเดิมตลอดการทดลอง

3) ทำการ Run ตามลำดับดังนี้

- Run blank curve (crucible เปล่า ไม่ปิดผนึก)
- Run sapphire curve (crucible เปล่า ไม่ปิดผนึก + sapphire)
- Run sample curve (crucible ที่ใส่ตัวอย่างและปิดผนึก)

3.2.3.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม

1) เลือก โปรแกรม Star E เลือก Session > Select method > 0 – 25C_5C/min specific heat (หมายถึงช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที)

2) Run blank curve ใส่น้ำหนัก crucible และ reference crucible จากนั้นเลือก Module > DSC/156/700/Robot > กด Send Experiment > กด Proceed > หลังการเสร็จขั้นตอนการทดลอง ให้นำ crucible ออกมา และกด Proceed อีกครั้ง

3) Run sapphire curve ใส่น้ำหนักของ sapphire และทำเหมือนข้อ 2 อีกครั้ง

4) Run sample curve ใส่น้ำหนักของตัวอย่าง และทำเหมือนข้อ 3 อีกครั้ง เสร็จทุกขั้นตอนในการทดลอง 1 ตัวอย่าง

3.3 ผลการทดลอง

3.3.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน

จากผลการทดลองโดยใช้ฝักข้าวโพดหวาน 10 ฝัก ทุกการทดลอง น้ำหนักของฝักจะอยู่ในช่วง 377.6 ถึง 462.8 กรัม ความยาวจะอยู่ในช่วง 24.7 ถึง 27.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางจะอยู่ในช่วง 5.7 ถึง 7.0 เซนติเมตร โดยค่าเหล่านี้จะถูกกำหนดเป็นขนาดข้าวโพดมาตรฐาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.2 ส่วนความหนาของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน คือ 2.9, 11.6 และ 15.7 ตามลำดับ โดยแกนจะมีความหนามากที่สุด รองลงมาคือ เมล็ด และเปลือก ข้อควรระวังของการหาความหนาของเปลือกคือ ความหนาของเปลือกจะขึ้นอยู่กับการลอกเปลือกบางส่วนออก ก่อนทำการวัด ทำให้ค่าความหนาของแตกต่างกันถ้าลอกเปลือกออกไม่เท่ากัน ส่วนความหนาแน่นเนื้อของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน คือ 515.8, 981.6 และ 746.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยเปลือกจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด รองลงมาคือ เมล็ดและแกน เพราะความหนาของเปลือกนั้นทำการวัดเฉพาะส่วน ดัง

รูปที่ 2.29 ในบทที่ 2 คือ ในแต่ละจุดที่ทำการวัดนั้นมีลักษณะแตกต่างกัน (ในส่วนของก้านฝักและปลายฝัก) ทำให้ได้ความหนาแน่นที่ ต่างกัน ส่วนเปอร์เซ็นต์ความชื้นจะเห็นว่าเปลือกมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากที่สุด (82.5) รองลงมาคือ เมล็ดและแกนซึ่งมีความใกล้เคียงกันมาก (76.5 และ 76.0 ตามลำดับ) อาจเป็นเพราะสัดส่วนน้ำหนักในการอบไม่เท่ากัน คือ น้ำหนักของเปลือกที่ใช้อบเพื่อหาความแตกต่างระหว่างก่อนอบและหลังอบ ใช้เพียง 3 ถึง 6 กรัม แต่ในส่วนของเมล็ดกับแกนใช้ประมาณ 25 ถึง 30 กรัม

3.3.2 สมบัติเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน

3.3.2.1 ค่าการนำความร้อน

จากผลการทดลองแสดงใน รูปที่ 3.16 และ ตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้นและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 แสดงให้เห็นว่าความชื้นมีผลต่อค่าการนำความร้อนมากกว่าอุณหภูมิ และ จากผลการทดลองที่ความชื้น 76.1-82.5 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0-25 องศาเซลเซียส มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.28-0.39 W/m²°C เมื่อเปรียบเทียบกับ Kustermann Scherer and Kutzbach (1981) ได้วัดค่าการนำความร้อนของข้าวโพด (shell corn) ข้าวโพดแบบเมล็ดเดี่ยว มีความชื้น 8-45 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 5-45 องศาเซลเซียส มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.13-0.40 W/m²°C ซึ่งผลที่วัดด้วยวิธี Line Heat Source Probe Method อยู่ในช่วงนี้เช่นกัน และ Chang (1986) ได้วัดค่าการนำความร้อนของข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส มีความชื้น 10-18 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.162-0.186 W/m²°C จะเห็นว่า มีค่าการนำความร้อนของเมล็ด จากการทดลอง มีค่ามากกว่าเพราะมีปริมาณความชื้นมากกว่า และเป็นข้าวโพดต่างชนิดกัน

3.3.2.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

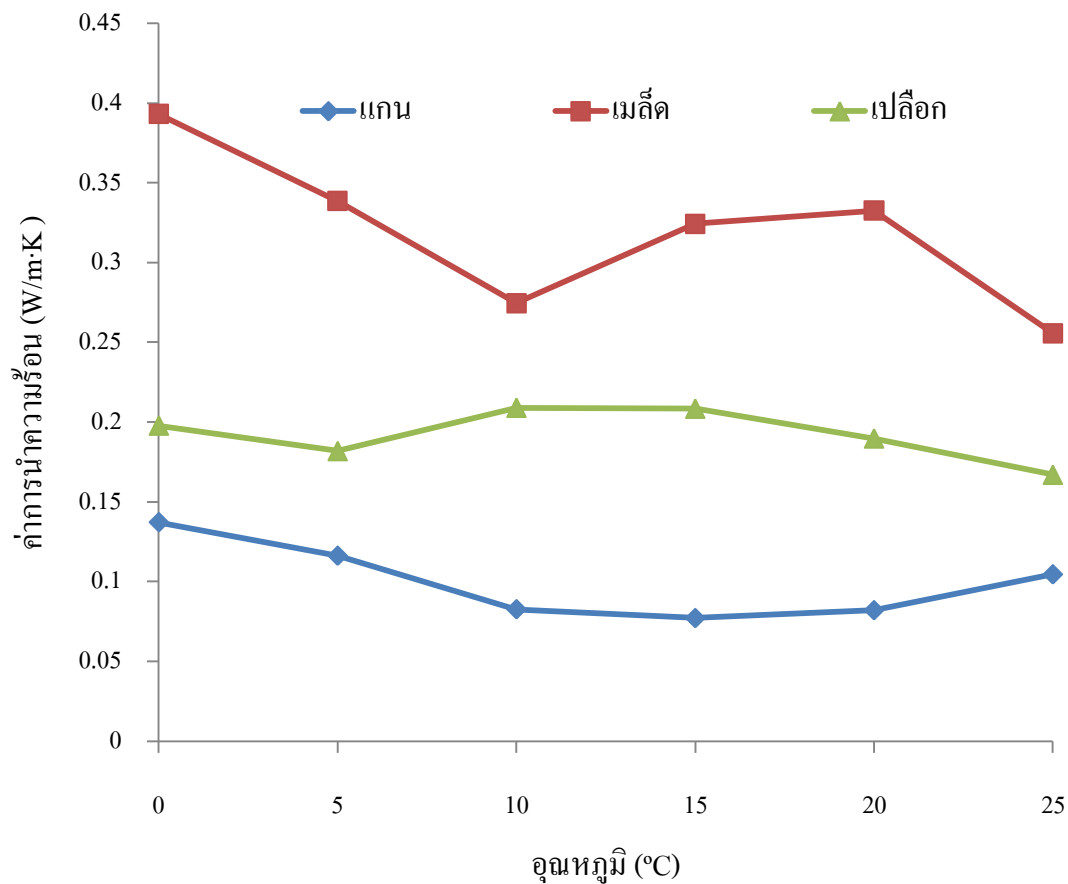
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3.17 และ ตารางที่ 3.6 พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของเปลือกข้าวโพดหวานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือแกน ข้าวโพดหวาน จะเห็นว่าค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวโพดหวาน ไม่ถูกแสดงไว้เป็นเพราะว่ามีการทดลองที่ผิดพลาด จึงได้แสดงค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดข้าวโพดหวานที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้น ของ Siebel (1982) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 3.600, 3.400 และ 3.384 kJ/kg²°C ของเปลือก เมล็ด และ

แกน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค DSC เปลือกข้าวโพดหวานมีค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกันแสดงว่าความชื้นนั้นไม่มีผล ส่วนแกนข้าวโพดคั่วมีค่าการนำความร้อนที่ต่างกันแสดงว่าความชื้นนั้นไม่มีผล

ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน

สมบัติเชิงกายภาพ		จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ย
น้ำหนักของทั้งฝัก (g)		10	377.59±46.28
A = Ø ยาวสุดของฝัก (cm)		10	26.12±0.86
B = Ø ยาวสุดที่ตั้งฉากกับแกน A(cm)		10	6.48±0.20
C = Ø ยาวสุดที่ตั้งฉากกับแกน A และ B(cm)		10	6.16±0.23
ความหนา	เปลือก* (mm)	10	2.87±0.40
	เมล็ด**(mm)	10	11.56±0.55
	แกน*** (mm)	10	15.70±0.79
ปริมาตรทั้งฝัก (cm ³)		10	632.21±71.34
ความหนาแน่นเนื้อ	ทั้งฝัก (kg/m ³)	10	596.92±16.53
	เปลือก (kg/m ³)	10	515.80±76.85
	เมล็ด (kg/m ³)	10	981.61±51.75
	แกน (kg/m ³)	10	746.08±48.78
พื้นที่ผิวทั้งฝัก (cm ²)		10	370.34±31.77
เปอร์เซ็นต์ความชื้น	ทั้งฝัก	10	77.87±1.09
	เปลือก	10	82.51±1.59
	เมล็ด	10	76.52±1.31
	แกน	10	76.05±1.75

หมายเหตุ Ø คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง * คือ ความหนาของเปลือกระหว่างเปลือกที่ผิวด้านนอกและเปลือกที่ติดกับเมล็ด ** คือ ความหนาแน่นระหว่างผิวเมล็ดที่ติดกับแกนและผิวเมล็ดที่ติดกับเปลือก *** คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหารสอง



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับค่าการนำความร้อน (W/m·°C) ของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน

ตารางที่ 3.3 ค่าการนำความร้อนของแกน เมล็ด เปลือกของข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิต่างๆ

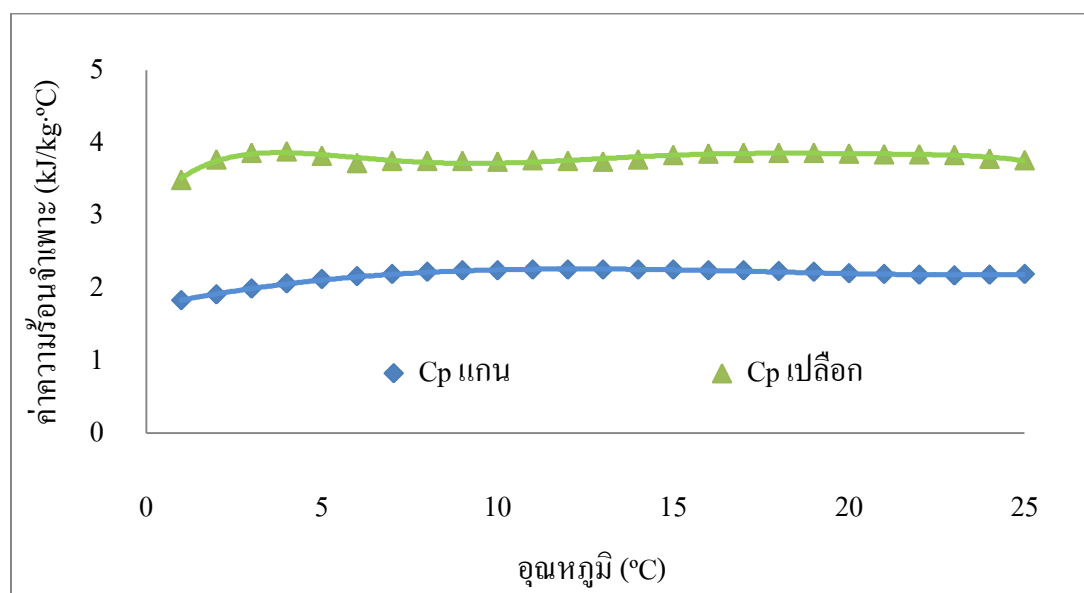
อุณหภูมิ (°C)	k แกน (W/m·°C)	k เมล็ด (W/m·°C)	k เปลือก (W/m·°C)
0	0.137±0.050	0.393±0.164	0.198±0.018
5	0.116±0.048	0.338±0.155	0.182±0.038
10	0.083±0.003	0.275±0.006	0.209±0.041
15	0.077±0.013	0.324±0.114	0.208±0.015
20	0.082±0.008	0.333±0.044	0.190±0.009
25	0.105±0.033	0.256±0.086	0.167±0.018

ตารางที่ 3.4 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวานที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้น ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวาน ($W/m^{\circ}C$)			
ผู้สร้างสมการ	เปลือก	เมล็ด	แกน
Bowman (1970)	0.524	0.490	0.487
Wang and Brennan (1992)	0.245	0.235	0.234

ตารางที่ 3.5 ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวานที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับ อุณหภูมิ ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ค่าการนำความร้อนของข้าวโพดหวาน ($W/m^{\circ}C$)	
Ramaswamy and Tung (1981)	0.447
Califano and Calvelo (1991)	0.679
Zainal et.al. (2000)	0.512



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับค่าความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg^{\circ}C$) ของแกน เมล็ด และ เปลือกข้าวโพดหวาน

ตารางที่ 3.6 ความร้อนจำเพาะของแกน เมล็ด เปลือกของข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิต่างๆ

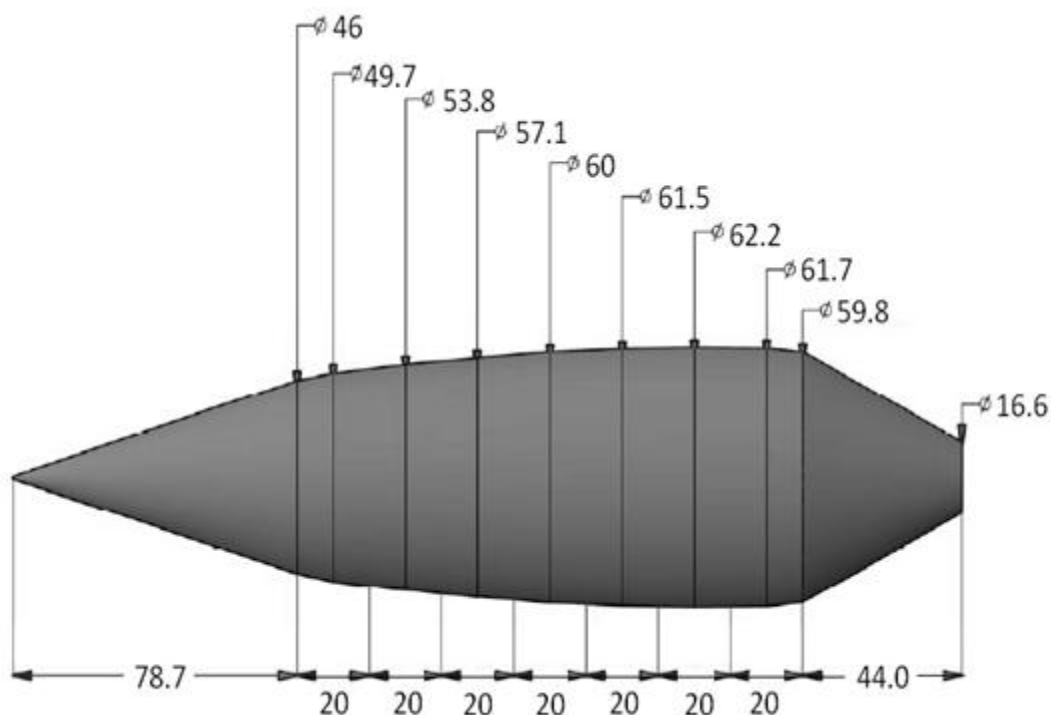
อุณหภูมิ (°C)	C_p แกน (kJ/kg·°C)	C_p เปลือก (kJ/kg·°C)
2.00	1.91±0.86	3.77±0.01
4.00	2.06±0.89	3.88±0.02
6.00	2.16±0.91	3.72±0.02
8.00	2.22±0.91	3.75±0.02
10.00	2.24±0.91	3.74±0.02
12.00	2.25±0.91	3.75±0.02
14.00	2.25±0.91	3.77±0.03
16.00	2.24±0.92	3.85±0.02
18.00	2.23±0.93	3.86±0.02
20.00	2.20±0.93	3.85±0.02
22.00	2.18±0.93	3.84±0.02
24.00	2.18±0.9	3.78±0.01

3.4 สรุปผลการทดลอง

3.4.1 สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน

จากผลการทดลอง สามารถนำเอาสมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวานที่วัดไปใส่ในแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิภายในข้าวโพดหวานระหว่างการลดอุณหภูมิได้โดยมีรายละเอียดดังนี้ จากการวัดปริมาตรของฝักข้าวโพดหวานจะได้ขนาดของข้าวโพดหวานที่แบ่งเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 3.7 โดยนำข้อมูลที่วัดในส่วนนี้มาคำนวณหาขนาดของข้าวโพดหวาน ให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายในแต่ละชั้นบอกขนาดไว้ดังรูปที่ 3.18 โดยส่วนก้านฝักข้าวโพดหวานให้เป็นทรงกรวยตัด และส่วนปลายให้เป็นทรงกรวย จากการวัดขนาดของข้าวโพดหวานทั้งฝัก ข้าวโพดหวานที่เปลือกเปลือก และแกนข้าวโพดหวาน ทำให้สามารถคำนวณความหนา ของข้าวโพดแต่ละชั้นคือ ชั้นของเปลือก เมล็ด และแกน ซึ่งสามารถนำไปใช้กำหนดขนาดในการเขียนแบบ 2 มิติ ของแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิภายใน

ข้าวโพดหวานระหว่างการลดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.19 โดยในแบบจำลองต้องใส่ขนาดเป็นเมตร และจากการวัดความหนาแน่นของเปลือก เมล็ด และแกนข้าวโพดหวาน สามารถนำค่าเหล่านี้ใช้เป็นตัวแปรเริ่มต้น แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิภายในข้าวโพดหวานระหว่างการลดอุณหภูมิได้



รูปที่ 3.18 ภาพจำลองข้าวโพดหวานบอกขนาดเป็นมิลลิเมตร

3.4.2 สมบัติเชิงความร้อนของข้าวโพดหวาน

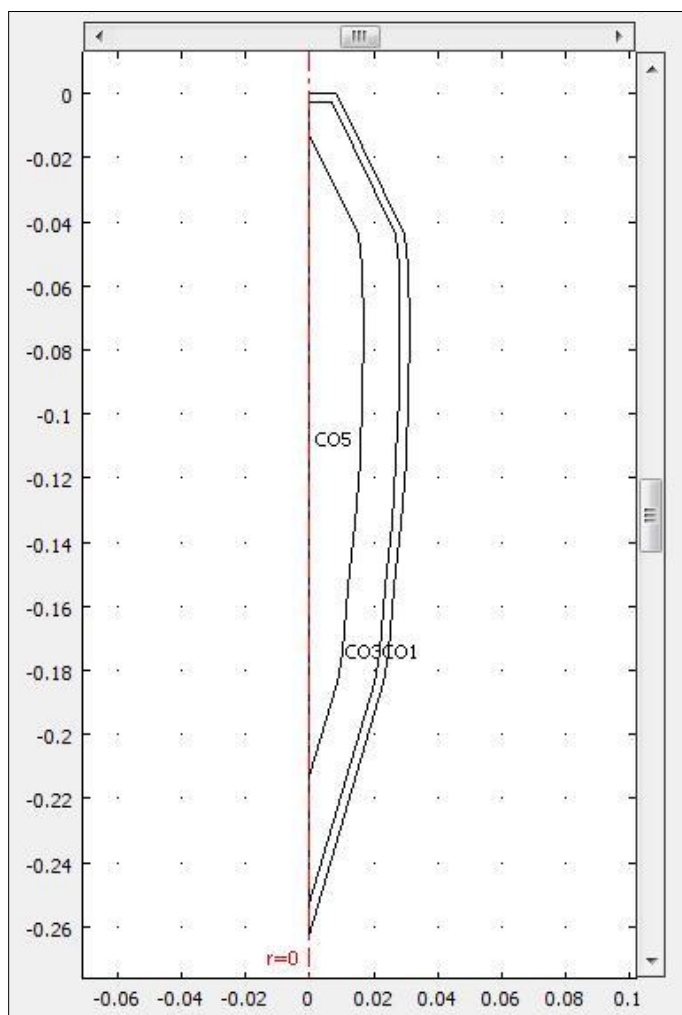
3.4.2.1 ค่าการนำความร้อน

จากผลการทดลองสามารถนำเอาค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองไปใช้ในแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิได้ โดยเลือกใช้ค่าการนำความร้อนที่ 25 องศาเซลเซียส เพราะเป็นอุณหภูมิขณะที่ข้าวโพดหวานอยู่ในสภาพอากาศปกติขณะทำการทดลอง หรืออาจใช้ค่าการนำความร้อนที่ได้จากสมการของ Wang and Brennan (1992) ที่เป็นฟังก์ชันกับ

ความชื้น เพราะค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ยกเว้นในส่วนของแกนข้าวโพดที่มีค่าการนำความร้อนที่มากกว่าถึง $0.14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

3.4.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ

จากผลการทดลองสามารถนำเอาค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองไปใช้ในแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิได้ โดยเลือกใช้ค่าความร้อนจำเพาะที่ 25 องศาเซลเซียส เพราะเป็นค่าของอุณหภูมิตั้งแต่ทำการทดลอง ซึ่งใช้เฉพาะค่าความร้อนจำเพาะในส่วนของเปลือก และแกนข้าวโพดหวาน ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของข้าวโพดหวานนั้นใช้ค่าที่คำนวณจากสมการที่เป็นฟังก์ชันกับความชื้นของ Siebel (1982)



รูปที่ 3.19 ภาพจำลองข้าวโพดหวานโดยแบ่งชั้นระหว่างเปลือก เมล็ด และแกน บอกขนาดเป็นเมตร

บทที่ 4

แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน ในระหว่างการลดอุณหภูมิ

4.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (COMSOL, Inc. 1998-2010)

การถ่ายเทความร้อน หมายถึงการเคลื่อนไหวยของพลังงานเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ บทนี้ได้แสดงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองปัญหาการถ่ายเทความร้อน โดยจะอธิบายรายละเอียดทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำและการพาความร้อน ซึ่งถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่ผ่านการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็น ซึ่งการถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

1. การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุที่เป็นของแข็งจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอม ความร้อนจะเดินทางจากบริเวณที่มี อุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ วัสดุแต่ละชนิดจะนำความร้อนได้ต่างกัน โดยปกติการนำความร้อนเป็นการไหลของความร้อน (heat flux) ที่เป็นสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2. การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะ ก๊าซหรือของเหลว โดยเทอมของการพาความร้อนนี้เป็นการกระจายความร้อนจากพื้นผิวของของแข็งไปสู่ของเหลว ซึ่งสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันของพื้นผิวหนึ่งถึงไปอีกพื้นผิวหนึ่งจะนำมาอธิบายการไหลของความร้อนได้ โมดูลของการถ่ายเทความร้อนได้รวมการอธิบายทั้งสองไว้

3. การแผ่รังสี (radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านสุญญากาศมายังโลก ซึ่งไม่ได้นำมาคิดในงานวิจัยนี้

กฎพื้นฐานที่ครอบคลุมการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดคือกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) หมายถึง กฎการอนุรักษ์พลังงาน แต่พลังงานภายใน (U) เป็นปริมาณที่วัดและใช้ในการจำลอง (simulation) ก่อนข้างลำบาก ดังนั้นกฎพื้นฐานมักจะเขียนใหม่ในเทอมของอุณหภูมิ (T) สำหรับของไหล สมการความร้อนที่ได้คือ

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (4.1)$$

- ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
 C_p คือ ความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
 \mathbf{u} คือ เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
 \mathbf{q} คือ การไหลความร้อนโดยการนำ (W/m^2)
 p คือ ความดัน (Pa)
 $\boldsymbol{\tau}$ คือ viscous stress tensor (Pa)

$$\boldsymbol{\tau} = \eta \left(2\mathbf{S} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right) \quad (4.2)$$

- เมื่อ η คือ ความหนืด (Pa·s)
 \mathbf{I} คือ identity tensor

- \mathbf{S} คือ strain rate tensor (1/s)

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4.3)$$

- Q คือ แหล่งความร้อนอื่นนอกจากความร้อนจากเนื้อความหนืด (W/m^3)

จากสมการที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้ถูกนำมาใช้ เห็นได้ว่าสมการนั้นมีการอนุรักษ์มวลไว้เสมอ ซึ่งหมายความว่าความหนาแน่นและความเร็วต้องเกี่ยวข้งกันดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4.4)$$

รูปแบบทั่วไปของการประยุกต์การถ่ายเทความร้อนใช้กฎฟูเรียร์ของการนำความร้อน ที่อยู่ในสถานะการไหลความร้อนแบบการนำ q เป็นการไหลของความร้อนที่เป็นสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังนี้

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.5)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) ในของแข็ง ค่าการนำความร้อนสามารถแตกต่างกันได้ในทิศทางที่แตกต่างกัน แล้ว k เป็น tensor

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

และการไหลของความร้อนแบบการนำหาได้โดย

$$q_i = -\sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4.7)$$

จากเทอมที่ 2 ทางด้านขวาของ สมการที่ 4.1 แสดงถึงความร้อนที่เกิดจากความหนืดของของไหล เทอมที่คล้ายกันนี้เกิดจากความหนืดภายในที่ลดลงของของแข็ง การใช้เครื่องหมาย ":" เป็นการย่อและสามารถเขียนกรณีนี้ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\mathbf{a}:\mathbf{b} = \sum_n \sum_m a_{nm} b_{nm} \quad (4.8)$$

เทอมที่ 3 แสดงความดันในการทำงานและการตอบสนองสำหรับการทำความร้อนของของเหลวภายใต้สถานะความดันแบบ ที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

(adiabatic) และสำหรับผลกระทบของเทอร์โมอะคูสติก (thermo-acoustic) โดยปกติแล้วการไหลของ Mach number จะมีเป็นส่วนน้อย ในเทอมที่คล้ายกัน สามารถถูกรวมเข้าไปเพื่ออธิบายผลกระทบของเทอร์โมอีลาสติก (thermo-elastic) ในของแข็งด้วย แทนสมการที่ 4.5 ลงในสมการที่ 4.1 จะได้เทอมใหม่ตัดความร้อนเนื่องจากความหนืดและความดันการทำงาน ทำให้สมการความร้อนอยู่ในรูปแบบที่อาจจะคุ้นเคยมากขึ้น

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T \quad (4.9)$$

โหมดทั่วไปของการถ่ายเทความร้อนที่ใช้นั้นแก้ปัญหาด้วยสมการที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (T) เมื่อการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นตัวหลัก สามารถหาความเร็ว (\mathbf{u}) จากสมการทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรอิสระหรือคำนวณใน COMSOL Multiphysics โดยการรวมเข้ากับโหมดการถ่ายเทโมเมนตัม เช่น โหมดของการไหลของของไหลการไหลแบบอัดตัวไม่ได้หรือ แบบอัดตัวได้น้อยมาก โดยใช้สมการนาร์เวียร์-สโตก (Navier-Stokes) ถ้าความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ สมการสุดท้ายที่ได้รวมการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนในของแข็งไว้ด้วยดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (4.10)$$

4.1.2 การกำหนดขอบเขต (Boundary Conditions) (COMSOL, Inc. 1998-2010)

สมการความร้อน ขอบรับการกำหนดขอบเขต 2 ชนิด คือ อุณหภูมิจำเพาะและการไหลของความร้อนไหลจำเพาะ รูปแบบเป็น Dirichlet type และกำหนดอุณหภูมิไว้ดังนี้

$$T = T_0 \quad \text{on } \partial\Omega \quad (4.11)$$

หลังจากที่ระบุการไหลของความร้อนภายใน

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0 \quad \text{on } \partial\Omega \quad (4.12)$$

เมื่อ \mathbf{q} คือ เวกเตอร์การไหลของความร้อนทั้งหมด (W/m^2)

$$\mathbf{q} = -k\nabla T + \rho C_p \mathbf{u}T \quad (4.13)$$

เมื่อ q_0 คือ เป็นการไหลของความร้อนภายในขอบเขตปกติ (W/m^2)

การกำหนดขอบเขตของการไหลของความร้อนเป็นแบบผสมหรือ Robin type โดยการกำหนดขอบเขตนี้ค่อนข้างมากกว่าการกำหนดขอบเขตแบบ Neumann อย่างเดียว กรณีพิเศษ $q_0 = 0$ เรียกว่า จนวนความร้อน อีกกรณีพิเศษหนึ่ง คือ $q_0 = -\rho C_p \mathbf{u}T$ หรือที่เหมือนกันก็คือ $-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = 0$ ซึ่งเป็นการไหลแบบการพา (convective flux) สภาพที่เหมาะสมนี้มักอยู่บนขอบเขตของการไหลออก (outflow boundary) ในแบบจำลองของการพาความร้อน ถ้าความเร็วเป็นศูนย์ จนวนความร้อนและการไหลความร้อนแบบการพามีค่าเท่ากัน

ภายใน q_0 คือ การรวมกันของผลจากกระบวนการการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งแยกการกำหนดขอบเขตของการไหลของความร้อนเป็น

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0 + q_r + q_s + h(T_{\text{inf}} - T) \quad \text{on } \partial\Omega \quad (4.14)$$

ที่ q_r คือ ความร้อนจากรังสีที่เข้ามา และ q_s คือ ความร้อนจากการนำความร้อน เทอมสุดท้าย คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (T) ที่พื้นผิว และอุณหภูมิอ้างอิง (T_{inf}) สามารถใช้ในแบบจำลองที่เป็นวัสดุขนาดเล็กและค่าความร้อนแบบการนำต่ำ หรือมีการทำความเย็นแบบการพาของพื้นผิวที่ของเหลวไหลผ่านกับอุณหภูมิรวม (bulk temperature, T_{inf}) มากกว่าปกติ

การถ่ายเทความร้อนแบบการพาด้วยความเย็น/ความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหนึ่งในการกำหนดขอบเขตที่พบบ่อยที่สุด เมื่อการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เป็น การถ่ายเทความร้อนแบบการพาด้วยความเย็นหรือความร้อน โดยที่น้ำเย็นบนพื้นผิวเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบบังคับ (free or force convection) หลักการที่เป็นไปได้ในแบบกระบวนการนี้มี 2 วิธี

1. ประยุกต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับผิวที่มีการพาความร้อน

2. ขยายแบบจำลองเพื่ออธิบายการไหลและการถ่ายเทความร้อนในน้ำเย็น

วิธีแรกเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้โหมคทั่วไปของการถ่ายเทความร้อนที่ใช้หาได้ในฟังก์ชัน built-in สำหรับการใส่ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้เป็นค่าที่ถูกต้องและหามาได้โดยใช้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ หลังจากสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบการพาโดยการไหลของความร้อนบนเงื่อนไขซึ่งการกำหนดขอบเขตของน้ำเย็นนำมาถึงสัดส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งอธิบายการไหลในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h ตามสมการนี้

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = h(T_{\text{inf}} - T) \quad (4.15)$$

วิธีที่ 2 (รวมถึงการไหลของน้ำเย็น และการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลอง) ที่สามารถใช้ประโยชน์ในบางกรณีที่ใช้วิธีนี้ เช่น รูปร่างเรขาคณิตของวัสดุ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมากตามตำแหน่ง หรือถ้าอุณหภูมิในน้ำเย็นเป็นที่สนใจ ในกรณีเช่นนี้ การกำหนดขอบเขตที่รอยต่อเป็นความต่อเนื่องและไม่สนใจผลที่ตามมา

ความซับซ้อนของแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างมากเนื่องจากความจำเป็นของการแก้ปัญหาของขอบเขตการไหลตลอดจนขอบเขตอุณหภูมิ นอกจากนี้ต้องการหน่วยความจำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนนี้จะเน้นวิธีการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน ปัญหาหลักในการใส่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการคำนวณหรือระบุค่าที่เหมาะสมคือ ค่าสัมประสิทธิ์นั้นขึ้นอยู่กับน้ำ เย็น การกำหนดคุณสมบัติวัสดุของเหลว อุณหภูมิพื้นผิว สภาวะการทำความร้อน อัตราการไหลของของไหล นอกจากนี้รูปร่างของวัสดุยังมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วย

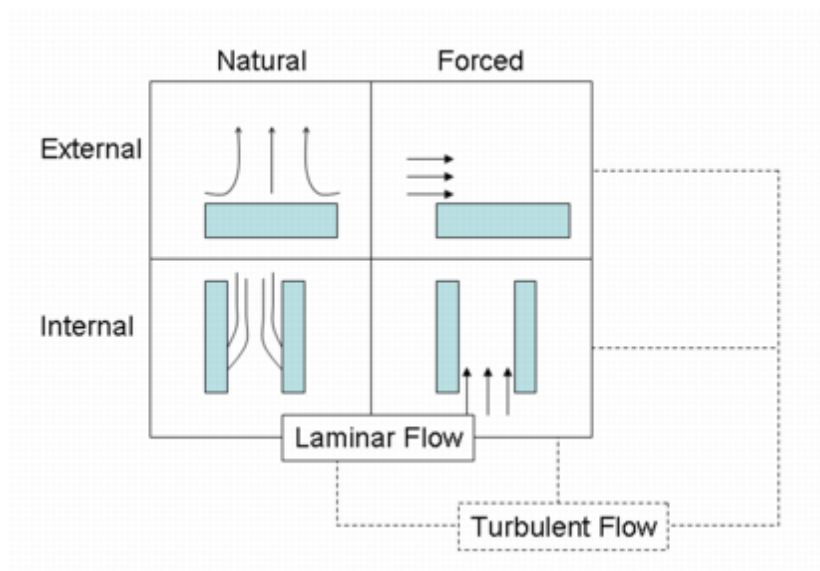
4.1.3 ทฤษฎีของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (COMSOL, Inc. 1998-2010)

มันเป็นไปได้ที่จะแบ่งการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาเป็น 4 ประเภทหลักขึ้นอยู่กับประเภทของเงื่อนไขการพา (ธรรมชาติหรือบังคับ) และรูปแบบการไหล (ภายในหรือภายนอก) นอกจากนี้ทั้ง 4 กรณีเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) หรือ การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ผลทั้งหมดทำให้มี 8 ประเภทของการพาดังรูปที่ 4.1

ความแตกต่างระหว่าง การพาแบบธรรมชาติและบังคับ คือ ในกรณีหลังการพาแบบบังคับภายนอก เช่น พัดลม เพิ่มอัตราการไหล ส่วนในการพาแบบธรรมชาติ แรงพยุงหรือแรงลอยตัว (Buoyancy force) โดยเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิและการขยายตัวของความร้อนของของเหลวที่เคลื่อนที่

สำหรับแต่ละประเภทของความสัมพันธ์ต่างๆต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ได้มีการเขียนไว้แล้วในตำราต่างๆ สำหรับกรณีส่วนใหญ่สมการที่อธิบาย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับรูปร่างของการไหลผ่านวัสดุ การค่าที่ได้แตกต่างกัน เช่น การพาแบบบังคับภายในแบบราบเรียบระหว่างหลอด และแผ่นขนาน

คู่มือของการถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปจะเขียนถึงมีความสัมพันธ์กันทั้งในเชิงทฤษฎีและหรือข้อมูลเชิงการทดลอง (Theoretical and Empirical) สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โมดูลของเชื้อข้อมูลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมถึงเซตย่อย เซตข้อมูลของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใช้คู่มือพื้นฐาน โดยเฉพาะตามที่กำหนด dimensionless numbers ไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ความเป็นไปได้ทั้ง 8 ประเภทของการพาที่มา : (COMSOL, Inc. 1998-2010)

$$\text{Nusselt number, } Nu_L(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Ra}) = hL/k \quad (4.16)$$

$$\text{Reynolds number, } Re_L = \rho U L/\eta \quad (4.17)$$

$$\text{Prandtl number, } \text{Pr} = \eta C_p/k \quad (4.18)$$

$$\text{Rayleigh number, } \text{Ra} = gr \text{Pr}$$

$$= \rho^2 g \beta C_p \Delta T L^3 / (\eta k) \quad (4.19)$$

เมื่อ	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
	L	คือ ความยาว (m)
	T	คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นผิว และน้ำเย็น ($^\circ\text{C}$)
	g	คือ แรงดึงดูดคงที่ (m/s^2)
	k	คือ การนำความร้อนของของไหล ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)
	U	คือ ความเร็ว (m/s)
	η	คือ ความหนืด (Pa·s)
	C_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
	β	คือ the thermal expansivity ($1/^\circ\text{C}$)
	gR	คือ จำนวน grashof number ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัว และ แรงหนืด (viscous force)

4.1.4 Biot number (Bi) (Incropera. 2007)

Biot number (Bi) เป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในสภาวะไม่คงที่ (non-steady-state) ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน ตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ฝรั่งเศส Jean - Baptiste Biot (1774-1862) และให้ข้อมูลที่ง่ายของอัตราส่วนของความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนภายในและพื้นผิวของวัสดุอัตราส่วนนี้จะกำหนดหรือไม่ อุณหภูมิภายในวัสดุจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในพื้นที่ขณะที่วัสดุร้อนหรือเย็นเกินเวลาที่กำหนด จากการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เข้ากับพื้นผิวโดยทั่วไปแล้วปัญหาเกี่ยวกับ Biot number (น้อยกว่า 1) เป็นความร้อนเนื่องจากขอบเขตอุณหภูมิภายในวัสดุสม่ำเสมอ Biot number มากกว่า 1 เป็นปัญหาที่ยากเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในวัตถุ Biot number มีความหลากหลายของการใช้งานรวมทั้งใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิว หา Biot number (Bi) ได้จากสมการ

$$\text{Bi} = \frac{hL_C}{k_b} \quad (4.20)$$

เมื่อ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่พื้นผิวหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพา

L_C คือ characteristic length ที่มีการกำหนดปริมาตรปกติของวัตถุ โดยแบ่งพื้นที่ผิวของวัตถุนั้นเช่นว่า

$$L_C = \frac{V_{\text{body}}}{A_{\text{surface}}}$$

k_b คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

ความสำคัญทางกายภาพของ Biot number สามารถเข้าใจได้ ยกตัวอย่างเช่น มีการไหลของความร้อนจากโลหะทรงกลมร้อนขนาดเล็ก แช่ในอ่างน้ำที่มีน้ำล้อมรอบ การไหลของความร้อนมีด้านทาน 2 แบบ : แบบแรกภายในโลหะของแข็ง (ซึ่งเป็นอิทธิพลจากทั้งขนาดและองค์ประกอบของทรงกลม) และแบบที่ 2 พื้นผิวของทรงกลม ถ้าการด้านทานความร้อนของของน้ำส่วนติดกับทรงกลมมากกว่าความด้านทานความร้อนภายในของโลหะทรงกลม Biot number จะน้อยกว่า 1 สำหรับระบบที่น้อยกว่า 1 ภายในทรงกลมอาจจะสันนิษฐานว่าเคยมีอุณหภูมิเดียวกัน แต่อุณหภูมินี้อาจเปลี่ยนเป็นความร้อนผ่านเข้าสู่พื้นผิวทรงกลม สมการเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงนี้ในอุณหภูมิภายในวัตถุหนึ่งเป็นสมการเอ็กโปเนนเชียล (exponential) อย่างง่าย ที่อธิบายไว้ในกฎการทำความเย็นนิวตัน

ในทางตรงกันข้าม โลหะทรงกลมอาจจะมียุณหภูมิขนาดใหญ่ทำให้ characteristic length เพิ่มขึ้นทำให้ Biot number มีค่ามากกว่า 1 ตอนนี้ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปภายในทรงกลมเป็นสิ่งสำคัญแม้ว่าวัสดุทรงกลมเป็นตัวนำที่ดี ใด ๆ ก็ดี ถ้าทรงกลมทำจากฉนวนความร้อน(การนำความร้อนต่ำ) วัสดุเช่น ไม้ หรือ โฟม ความด้านทานภายในที่การไหลความร้อนจะมากกว่าขอบเขตของน้ำที่ติดกับทรงกลม แม้ทรงกลมขนาดเล็กมาก ในกรณีนี้ Biot number จะได้มากกว่า 1

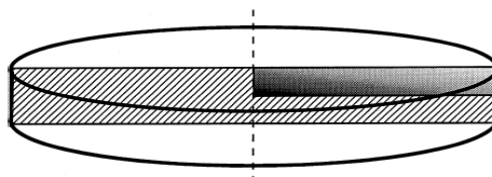
ค่าของ Biot number น้อยกว่า 0.1 หมายความว่า การนำความร้อนภายในก้อนวัสดุเร็วกว่าการพาความร้อนออกจากพื้นผิวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเล็กน้อยภายในของวัสดุ ค่าสามารถบ่งบอกถึงการบังคับใช้ (หรือ ไม่สามารถนำมาใช้ได้) วิธีการหนึ่งของการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนชั่วคราว ตัวอย่างเช่นค่า Biot number น้อยกว่า 0.1 มักจะแสดงข้อผิดพลาดน้อยกว่า 5% จะถูกนำเสนอเมื่อสมมติให้แบบจำลอง lumped-capacitance ของการถ่ายเทความร้อนชั่วคราว (การวิเคราะห์ระบบที่เรียกว่า lumped) โดยทั่วไปเทคนิคของการวิเคราะห์นี้จะนำไปสู่อธิบายพฤติกรรมความร้อนหรือเย็นอย่าง

ง่าย (ความเย็นหรือความร้อนแบบไม่คงที่) ตั้งแต่ปริมาณพลังงานความร้อนในก้อนวัสดุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิซึ่งจะกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากวัสดุได้ ซึ่งนำไปสู่สมการอนุพันธ์อย่างง่ายที่อธิบายการถ่ายเทความร้อนในระบบเหล่านี้มีค่า Biot number น้อยกว่า 0.1 วัสดุความร้อนบางและความร้อนที่สามารถสมมติฐานให้เป็นค่าคงที่ตลอดปริมาณวัสดุ ตรงข้ามกับความ เป็นจริงค่า Biot number มากกว่า 0.1 (วัสดุ "ความร้อนหนา") ระบุว่าไม่สามารถสมมติฐานและสมการ การถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อนมากขึ้น สำหรับ "การนำความร้อนชั่วคราว" จะต้องอธิบายเวลาแตกต่างกันและขอบเขตอุณหภูมิที่ไม่เกี่ยวกับตำแหน่งภายในตัววัสดุ

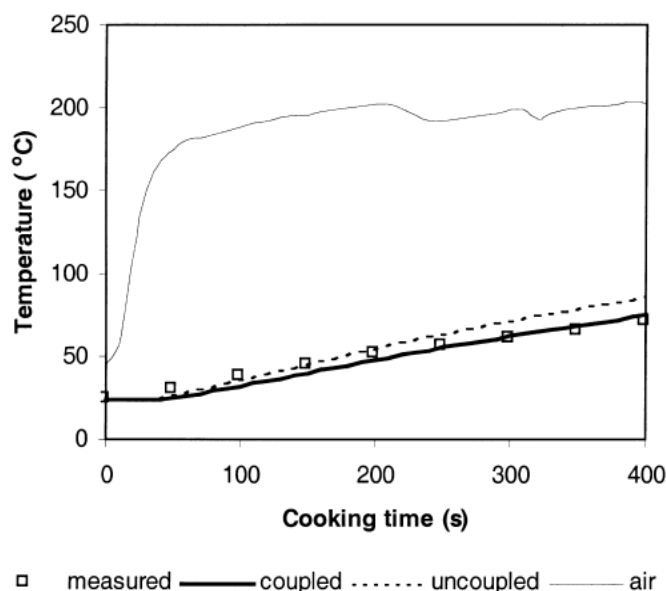
4.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิ

การสร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมินี้ก็เพื่อให้ทราบระยะเวลาในกระบวนการทางความร้อนหรือความเย็น ว่าต้องใช้เวลานานเท่าใด เพื่อให้ไม่ต้องมาทำการวัดอุณหภูมิของผลผลิตว่า อุณหภูมิถึงที่ต้องการหรือไม่ เป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งก็ได้มีผู้สร้างแบบจำลองการทำนาย อุณหภูมิที่ใช้โปรแกรม comsol Multiphysics ไว้หลายท่านดังนี้

Chen, Marks and Murphy (1999) ได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของ การอบพายไก่ ซึ่งใช้แบบจำลองในรูปแบบแกนสมมาตร 2 มิติ แสดงในรูปที่ 4.2 ถูกพัฒนาเพื่อจำลอง การพาความร้อนและมวลสารในการอบพายไก่ ให้สภาพอากาศในการอบจริงเป็นแบบชั่วขณะ (transient) การกระจายของอุณหภูมิและความชื้นชั่วขณะในผลิตภัณฑ์ที่มีการทำนายและการตรวจสอบ ความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้พายไก่ 98 ชิ้นในเตาอบ การทำนายอุณหภูมิชั่วขณะของจุดกึ่งกลาง ภายใต้งี๋ร้อนไขต่างๆ มีข้อผิดพลาดคือ 3.8 ± 5.7 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.3 ข้อผิดพลาดของการทำนายสำหรับค่า yield ของการอบพายไก่ได้ 1.2% ที่สภาวะ เดียวกัน การทำนายที่ผิดพลาดจะเพิ่มขึ้น 12.9 ± 5.9 องศาเซลเซียส หากการถ่ายเทมวลสารไม่นำมาคิด ในการจำลองด้วย การทำนายที่ดีที่สุดคือที่ได้รับทั้งค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะที่ได้ จำลองที่ขึ้นอยู่กับสภาพของฟังก์ชันในการจำลอง



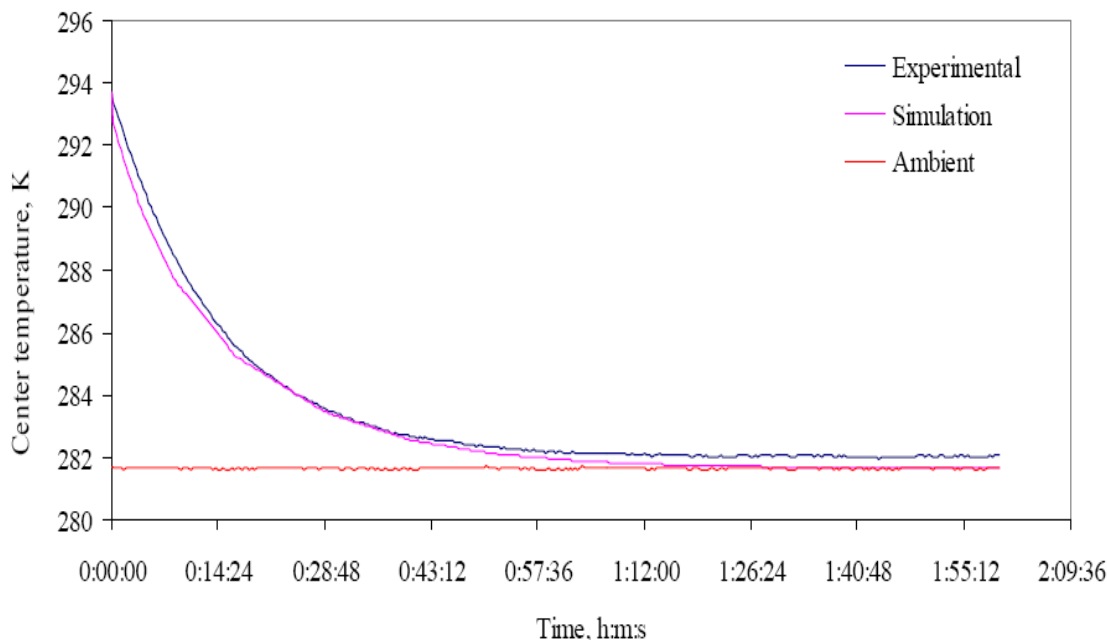
รูปที่ 4.2 รูปร่างเรขาคณิตของพายุไก่ ที่มา : Chen, Marks and Murphy (1999)



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิที่กึ่งกลางตัวอย่างเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร, แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบอย่างง่ายและข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ที่มา : Chen, Marks and Murphy (1999)

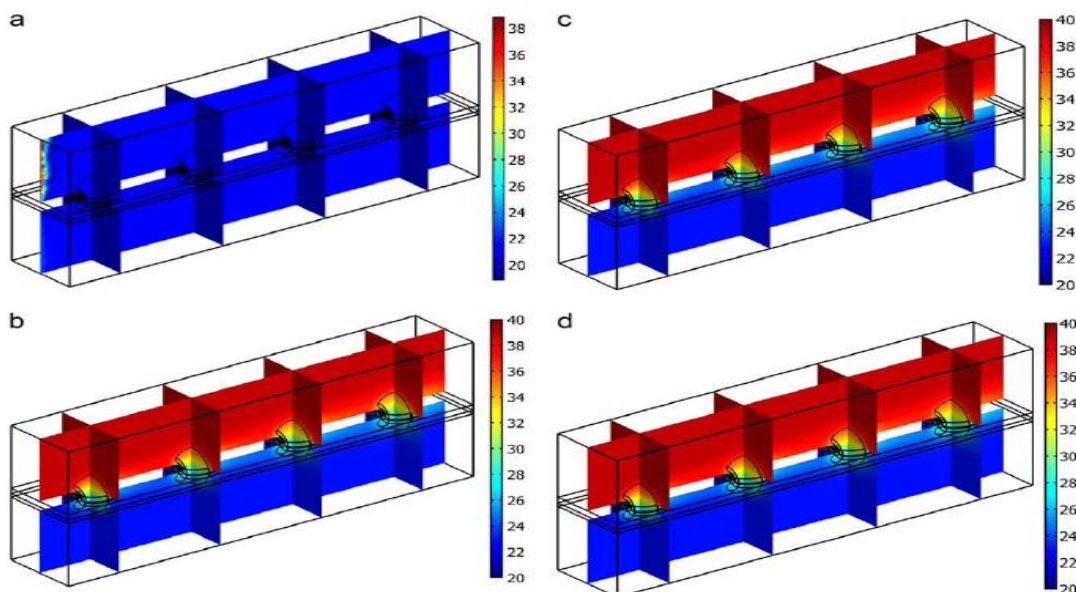
Kumar et.al. (2007) ได้ศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนของไข่ ซึ่งใช้ แบบจำลองการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (computational fluid dynamic, CFD) ได้ถูกพัฒนาเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิที่กึ่งกลางของวัตถุรูปไข่ที่ทำจากอลูมิเนียมภายใต้ สภาวะการพาอากาศเย็นแบบบังคับชั่วขณะ (transient forced air convection cooling) โดยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำถูกกระทำภายในของแข็งและการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนถูกกระทำในโดเมนของเหลว การทดสอบได้ดำเนินการบนไข่ที่อยู่ภายในห้องทดสอบของอุโมงค์ลมด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม 0.30 - 1.25 เมตรต่อวินาที และ 278.8-285.4 องศาเซลวิน ที่ทางเข้าของห้องทดสอบ ผลของแบบจำลองเปรียบเทียบ

กับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบแบบจำลอง ซึ่งค่า root mean square error ของอุณหภูมิที่กึ่งกลางของไข่ที่ทำนายโดยแบบจำลอง อยู่ระหว่าง 0.3-0.5 องศาเซลวิน เทียบกับผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองที่ความเร็วลม 1.25 เมตรต่อวินาที ที่มา : Kumar et.al. (2007)

Lu, Dev, Raghavan and Vigneault (2009) แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่รวมการนำและพา ถูกพัฒนาเพื่อทำนายอุณหภูมิของอากาศและผลผลิต (มะเขือเทศ) อยู่ภายในกำหนดออกแบบการทดลองตั้งค่าสำหรับใช้วัดความสม่ำเสมอของอากาศร้อนค่าการนำความร้อนของผลผลิตและความชื้นในอากาศมีผลอย่างมากต่อความสม่ำเสมอของการรักษาความร้อน โดยเฉพาะระดับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สร้างขึ้นในการออกแบบ ตำแหน่งมะเขือเทศมีความสำคัญต่อ ความยาวของอุโมงค์ ปัจจัยอื่นจะพิจารณาเมื่อออกแบบอุปกรณ์การทดลองดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วลมเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการรักษาความร้อนขณะการวางตัวของมะเขือเทศไม่มีผล การจำลองได้ทดลองตรวจสอบและพบว่าถูกต้อง ซึ่งวิธีนี้อาจจะมีการใช้ในผลผลิตอื่นๆ ผลของอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.5



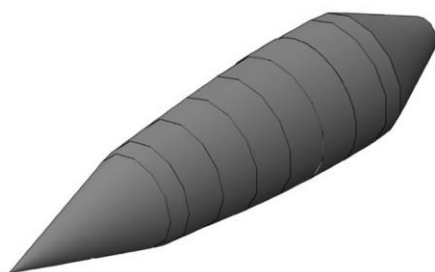
รูปที่ 4.5 แบบจำลองการทำความร้อนของมะเขือเทศที่อากาศร้อนขาเข้าที่ 39 องศาเซลเซียส สำหรับ ด้านบนและช่อง 23 องศาเซลเซียส สำหรับด้านล่าง อุณหภูมิเริ่มต้นของเครื่องและมะเขือเทศ เป็น 21 องศาเซลเซียส ที่ (a) เวลา = 0 ชั่วโมง, (b) เวลา = 5 ชั่วโมง, (c) เวลา = 23 ชั่วโมง, และ (d) เวลา = 48 ชั่วโมง ที่มา : Lu, Dev, Raghavan and Vigneault (2009)

4.2 การสร้าง และทดสอบแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน

4.2.1 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน คัดแปลงจาก Jain, et.al. (2005)

4.2.1.1 วัสดุ

1) อลูมิเนียมกลมตันทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 นิ้ว กลึงให้ได้ขนาดดังรูปที่ 3.18 ในบทที่ 3 ได้อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน

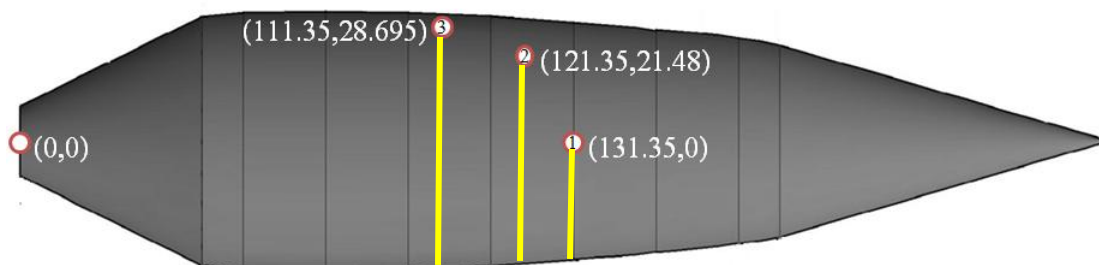
- 2) น้ำและน้ำแข็ง
- 3) กาวซิลิโคน

4.2.1.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่องลคอุณหภูมิตั้งด้วยน้ำ
- 2) สายเทอร์โมคัปเปิ้ล type K
- 3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (HIOKI 8422-51 MEMORY HI LOGGER, Japan)
- 4) ดอกสว่านสแตนเลส ยาว 12 เซนติเมตร
- 5) แท่นเจาะ
- 6) ปากกาจับเครื่องมือ

4.2.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมอุณหภูมิเนิขรูปร่างข้าวโพดหวาน โดยเจาะรูเพื่อเสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ลตามตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ดังรูป



รูปที่ 4.7 การเจาะรูตามตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3

- 2) เตรียมเครื่องลคอุณหภูมิตั้งด้วยน้ำ โดยใช้ น้ำแข็งเป็นตัวทำน้ำเย็น เปิดปั๊มทั้ง 2 ตัว เพื่อให้ น้ำกับน้ำแข็งเกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น และให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการที่ประมาณ 2 องศาเซลเซียส
- 3) เสียบสายเทอร์โมคัปเปิ้ล type K ที่เชื่อมต่อเครื่องบันทึกอุณหภูมิ มิกับแท่งอุณหภูมิเนิขรูปร่างข้าวโพดหวาน โดยทา กาวซิลิโคนให้รอบป้องกันน้ำเข้า
- 4) ลคอุณหภูมิตั้งด้วยน้ำเย็น ทั้งการไหลแบบจุ่ม และสเปร์ย์

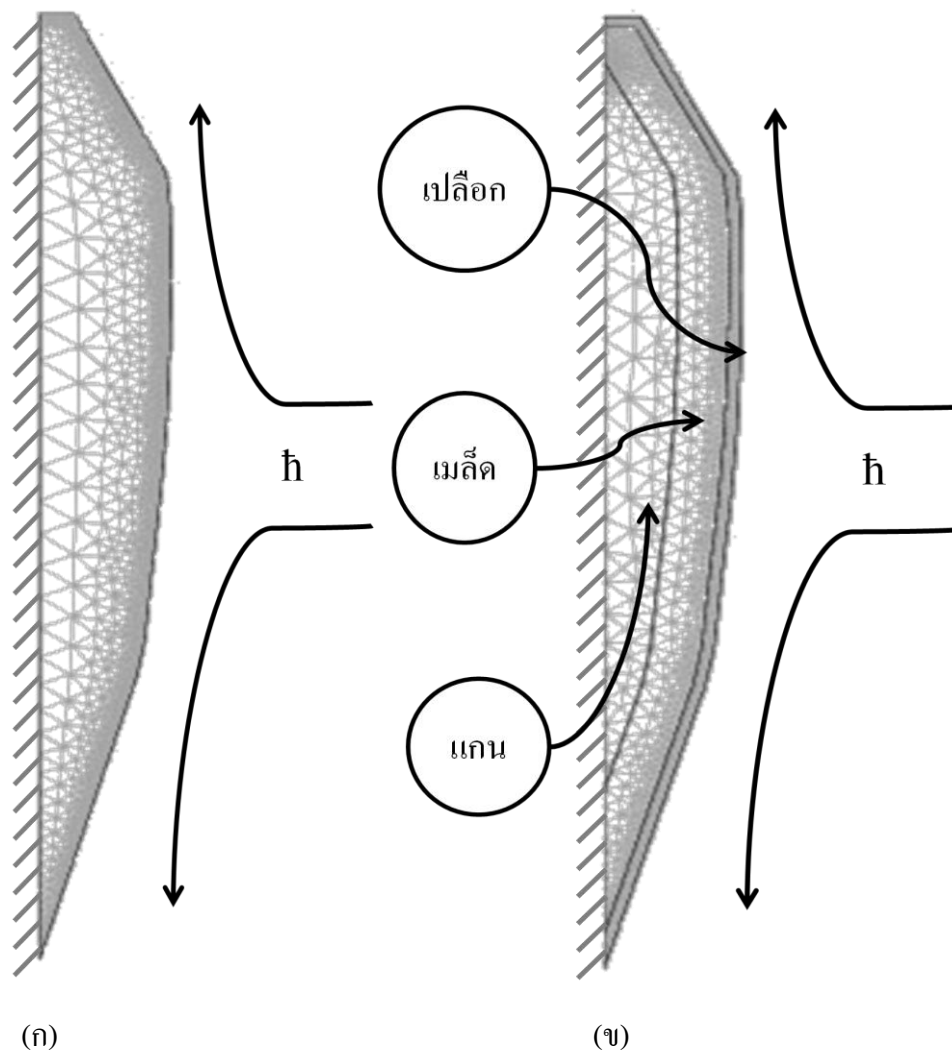
5) พิจารณาด้วยวิธี lumped-capacitance (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในมีค่าน้อยมาก) โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และสร้างเส้นแนวโน้มแบบ เอ็กโปเนนเชียล ได้รูปแบบสมการ คือ $\theta = \exp(-Ct)$ นำค่า C ที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) จากสูตร

$$h = \frac{C \rho_{al} C_{pal} V_{al}}{A_{al}} \quad (4.21)$$

เมื่อ	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	C	คือ สัมประสิทธิ์ในการลดอุณหภูมิ (s^{-1})
	V_{al}	คือ ปริมาตรของแท่งอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน (m^3)
	A_{al}	คือ พื้นที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน (m^2)
	ρ_{al}	คือ ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน (kg/m^3)
	C_{pal}	คือ ความร้อนจำเพาะของแท่งอลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)

4.2.2 แบบจำลองและการจำลอง

ในการศึกษาการลดอุณหภูมิเบื้องต้นของข้าวโพดหวาน หลักการขั้นพื้นฐานคือ มีการถ่ายเทความร้อนแบบการพาที่ผิวด้านนอก และการถ่ายเทความร้อนแบบการนำภายในข้าวโพดหวาน โดยจะสร้างแบบจำลองการทำงานอุณหภูมิของข้าวโพดหวานด้วยโปรแกรม Comsol Multiphysics 3.5 แบบจำลองในรูปแบบแกนสมมาตร 2มิติ (Axial symmetry, 2D) ได้รับการพัฒนาเพื่อ สร้างแบบจำลองการทำงานอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวัสดุ ภายใต้สภาวะการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ โดยคิดว่าจะทราบทุกระนาบค่าเท่ากัน เพื่อกำหนดปริมาณควบคุมเพื่อให้ง่ายขึ้นและลดเวลาการคำนวณ Mesh โดยแบ่ง Mesh ของอลูมิเนียมกับข้าวโพดหวานในรูปแบบเดียวกัน แต่ข้าวโพดหวานมีการแบ่งชั้นสำหรับ เปลือก เมล็ด และแกน แสดงในรูปที่ 4.8 กำหนดขนาดได้จากบทที่ 3 ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 4.8 Mesh ที่สร้างในแบบจำลอง (ก) อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวาน (ข) ข้าวโพดหวาน

การกำหนดขอบเขตจะกำหนดให้การถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนที่ผิวด้านนอกของวัสดุ และภายในวัสดุเป็นแบบการนำความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุเท่ากับ 28 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของน้ำเย็นเท่ากับ 2 องศาเซลเซียส เส้นขอบเขตด้านซ้ายมือ กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและเส้นขอบเขตด้านขวามือกำหนดเป็นการไหลของความร้อน ที่เกิดจากการพาความร้อน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหาได้จากหัวข้อ 4.2.1 มีค่าเท่ากับ 1557.27 และ 1451.89 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ สำหรับการไหลแบบจุ่มและสปรย์ ตามลำดับ กำหนดค่าสมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของวัสดุในแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อนของวัสดุในแบบจำลอง

สมบัติเชิงกายภาพและเชิงความร้อน	อลูมิเนียม	ข้าวโพดหวาน		
		เปลือก	เมล็ด	แกน
k (W/m \cdot °C)	160	0.167	0.256	0.105
ρ (kg/m 3)	2700	515.80	981.61	746.08
C_p (kJ/kg \cdot °C)	0.90	3.76>3.00	3.4>3.7	2.19

หมายเหตุ ค่าที่ขีดเส้นใต้ได้ถูกปรับแก้ด้วยแบบจำลอง

4.2.3 สมการควบคุม

แบบจำลองนี้ จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาผ่านไป สมการคือ

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (4.22)$$

4.2.4 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานต้องทราบสมบัติเชิงความร้อนของข้าวโพดหวานด้วย จึงใช้อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานขนาดเท่าข้าวโพดจริงซึ่งอลูมิเนียมนี้ทราบสมบัติเชิงความร้อนอยู่แล้ว จึง นำสร้างแบบจำลอง การทำนายอุณหภูมิของอลูมิเนียมก่อน เพื่อให้ทราบว่าแบบจำลองนี้ ควรนำมาใช้กับข้าวโพดหวาน หรือไม่ จากนั้นจึงนำ สมบัติเชิงความร้อน ของข้าวโพดหวานที่หาได้ในบทที่ 3 มาใช้ในแบบจำลอง สำหรับข้อมูลผลการทดลองการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของอลูมิเนียมใช้ข้อมูลเดียวกับการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และข้อมูลผลการทดลองการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวาน นั้นใช้ข้อมูลเดียวกับหัวข้อ 2.3.1 ในบทที่ 2 เมื่อสร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของทั้งอลูมิเนียมและข้าวโพดหวานแล้ว ต้องมีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบจากผลการทดลองที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลการเปรียบเทียบแสดงโดยค่า Root mean square of difference (RMSD) (Phil William, 2007) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum(O-P)^2}{N-1}} \quad (4.23)$$

RMSD คือ Root mean square of difference ($^{\circ}\text{C}$)

N คือ จำนวนของค่าอุณหภูมิ

O คือ อุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง ($^{\circ}\text{C}$)

P คือ อุณหภูมิที่ได้จากการทำนาย ($^{\circ}\text{C}$)

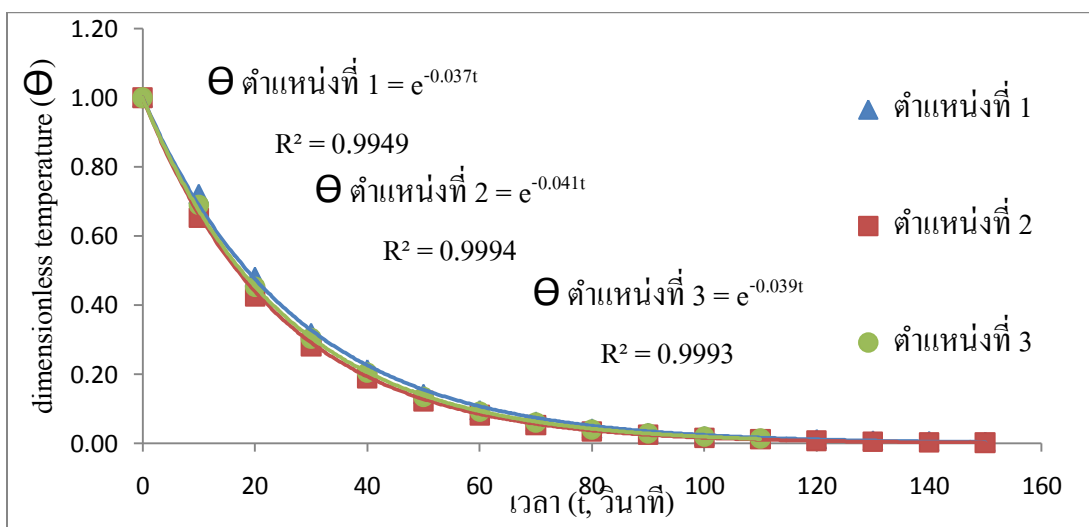
4.3 ผลการทดลอง

จากการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบจุ่ม เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ครั้งที่ 1 และ 2 แล้ว จะได้ค่า C เฉลี่ย จากสมการที่ได้จากการทดลอง ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 คือ 0.038 ± 0.002 แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 สำหรับการไหลแบบสเปรย์ค่า C เฉลี่ย คือ 0.035 ± 0.002 แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 นำค่านี้มาคำนวณในสมการที่ 4.21 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1557.27 และ $1451.89 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ตามลำดับ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มาคำนวณหา Biot number ได้เท่ากับ 0.17 และ 0.15 สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ตามลำดับ แสดงว่าการพิจารณาด้วยวิธี lumped-capacitance นั้นยังเป็นค่าที่คลาดเคลื่อนจากค่าจริงเล็กน้อย (แท่งอลูมิเนียมขนาดเท่าข้าวโพดหวานจริงซึ่งมีขนาดใหญ่) แต่เมื่อนำไปแทนค่าในแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของอลูมิเนียมแล้วพบว่า มีค่าที่ผิดพลาดเพียง 0.69 และ 1.56 องศาเซลเซียส สำหรับการไหลแบบจุ่ม และสเปรย์ ตามลำดับ ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของอลูมิเนียมนั้นถูกต้อง สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแบบจำลองนี้ไปใช้กับข้าวโพดหวานจริงได้ จึงนำมาสร้างแบบจำลองทำนายอุณหภูมิตรงกลางของข้าวโพดหวาน โดยอุณหภูมิจะลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ใน ชั่วโมงที่ 2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยสุ่มค่าของอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน 3 ฟัก สำหรับการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ ในฝักที่

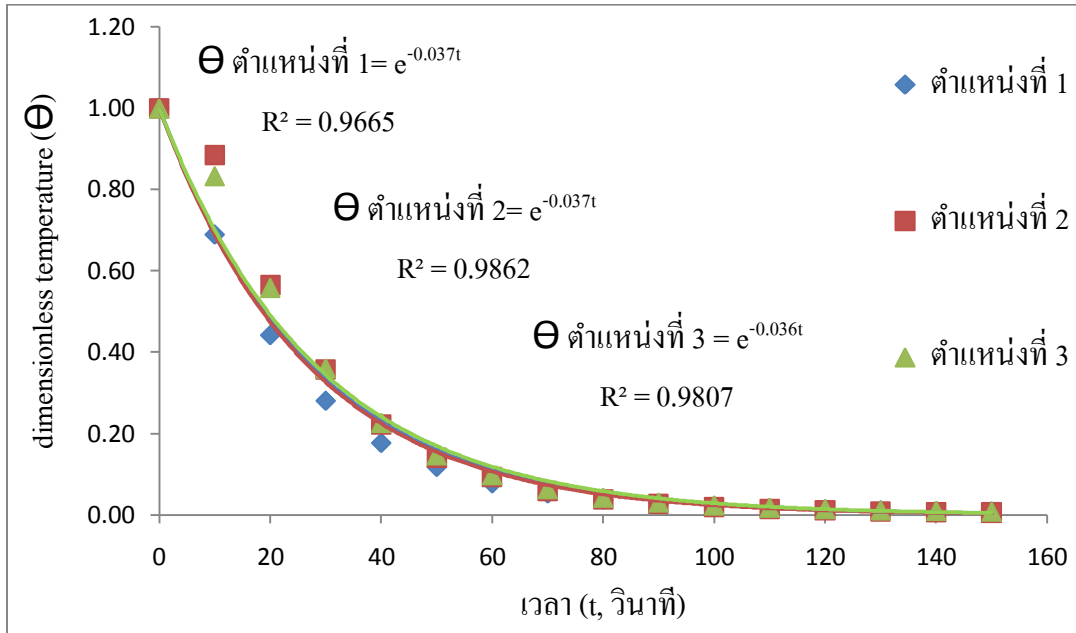
1, 2 และ 3 มีค่าที่ผิดพลาดเพียง 0.41, 0.58, 2.91, 0.77, 1.85 และ 0.07 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งผลที่ปรับแก้ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดและเปลือกตามตารางที่ 4.1

4.4 สรุปผลการทดลอง

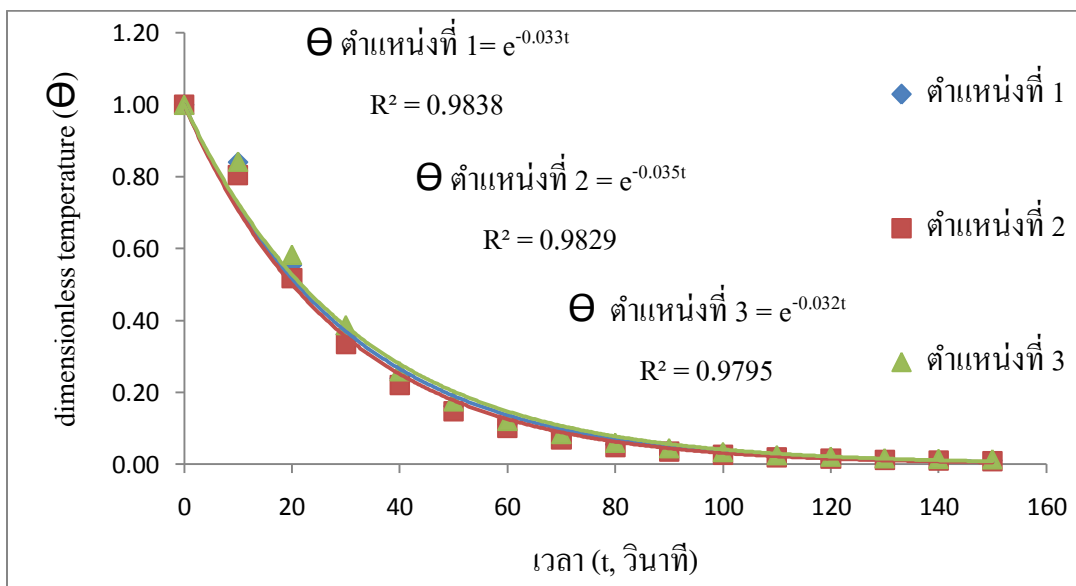
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สำหรับการไหลแบบจุ่ม นั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าการไหลแบบสเปรย์ เพราะพื้นผิว อลูมิเนียมรูป ข้าวโพดหวานมีการ สัมผัสกับน้ำอย่างเต็มที่มากกว่า แต่ก็ไม่ต่างกันมากนักเพราะเครื่องลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำ นั้นออกแบบมาให้ น้ำสเปรย์ทั่วตะกร้าข้าวโพดหวานจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงการไหลแบบจุ่ม เมื่อสร้างแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำทั้งการไหลแบบจุ่มและสเปรย์ โดยกำหนดขนาดให้เท่าข้าวโพดจริง ดังรูปที่ 3.18 นำค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะของข้าวโพดหวาน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองในบทที่ 3 กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิน้ำ ให้ตรงกับสภาวะการทดลอง จริง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หาได้ในข้างต้น ในตอนแรกค่าความผิดพลาดมีค่ามากจึงทำการปรับแก้ค่าความร้อนจำเพาะ ในขณะที่ตัวแปรอื่นยังคงเดิมทำให้แบบจำลองนั้นถูกต้องมากขึ้น



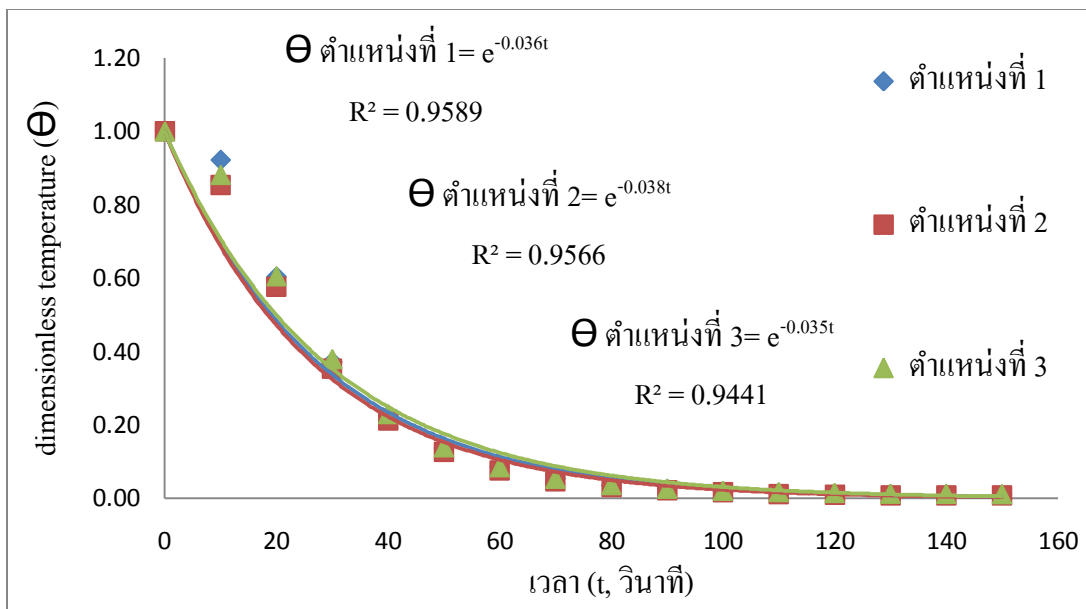
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ของ อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบจุ่ม ครั้งที่ 1



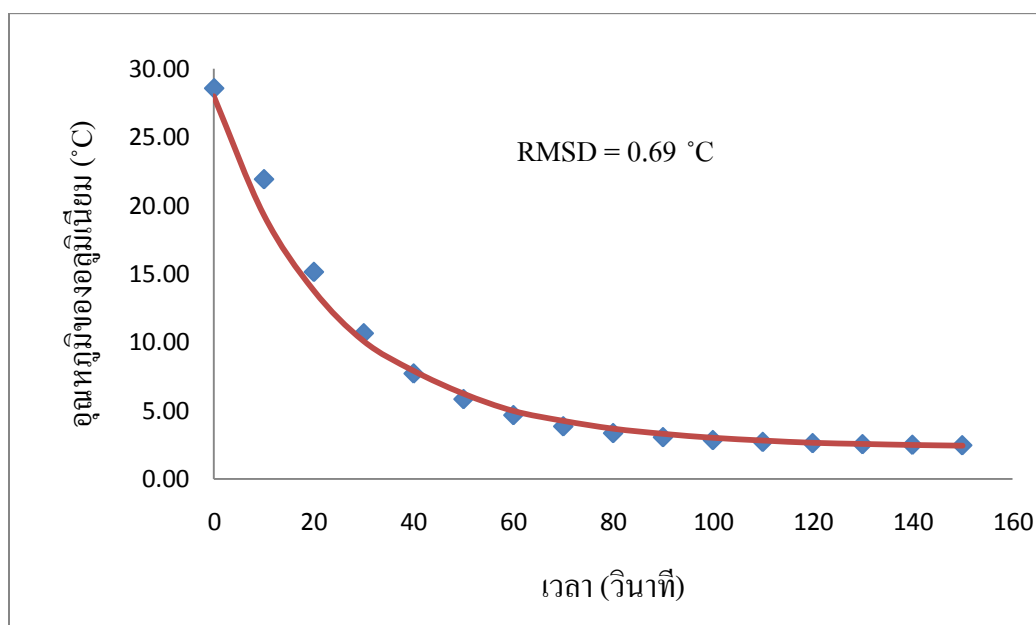
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ของ อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบจุ่ม ครั้งที่ 2



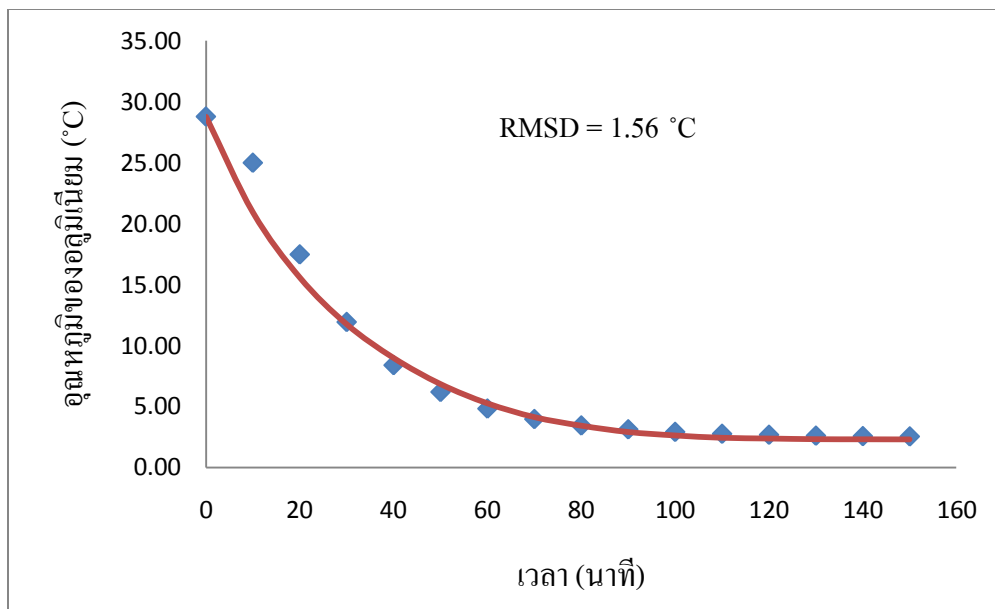
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ของ อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบสเปรย์ ครั้งที่ 1



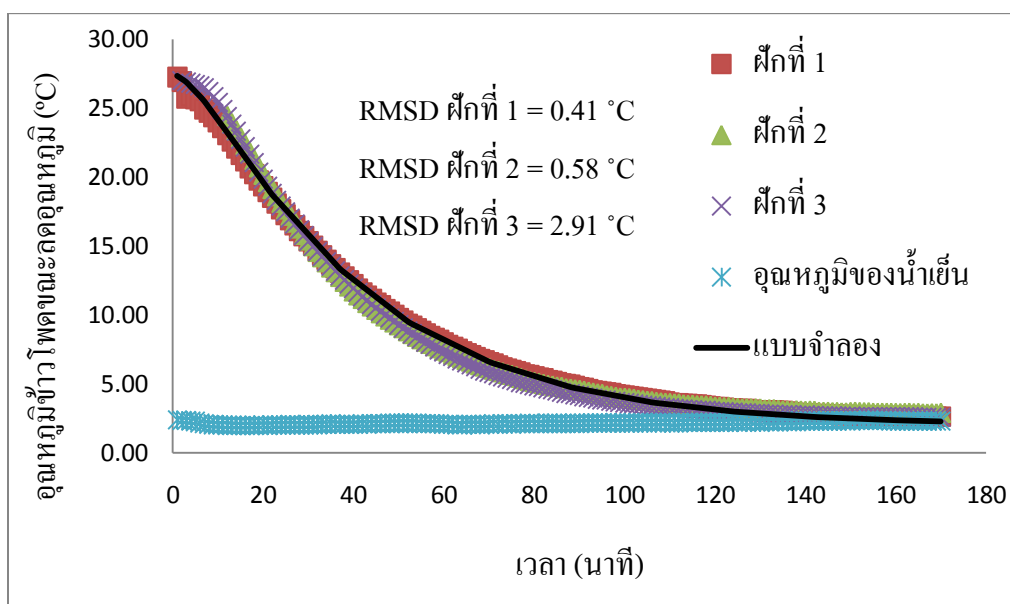
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dimensionless temperature กับเวลาในการลดอุณหภูมิ ของ อลูมิเนียมรูปข้าวโพดหวานที่การไหลแบบสเปร์ย์ ครั้งที่ 2



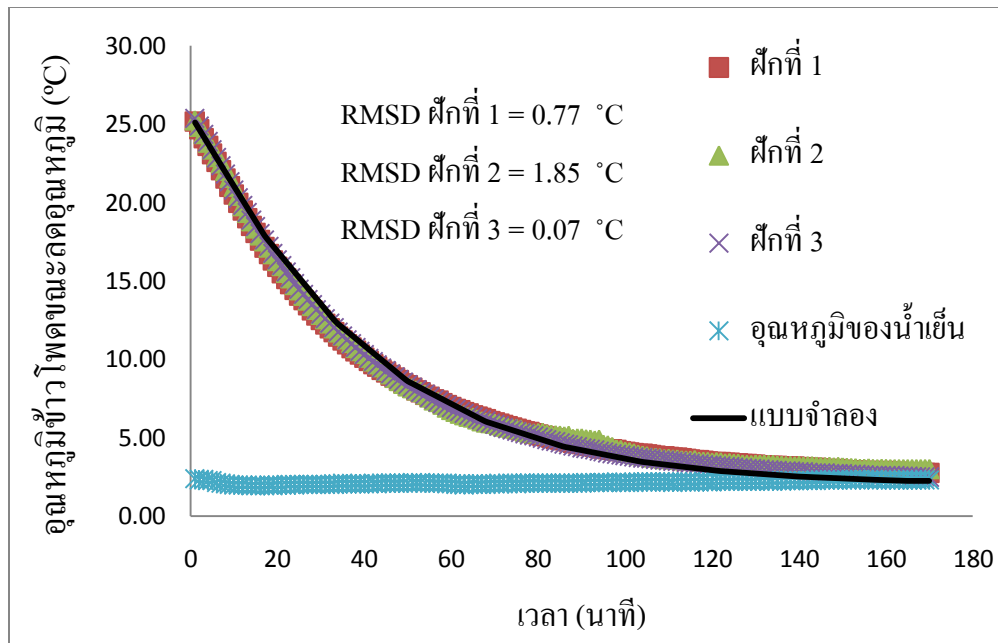
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลด อุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของอลูมิเนียมข้าวโพดหวานในส่วนของแกนที่การไหลแบบจุ่ม



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของอลูมิเนียมขาวโพคหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบสเปร์ย์



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของขาวโพคหวนในส่วนของแกนที่การไหลแบบจุ่ม

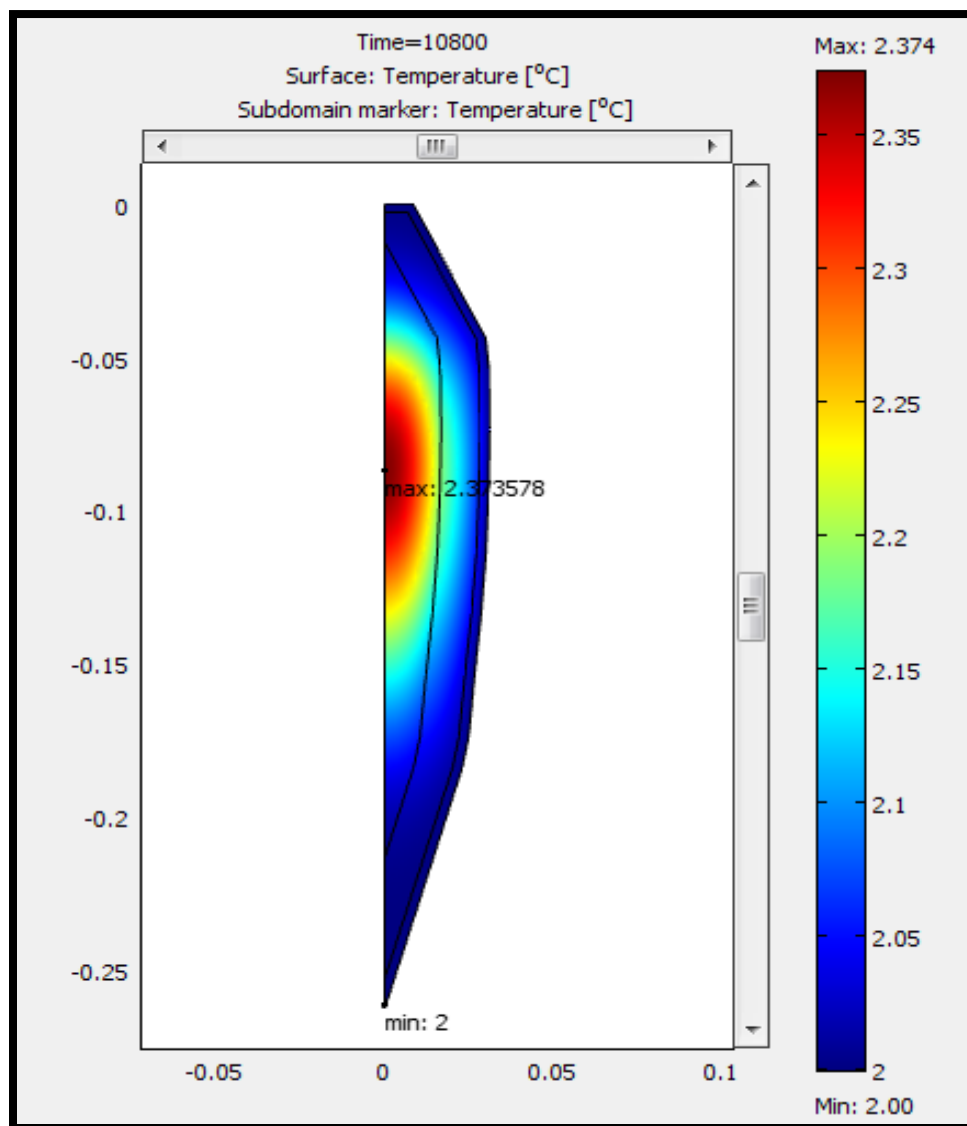


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของแบบจำลองและผลการทดลองในการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำของข้าวโพดหวานในส่วนของแกนที่การไหลแบบสเปรย์

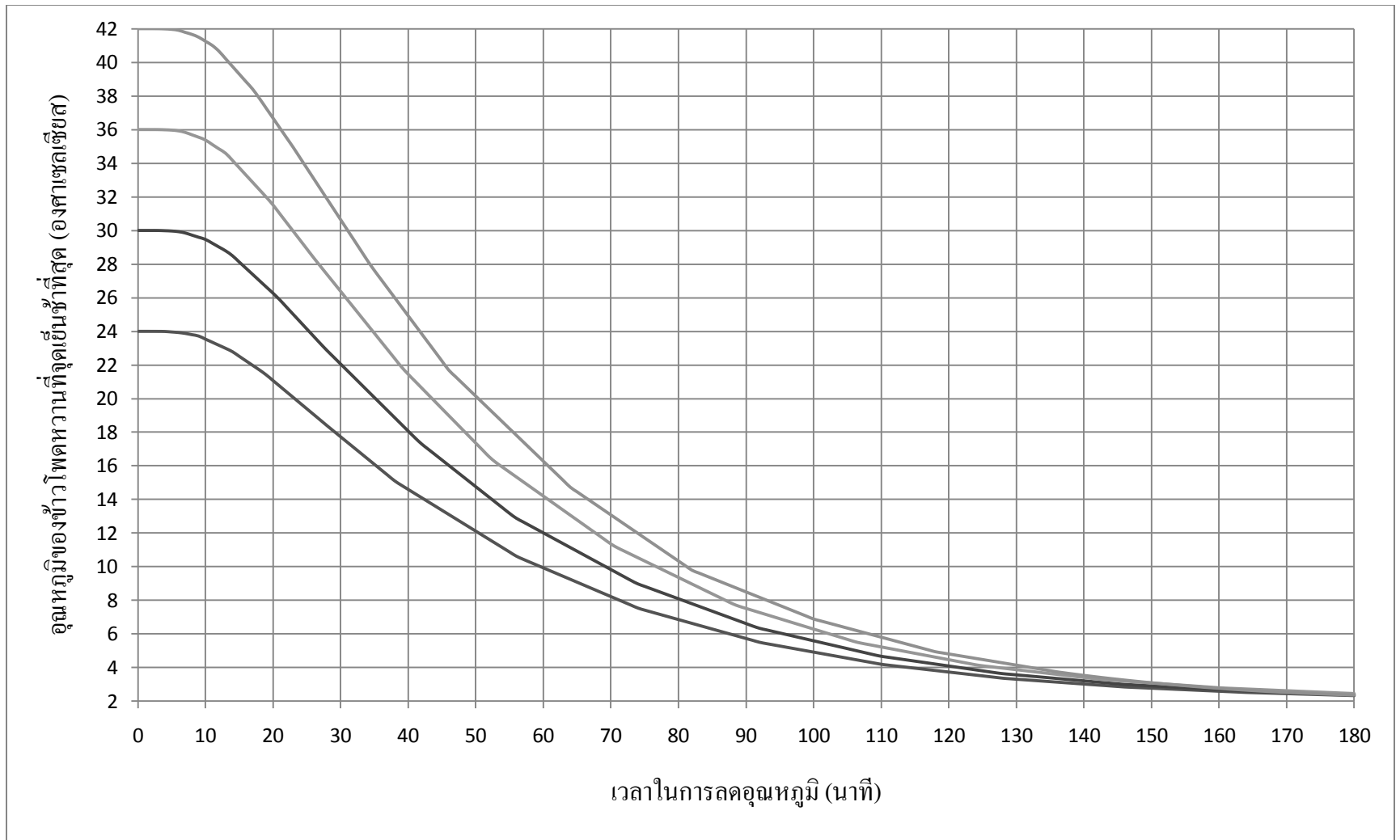
4.5 ข้อเสนอแนะจากแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวาน

แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานขณะลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำทั้งการไหลแบบจุ่มและแบบสเปรย์เป็นตัวช่วยในการบอก ค่าแนะนำของระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกัน โดยค่าจากแบบจำลองที่แสดงนี้ นำค่าจากจุดที่เย็นช้าที่สุดของข้าวโพดมาใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งระยะเวลาในการลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่างกันนั้น ไม่มีผลเท่าใดนักแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 โดยตัวอย่าง การคำนวณ half-cooling time, 3/4 cooling time และ 7/8 cooling time จากกราฟค่าแนะนำของระยะเวลาในการลดอุณหภูมิแสดงได้ในหัวข้อ 2.1.4 ในบทที่ 2 ที่การไหลแบบจุ่ม ข้าวโพดหวานที่ 24 องศาเซลเซียส นำไปลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส half-cooling time, 3/4 cooling time และ 7/8 cooling time เท่ากับ 46.48, 74.42 และ 102.44 นาที ตามลำดับ ส่วน ข้าวโพดหวานที่ 42 องศาเซลเซียส ได้ half-cooling time, 3/4 cooling time, 7/8 cooling time เท่ากับ 45.44, 73.96 และ 99.38 นาที ตามลำดับ ส่วนที่การไหลแบบสเปรย์นั้น ข้าวโพดหวานที่ 24 องศาเซลเซียส half-cooling time, 3/4 cooling time และ 7/8 cooling time เท่ากับ 46.57,

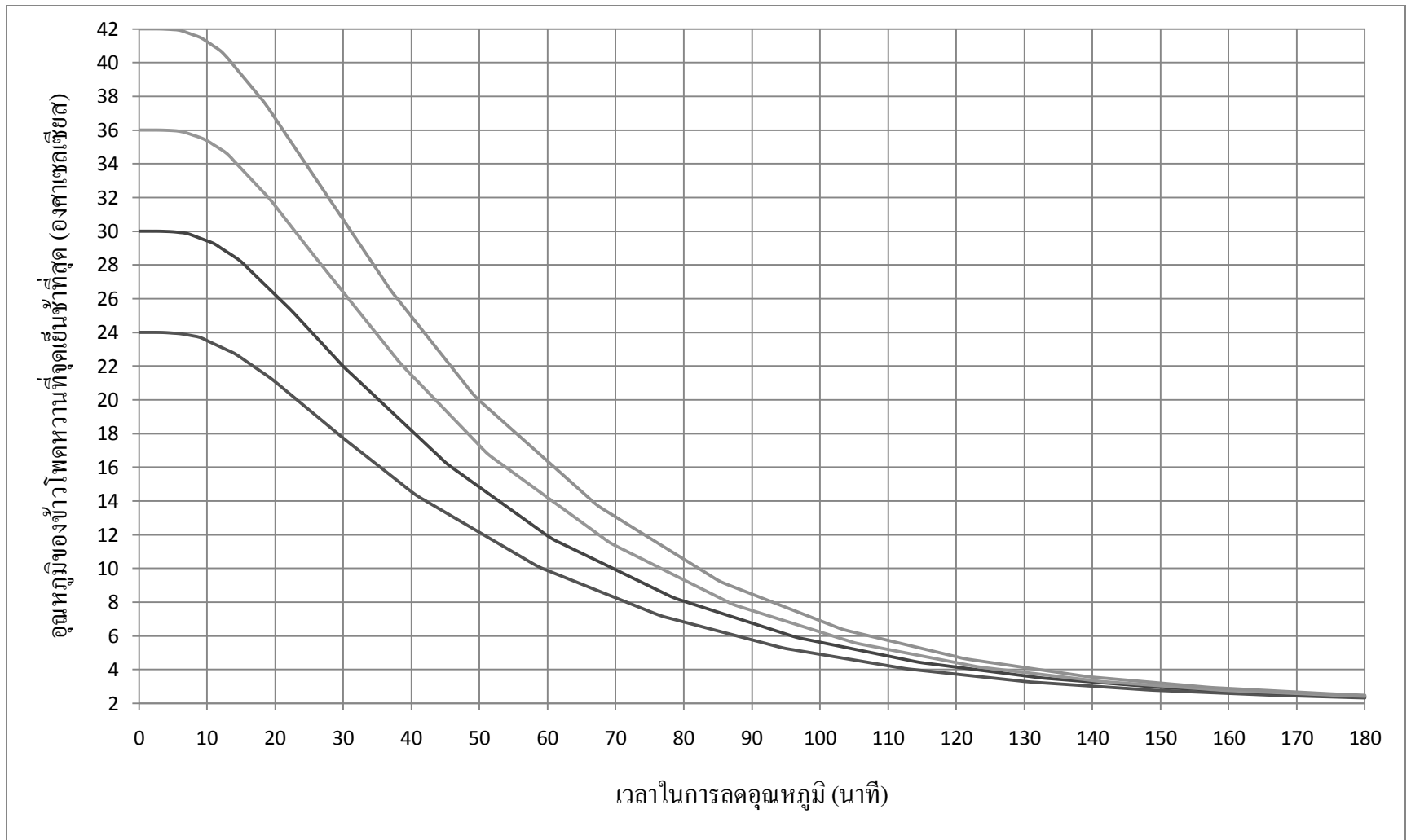
74.75 และ 102.57 นาที ตามลำดับ ส่วน ข้าวโพดหวานที่ 42 องศาเซลเซียส ได้ half-cooling time, 3/4 cooling time และ 7/8 cooling time เท่ากับ 45.80, 74.24 และ 99.47 นาที ตามลำดับ ค่าที่คำนวณได้ต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยข้าวโพดที่อุณหภูมิสูงกว่าจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิน้อยกว่า แต่ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.17 จุดเย็นช้าที่สุด และจุดเย็นเร็วที่สุด ของข้าวโพดหวานเมื่อลดอุณหภูมิไปแล้ว 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 กราฟค่าแนะนำระยะเวลาในการลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันที่การไหลแบบจุ่ม



รูปที่ 4.19 กราฟค่าแนะนำระยะเวลาในการลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างกันที่การไหลแบบสเปร์ย์

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบ ระบบการลดอุณหภูมิเบื้องต้นด้วยน้ำเย็นของข้าวโพดหวาน ซึ่งกำหนดให้มี 2 รูปแบบการไหล คือ แบบจุ่ม และสเปรย์ ที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่าข้าวโพดหวานเมื่อทำการลดอุณหภูมิ และเก็บรักษา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสแล้ว ยังคงคุณภาพไว้ได้ทั้งความหวาน ความสด และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ทั้งแบบจุ่ม และสเปรย์ ระหว่างการลดอุณหภูมินั้น การไหลแบบจุ่มจะมีการลดลงของอุณหภูมิที่เร็วกว่าการไหลแบบสเปรย์เล็กน้อย แสดงได้ในค่า half cooling time และ 7/8 cooling time สำหรับการไหลแบบจุ่ม ค่า half cooling time เท่ากับ 30.71 , 21.00 และ 3.29 นาที และ 7/8 cooling time เท่ากับ 82.05 , 63.01 และ 44.51 นาที สำหรับการไหลแบบสเปรย์ ค่า half cooling time เท่ากับ 41.50, 34.66 และ 21.15 นาที และ 7/8 cooling time เท่ากับ 114.46, 103.97 และ 94.11 นาที ในส่วนของแกน เมล็ด และเปลือก ตามลำดับ

ส่วนแบบจำลองการทำนายอุณหภูมิของข้าวโพดหวานนั้นจะต้องทราบคุณสมบัติของข้าวโพดหวาน คือ ค่าการนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และ ความหนาแน่น โดยค่าการนำความร้อนของเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือเปลือกและแกน ตามลำดับ คือ 0.256 ± 0.086 , 0.167 ± 0.018 และ 0.105 ± 0.033 W/m $^{\circ}$ C ที่ 25 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะ ของเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือเปลือกและแกน ตามลำดับ คือ 3.70, 3.00 และ 2.19 kJ/kg $^{\circ}$ C ที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งทำการปรับแก้ค่าแล้วจากแบบจำลอง และความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ แกนและ เปลือกตามลำดับ 0.98 ± 0.05 , 0.75 ± 0.05 และ 0.52 ± 0.08 g/cm 3

นอกจากนี้เรายังต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนความร้อนของระบบอีกด้วย ซึ่งการไหลแบบจุ่ม นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า การไหลแบบสเปรย์ คือ 1557.27 และ 1451.89 W/m 2 $^{\circ}$ C ตามลำดับ นำค่าเหล่านี้ไปใส่ในแบบจำลองและเปรียบเทียบ อุณหภูมิของข้าวโพดหวาน 3 ผัก สำหรับแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองของรูปแบบการไหลแบบ จุ่มค่า

ความผิดพลาดเท่ากับ 0.41, 0.58 และ 2.91 °C ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการไหลแบบ สเปรย์ ค่าความผิดพลาดเท่ากับ เท่ากับ 0.77, 1.85 และ 0.07 °C ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะก็คือควรมีการตรวจสอบคุณภาพโดยเฉพาะความหวาน ที่ระยะการเก็บรักษาต่างกัน อาจจะเก็บนานขึ้น 14 และ 21 วัน และที่เวลาในการลดอุณหภูมิที่ half-cooling time, 3/4 cooling time และ 7/8 cooling time เพื่อให้ทราบว่าคุณภาพของข้าวโพดหวานแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เพราะถ้าใช้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิน้อยจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น เวลาในการคั่วหมูนกก็น้อยลง

บรรณานุกรม

- โชคชัย เอกทัศนาวรรณ, สรรเสริญ จำปาทอง , ชไมพร เอกทัศนาวรรณ , นพพงศ์ จุลจอหอ , นัทรพงศ์ บาลลา, ทศพล ทองลาภ และ ธวัช ศรีเปาระยะ. 2553. การวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าวโพดหวาน สำหรับตลาดผักสดและอุตสาหกรรมแปรรูป . [Online] . Available : http://www.rdi.ku.ac.th/Techno_ku60/res-01/index01-2.html
- คนัย บุญยเกียรติ และ นิธิยา รัตนานพนนท์ . 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ . กรุงเทพฯ. โอเดียนสโตร์. 146 น.
- คนัย บุญยเกียรติ. 2553. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ [Online] . Available : http://e-service.agri.cmu.ac.th/course/course_lecture_download.asp?CourseNO=359403&CID=423
- คาราวรรณ ทวีศักดิ์บวรกุล. 2553. ข้าวโพดหวาน. [Online] . Available : http://www.doae.go.th/library/html/2549/0709/Sweet_corn/U1.htm
- เต็มสุข แดงหอม, สิริรัตน์ พานิช, กฤษณา ปิวสาร, จุฑาทิพย์ นิลคูหา, วงศ์วลี ทองดอนจ้าว และ ณรงค์ศักดิ์ เจริญศิริ. 2547. **Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Differential Thermal Analysis (DTA)**. [Online] . Available : http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html
- ทัศนัย บุญเกิดรัตนสกุล , นริส ประทินทอง และณัฐ กาศยปนนท์ . 2550. การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างด้วยหัววัดแบบขดลวดร้อน . การประชุมวิชาการ ด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1 จัดโดย คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ 31 สิงหาคม 2550 โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ.
- ทวีศักดิ์ ภู่อำ. 2540. ข้าวโพดหวาน: การปรับปรุงพันธุ์และการปลูกเพื่อการค้า. กรุงเทพฯ. โอเดียนสโตร์. 188 น.

- เทคโนโลยีชาวบ้าน. 2551. ข้าวโพดหวานของไทย อนาคตยังไปได้ ตลาดนอกมี [Online] . Available : http://siweb.dss.go.th/qa/search/search_description.asp?QA_ID=775.
- นครินทร์กรุงเทพ จำกัด. 2553. ปุ่มหอยโข่งไฟฟ้า โคจิม่า (KOJIMA). [Online]. Available : <http://www.nakarinbangkok.com/index.php?mo=3&art=184053>
- นิพนธ์ ไชยมงคล . 2553. การลดอุณหภูมิเย็บปล้น (Pre-cooling) . [Online] . Available : <http://natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510-111web/exercise/My%20Web111-Activity5/images/precooling.pdf>
- ปานมนัส ศิริสมบูรณ์, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ สาทิป รัตนภาสกร. 2538. สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีววัสดุ . กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปัญญา. 2553. มาร์จัก.. ชนิดของข้าวโพดหวาน. [Online] . Available : http://it.doa.go.th/pibai/pibai/n11/v_11-feb/korkui.html
- ปิยะวัต บุญ -หลง, ชัชวาล ตันชากิตติ และ ประสงค์ อิงสุวรรณ . 2531. การลดอุณหภูมิผลิตผลการฝึกอบรม เรื่อง **Improvement of Postharvest Techniques to Reduce Losses of Perishable Commodities Produced in the Highlands of Northern Thailand**, 10-13 ตุลาคม 2531. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ไพศาล หิรัญมาศสุวรรณ. 2553. เทคนิคการปลูกข้าวโพดหวาน. [Online] . Available : http://www.pacthai.co.th/knowledge_base/sweetcorn.htm
- มณฑล สุกใส. 2553. ค่าความร้อนจำเพาะ. [Online] . Available : http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/heat_transfer/specific_heat.htm
- เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด. 2553. **Specific heat**. [Online] . Available : http://us.mt.com/global/en/home/supportive_content/product_documentation/product_brochures/stare_specific_heat_datasheet.rxHgAwXLuMvM.MediaFileComponent.html/51724808.pdf
- บริษัท โคมอส คอร์ปอเรชั่น จำกัด. 2553. **ICE BOX**. [Online] . Available : <http://www.comosthailand.com/category.asp?pageNo=4&catid=22>

ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2548. **ผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวาน : ไทยส่งออกอันดับ 3 ของโลก.** [Online].

Available : <http://www.positioningmag.com/prnews/prnews.aspx?id=38075>.

ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2553. **ข้าวโพดหวานปี '52 : ส่งออกลดลง...ไทยต้องเร่งแก้ปัญหา(มองเศรษฐกิจฉบับที่ 2615).** [Online]. Available :

www.igetweb.com/www/mtmultimedia/private_folder/pdf/2615.doc

สายชล เกตุษา. 2528. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 364น.

สุกัลยา ภู่อทองและคณะ. 2548. **การยืดอายุการเก็บรักษาข้าวโพดหวานโดยการลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น** [Online]. Available :

[http://dcms.thailis.or.th/dcms/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=61622&display=list_subject&q=Granular%20Activated%20Carbon%20\(GAC\)](http://dcms.thailis.or.th/dcms/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=61622&display=list_subject&q=Granular%20Activated%20Carbon%20(GAC)).

สำนักบริการคอมพิวเตอร์, 2550. **หลักการออกแบบระบบให้น้ำแก่พืชแบบฉีดฝอย ตอนที่2.** [Online].

Available : <http://www.ku.ac.th/e-magazine/nov50/agri/water2.htm>

อัครเดช สิ้นธุภักดิ์ . 2547 . **การทำความเย็น** . กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกฉนัย กอกิมพงษ์. 2550. **เครื่องหมุนเหวี่ยง.** [Online]. Available :

http://www.thaiscience.com/lab_vol/P21/centrifuge.asp.

ASTM C 518, 2004. **Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus**, Vol. 04, No. 06, Annual Book of ASTM Standards, pp. 158-172.

ASTM D 5334, 2004. **Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure**, Vol. 04, No 09, Annual Book of ASTM Standards, pp. 225-229.

A. Bejan 1993. **Heat Transfer**. Wiley.

Bowman, R.C. 1970. **Thermal conductivity of cooked foods**. M.Sc. Thesis, Leeds University, UK.

Boyette, M.D., Wilson, L.G., Estes, E.A., 1990. **Postharvest Cooling and Handling of Sweet Corn**. Extension Service State Agrícola N.C. State University, Raleigh, pp. 413-414.

Boyette, Estes and Rubin. 2010. **hydrocooling**. [Online]. Available :

<http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/publicat/postharv/ag-414-4/index.html>

Bryan R. Becker and Brian A. Fricke. 2002. “hydrocooling time estimation method”. **Heat Mass Transfer**. 2(29) : 165-174.

Califano, A.N. and Calvelo, A., 1991, Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100 C, **Journal of Food Science**, Vol. 56, No. 2, pp. 586-589.

Caslaw H.S. and J.C. Jaeger, 1964, **Conduction of Heat in Solids**, 2 ed, Oxford Press, 58-60, pp. 344-345.

Choi, W. and Okos, M.R., 1986, “Food Engineering and Process Application,” London, **Elsevier Applied Science Publishers**, pp. 96-102.

Chang, C.S., 1986, “Thermal Conductivity of wheat, Corn and Grain Sorghum as Affected by Bulk Density and Moisture Content,” **Transaction of The American Society Agriculture Engineering**, Vol. 29, No, 5, pp. 1447-1450.

Charm, S. 1978. **The fundamentals of food engineering**. AVI, Westport, CT. pp 164.

Chandra, P. K., & Singh, R. P. 1995. **Applied numerical methods for food and agricultural engineers** pp. 163-167. Boca Raton, FL:CRC Press.

Clement Vigneault, Bernard Goyette, Yvan Gariépy, Patrick Cortbaoui, Marie Therees Charles and Vijaya G.S. Raghavan, “Effect of ear orientation on hydrocooling performance and quality of sweet corn”, **Postharvest Biology and Technology**, Vol. 43, 2007, pp. 351-357.

COMSOL, Inc. 1998-2010. **Model Library**

COMSOL, Inc. 1998-2010. **USER'S GUIDE**

Dilip Jain, Syed Mohammad Ilyas, Pankaj Pathare, Suday Prasad and Hardial Singh. “Development of mathematical model for colling the fish with ice”. **Journal of Food Engineering**. 71(2005) : 324-329.

- Dilip Jain and Pankaj Pathare, "Modelling of the Internal cooling of fish during Ice Storage ".
International Journal of Food Engineering, Vol. 3(2007), Iss. 4, Art.4.
- Dincer, I. (1995a). **Cooling parameters and film conductances of spherical products cooled in airflow**. *Applied Energy*, 50: 269-280.
- Dincer, I. (1995b). Air flow precooling of individual grapes. **Journal of Food Engineering**, 26: 243-249.
- Dincer, I., Yildiz, M., Loker, M., Gun, H. (1992). Process parameters for hydrocooling apricots, plums and peaches. **International Journal of Food Science and Technology**, 27: 347-52.
- Dinçer, I. (ed) 1997. **Heat Transfer in Food Cooling Applications**. Taylor & Francis, Washington, DC. 399 p.
- FCRI online. 2551. พันธุ์ข้าวโพดหวาน. [Online] . Available :
<http://210.246.186.28/fieldcrops/vcorn/var/003.HTM>
- F.P. Incropera and D.P. DeWitt. 1996. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 4th ed., John Wiley & Sons.
- Gariépy, Y., G.S.V., Raghavan and R. Thériault. 1987. Cooling characteristics of cabbage. **Canadian Agricultural Engineering**, CSAE, Vol. 29(1): 45-50.
- Golob, P., Farrell, G., Orchard, J.E. (Eds.), 2002. **Postharvest Science and Technology, Principles and Practices**, vol. 1. Blackwell Science, p. 554.
- Goyette, B., C. Vigneault, B. Panneton and G. S. V. Raghavan. 1996. Method to evaluate the average temperature at the surface of a horticultural crop. **Canadian Agricultural Engineering**. 38(4): 291-295.
- Gross, K., Wang, C.Y., Saltveit, M., 2004. The commercial storage of fruits, vegetables, and nursery stocks. **Agriculture Handbook number 66**. USDA/ARS, Beltsville, MD, USA,
<http://usna.usda.gov/hb66/contents.html>.
- Guillou, R. 1958. Some engineering aspects of cooling fruits and vegetables. *Trans. of the ASAE*. 1(1): 38-39.

- H. Chen, B.P. Marks and R.Y. Murphy, "Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties," **Journal of Food Engineering**, vol. 42, 1999, pp. 139–146.
- Heldman, D.R. and Singh, R.P., 1961, "**Food Processing Engineering**," second edition, Connecticut, AVI Publishing, pp. 129-250.
- Heldman, D.R. and Singh, R.P., 1981, "**Food Processing Engineering**," 2nd ed., AVI Publishing, Connecticut, pp. 129-250.
- Incropera; DeWitt, Bergman, Lavine (2007). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer** (6th edition ed.). John Wiley & Sons. pp. 260–261.
- Jianbo Lu a,* , S.R.S. Dev a, G.S. Vijaya Raghavan a, Clement Vigneault a,b. 2009. "Simulation of a forced-air-twin-chamber for measuring heat treatment uniformity in harvested tomatoes". **Journal of Food Engineering**, 95 (2009) 636–647.
- Kader, A.A. (Ed.), 2002. **Postharvest Technology of Horticultural Crops**, 3rd ed. Coop. Ext. Uni. of Ca. Division of Agriculture and Natural Resources. Univ. of CA, Davis, CA. Publ. no. 3311, 535 p.
- Kays, J.S. (ed) 1997. **Postharvest physiology of perishable plant products**. Eaton Press, Athens, Georgia. 532p.
- Kustermann, M., Scherer, R. and Kutzbach, H.D., 1981, "Thermal Conductivity and Diffusivity of Shelled Corn and Grain," **Journal of Food Process Engineering**, Vol. 4, No. 1, pp. 137-153.
- Mohsenin, N.N., 1980, **Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials**, New York, Gordon and Breach Science Publisher.
- Nesvadba, P., 1982, "Methods for the Measurement of Thermal Conductivity and Diffusivity of Food Stuffs," **Journal of Food Engineering**, Vol. 1, No. 1, pp. 23-113.
- P. Cortbaoui. 2005. **ASSESSMENT OF PRECOOLING TECHNOLOGIES FOR SWEET CORN**. Department of Bioresource Engineering. Thesis, McGill University, Canada.

- Phil William. 2007. **Near-infrared Technology Getting the Best Out of Light : A Short Course in the Prsctical Implemetation of Near-infrared Spectroscopy for the User.** 5th ed., PDK Projects, Inc.
- Rahman, M.S., 1992, "Thermal Conductivity of Four Food Materials as a Single Function of Porosity and Water Content," **Journal of Food Engineering**, Vol. 15, No. 4, pp. 261-268.
- Rahman, S. 1995. Food Properties Handbooks. CRC Press, Florida, p.192.
- Ramaswamy, H.S. and Tung, M.A., 1981, "Thermophysical Properties of Apples in Related to Freezing," **Journal of Food Science**, Vol. 46, No. 3, pp. 724-728.
- Rapasas, R.S. and Driscoll, R.H., 1995, "Thermophysical Properties of fresh and Dried White Onion Slices," **Journal of Food Engineering**, Vol. 24, pp. 149-164.
- Rao, M.A. and Rizvi, S.S.H. 1985. Engineering properties of foods. New York : Marcel Dekker
- Romphophak, T. 2007. Postharvest quality of sweet corn stored in ice, after hydrocooling. **Australasian Postharvest Conference.** 10-12 September 2007, Crown Plaza Terrigal, NSW, Australia. p : 69.
- Sastry, S.S. 1985. **Introductory Methods of Numerical Analysis.** Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., New Delhi.
- Siebel, J. E. 1982. Specific heat of various products. **Ice Refrigeration**, 2: 256-257.
- Singh, R.P. and A. Chakraverty. (eds). 2001. **Postharvest technology: cereals, pulses, fruits and vegetables.** Science Publishers Inc. Enfield, NH, USA. 356p.
- Singh K.K. and Goswami T.K. "Thermal properties of cumin seed". **Journal of Food Engineering.** 45(2005) : 181-187. Ramaswamy and Tung (1981)
- Stanby, E.M., 1963, "**Industrial Fishery Technology**," New York, Reinhold Publisher, pp. 195-196.
- Sweat, V.E., 1974, "Experimental Values of Thermal Conductivity of Selected Fruits and Vegetables". **Journal of Food Science**, Vol. 39, No. 6, pp. 1080-1083
- USDA handbook No. 66. **The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Nursery Stocks**

- Vagenas, G.K., Marinos-Kouris, D. and Saravacos, G.D. 1990, "Thermal Properties of Raisins," **Journal of Food Engineering**, Vol. 11, No. 1, pp. 147-158.
- Vagenas, G.K., Drouzas, A.E. and Marinos-Kouris, D., 1990, "Predictive Equations for Thermophysical Properties of Plant Foods," in Engineering and Food Vol.1 **Physical Properties and Process Control**, Edited by Spiess, W.E.L. and Schubert, H., London, Elsevier Applied Science, pp. 399-407.
- Vikas Kumar et. Al. 2007. **Conjugate Heat Transfer Analysis of an Egg**. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2007, Boston.
- Wang, N. and Brennan, J.G., 1992, "Thermal Conductivity of Potato as a Function of Moisture Content," **Journal of Food Engineering**, Vol. 17, No. 3, pp. 153-160.
- Wang J. and Hayakawa, K., 1993, "Thermal Conductivity of Starch Gels at High Temperatures Influenced by Moisture." **Journal of Food Science**, Vol. 58, No. 4, pp. 884-887.
- Wikipedia. 2010. **thermal conductivity**. [Online] . Available :
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity
- Zainal, B.S., Rahman. R.A., Ariff, A.B., Saari, B.N. and Asbi, B.A., 2000, "Effect of Temperature on the Physical Properties of Pink Guava Juice at Two Different Concentrations", **Journal of Food Engineering**, Vol. 43, No. 1,pp 55-59.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว พัชรี คล้ายมณี
วัน เดือน ปีเกิด	3 มกราคม 2528
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 28/1 ม.7 ต.เขาแก้ว อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี 22170
ประวัติการศึกษา	2545 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนศรียานุสรณ์ จันทบุรี สาขาวิทย์-คณิต 2547 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี คณะเทคโนโลยีการอาหาร/ เอกเทคโนโลยีการ อาหาร 2550 ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ / เอกวิศวกรรมเกษตร
ผลงาน	ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่อง แบบจำลองของสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าว เพื่อจำแนกพันธุ์ข้าวใน ประเทศไทยเฉพาะพันธุ์ที่มีการปลอมปนโดยวิธีไม่ทำลาย Modeling of Physical Properties of Thai Rice for Adulteration Variety Classification using Non-destructive Method จัดทำร่วมกับ นางสาวพจนา หุตเวช และ นายวีระพล สอนใจ