บทที่ 2
งานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การลดอุณหภูมิขั้นต้น

การลดอุณหภูมิขั้นต้น (pre-cooling) เป็นกระบวนการที่ช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของพืชภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ทั้งนี้อุณหภูมิที่ลดลงของผลิตผลไม่ควรลดต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผลิตผล (chilling injury) หากลดอุณหภูมิจนถึงจุดที่เหมาะสมของพืชจะทำให้สามารถยืดอายุการเก็บและคุณภาพของผลิตผล การทำ pre-cooling จะต้องคำนึงถึงชนิดของ pre-cooling ให้เหมาะกับชนิดผลิตผล ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบ pre-cooling ให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตผลมากขึ้น

2.2 วิธีการต่างๆ ในการลดอุณหภูมิขั้นต้น

2.2.1 การลดอุณหภูมิโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง

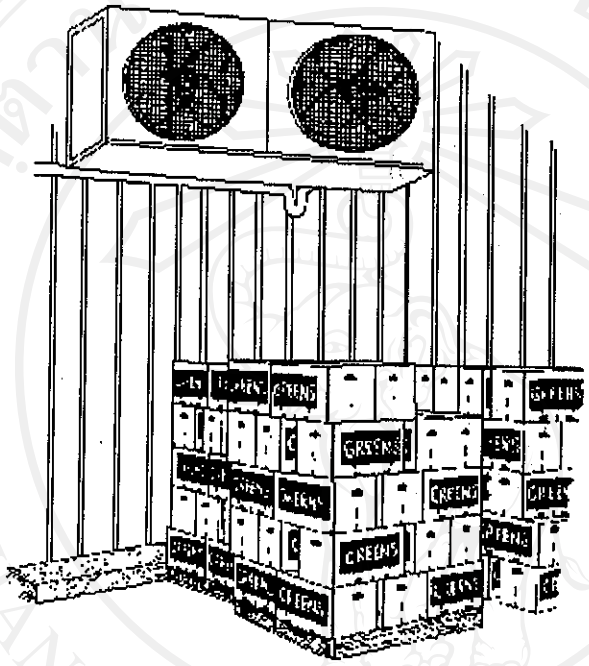
วิธีการนี้เป็นวิธีที่เห็นกันอยู่ทั่วๆ ไปในชีวิตประจำวันได้แก่ ตู้เย็น สิ่งของที่เก็บในตู้เย็นถูกทำให้เย็นลงโดยการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางคืออากาศ สำหรับการทำให้เย็นโดยตู้เย็นนั้นต่างจากห้องเย็น เพราะในตู้เย็นส่วนใหญ่จะมีการหมุนเวียนของอากาศค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะในช่องเก็บผักผลไม้ด้านล่าง การทำให้เย็นเกิดขึ้นโดยการนำ (conduction) เป็นส่วนใหญ่ แต่ในห้องเย็นจะมีพัดลมเป่าให้อากาศหมุนเวียนทำให้มีความสามารถในการทำให้เย็นสูงกว่า เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเกิดได้ทั้งการนำและการพา (conduction และ convection) วิธีการลดอุณหภูมิ โดยใช้ลมนี้แบ่งได้เป็นอีกหลายแบบคือ

2.2.1.1 Room Cooling

เป็นการใช้ห้องเย็นเป็นห้องสำหรับลดอุณหภูมิของผักและผลไม้โดยตรง โดยไม่ต้องมีกรรมวิธีพิเศษอย่างไรนอกจากนำผักและผลไม้เข้าไปไว้เท่านั้น การเพิ่มการไหลเวียนของอากาศหรือการปรับช่องลมที่ออกมาจากเครื่องทำความเย็นให้ตรงกับตำแหน่งของภาชนะบรรจุผักและผลไม้ให้มากที่สุดจะช่วยให้ลดอุณหภูมิได้เร็วขึ้น ในการทำให้เย็นในห้องเย็นนี้ภาชนะบรรจุควรมีช่องระบายอากาศเพื่อให้เวลาของการทำให้เย็นสั้นเข้า โดยปกติถ้าพื้นที่ของช่องระบายอากาศน้อยกว่า 2% จะไม่ได้ประโยชน์มากไปกว่าภาชนะปิด ถ้าช่องระบายมีพื้นที่ถึง 5% จะลดเวลาของการทำให้เย็นลงไป 25% ในขณะที่ความแข็งแรงของภาชนะบรรจุลดลงเพียง 2-3%

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทำให้เย็นโดยอาศัยรถห้องเย็น (refrigerated container) ไม่ว่าจะเป็นรถบรรทุกหรือรถไฟก็เรียกว่าเป็น room cooling หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า transit cooling แต่เป็นวิธีที่ไม่นิยมกันเพราะกำลังในการทำความเย็นของรถห้องเย็นนี้ค่อนข้างต่ำไม่สามารถลดความร้อน โดยเฉพาะ field heat ลงได้ในเวลาอันสั้น รถห้องเย็นนั้นสร้างขึ้นเพื่อรับสินค้าที่ได้มีการผ่าน pre-cooling แล้วนั้น



รูปที่ 2.1 การลดอุณหภูมิขั้นต้นโดยวิธี Room Cooling

2.2.1.2 Forced-Air Tunnel Cooling

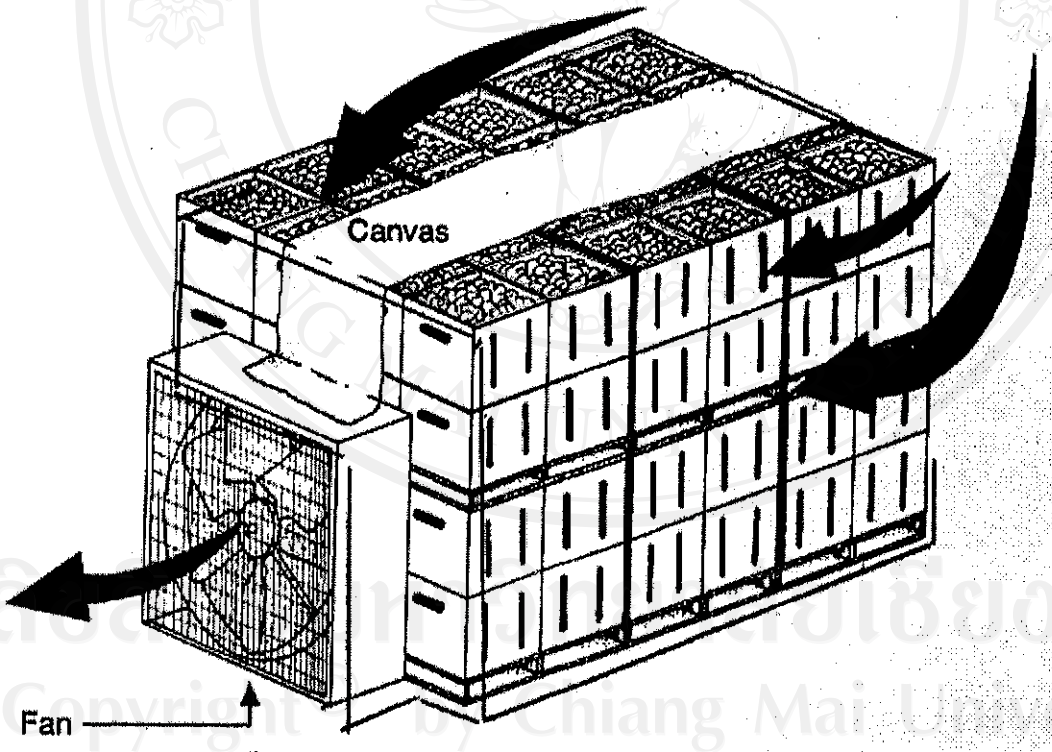
เป็นวิธีการลดอุณหภูมิโดยอาศัยกระบวนการนำและการพา ซึ่งระบบ forced-air นี้ได้ถูกพัฒนาโดย Guillou เพื่อที่จะกำจัด field heat ออกจากตัวผลิตผล (Guillou, 1960) ซึ่งเป็นวิธีที่จัดทำขึ้นเพื่อทำให้อากาศเย็นไหลผ่านไปยังผักและผลไม้อย่างทั่วถึงเพื่อให้อุณหภูมิของผักและผลไม้ลดลง ซึ่งอาจจะทำได้โดยสร้างห้องสำหรับการนี้โดยเฉพาะ หรือดัดแปลงใช้ห้องเย็นธรรมดาก็ได้ โดยจะนำผลิตผลที่บรรจุในภาชนะเรียบร้อยแล้วไปเรียงเป็น 2 แถวชิดผนังภายในห้องเย็นโดยที่จะเว้นที่ตรงกลางไว้เพื่อที่จัดให้มีพัดลมดูดอากาศแล้วใช้ผ้าใบปิดช่องว่างระหว่างแถวเพื่อบังคับให้อากาศเย็นไหลผ่านผลิตผล ความสามารถลดอุณหภูมิลงได้อย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับความเร็วลม อุณหภูมิภายในห้องเย็นและชนิดของผลิตผล ยิ่งเพิ่มความเร็วลมก็จะทำให้ใช้เวลาในการลดอุณหภูมิน้อยลง (Ibrahim, 1995b) วิธีนี้เหมาะสำหรับผลิตผลที่บอบบางใช้น้ำในการทำเย็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไม่ได้ เช่น เห็ด สตรอเบอรี่ หรือผลิตผลที่จะมีการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสภาพคุณภาพลงอย่างรวดเร็ว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการลดอุณหภูมิ (Hugh and Fraser, ไม่ระบุปีที่ตีพิมพ์)ได้แก่

1. ความหนาแน่นของผลิตผลภายในห้อง
2. ชนิดของห้องเก็บ การหมุนเวียนของลม
3. อัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นผิวของผลิตผล ซึ่งถ้าอัตราส่วนมีค่าน้อยจะสามารถทำให้ลดอุณหภูมิลงได้เร็ว
4. ระยะทางที่ลมผ่าน ถ้าเราเรียงจำนวนแถวของผลิตผลมากเกินไปตัวกลางจะต้องใช้
5. เวลานานในการเคลื่อนที่ผ่านมีผลทำให้การลดอุณหภูมิผลิตผลใช้ระยะเวลานาน
6. ปริมาตรของอากาศที่ไหลผ่าน
7. ช่องว่างระหว่างผลิตผล ถ้ามีมากก็จะทำให้เย็นเร็วขึ้น (Sadashive *et al.*, 1997)



รูปที่ 2.2 การลดอุณหภูมิขั้นต้นโดยวิธี Forced-Air Tunnel Cooling

2.2.2 การลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำเย็นเป็นตัวกลาง (hydrocooling)

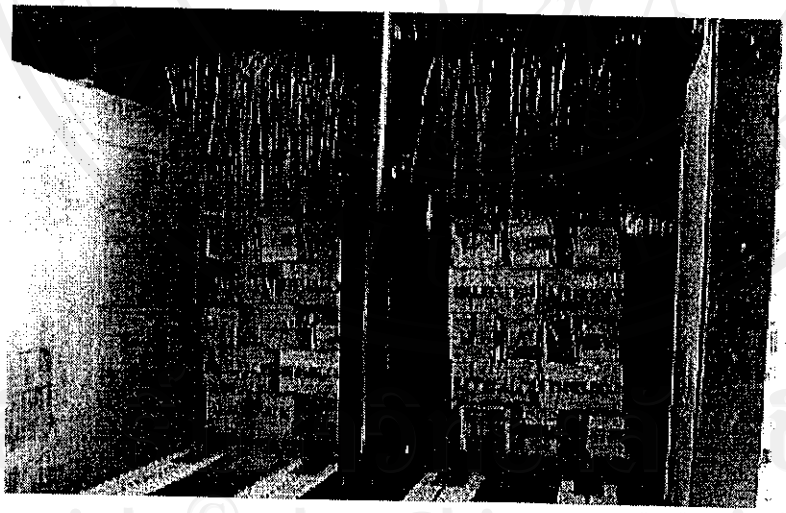
เป็นวิธีการลดอุณหภูมิ โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะทำการลดอุณหภูมิของผักและผลไม้โดยการให้ผักและผลไม้นั้นลงไปแช่ในน้ำหรืออาจจะทำโดยให้ผักและ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลไม้เคลื่อนที่ผ่านน้ำ เนื่องจากน้ำมีความจุความร้อนสูงและเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงสามารถใช้เป็นตัวกลางในการทำให้ผลิตผลเย็นลงได้ดีกว่าการใช้อากาศ ประสิทธิภาพของ pre-cooling จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำและพื้นที่สัมผัสระหว่างผลิตผลกับน้ำให้เกิดขึ้นมากที่สุด และน้ำจะต้องมีอุณหภูมิต่ำที่สุดโดยไม่ทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหายเพราะถ้าใช้อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิด chilling injury กับผลิตผลได้ (Jennifer *et al.*, 1999) วิธีนี้สามารถทำได้โดยผ่านผลิตผลไปตามสายพานและจัดให้มีน้ำเย็นไหลผ่านทำความเย็นให้กับผลิตผล ที่สำคัญจะต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็นให้คงที่ ข้อจำกัดของการทำ pre-cooling โดยวิธีนี้ คือ ผลิตผลที่นำมานั้นจะต้องทนทานกับน้ำ และจะต้องคอยควบคุมเชื้อโรคที่ปะปนมากับน้ำหรือที่อาจติดมากับผลิตผล ซึ่งสามารถแพร่กระจายในน้ำได้เป็นอย่างดีจึงจำเป็นที่จะมีการเติมคลอรีนลงไป (Boyette *et al.*, ไม่ระบุปีที่ตีพิมพ์) ตามที่ทาง North Carolina Agricultural Chemicals Manual แนะนำว่าควรจะใช้คลอรีน ในระดับ 55-70 ppm

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการลดอุณหภูมิ (James, 2001) ได้แก่

1. ระยะเวลาที่ผลิตผลสัมผัสกับน้ำเย็น
2. อุณหภูมิของน้ำเย็น
3. การสัมผัสระหว่างน้ำเย็นกับตัวผลิตผล



รูปที่ 2.3 การลดอุณหภูมิขั้นต้นโดยวิธี Hydrocooling

2.2.3 Ice Cooling

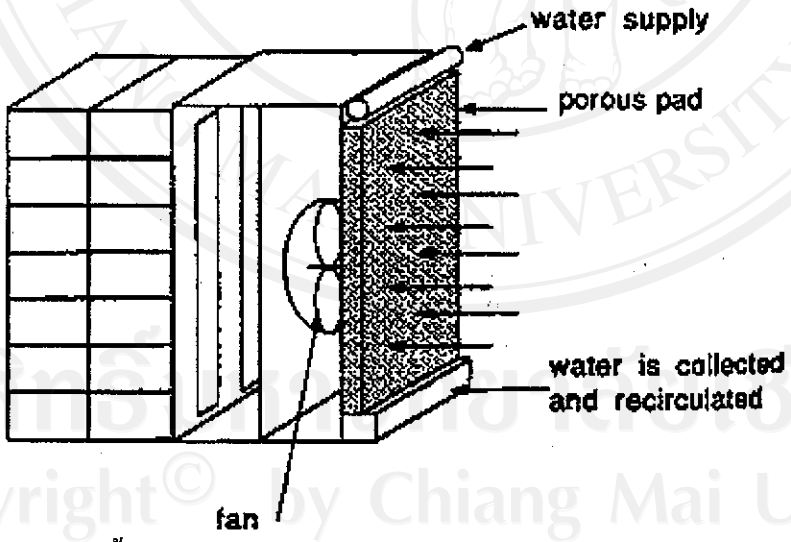
การใช้น้ำแข็งบดเป็นก้อนเล็กๆ เพื่อทำให้ผลิตผลเย็นลงโดยตรง เป็นวิธีที่ใช้กันมานานและยังใช้กันอยู่โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีเครื่องทำความเย็น การใช้น้ำแข็งนี้น่าจะสามารถลดความเย็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลงได้อย่างรวดเร็ว เพราะแต่ละกรัมของน้ำแข็งเมื่อละลายเป็นน้ำสามารถดูดความร้อนออกจากผลิตผลได้ถึง 80 cal แต่ในทางปฏิบัติแล้วประสิทธิภาพในการทำให้ผลิตผลเย็นลงค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำแข็งไม่สามารถเข้าสัมผัสกับผลิตผลได้อย่างทั่วถึงเพราะไม่ใช่ของไหล นอกจากนั้นเมื่อน้ำแข็งเริ่มละลายไปมักจะเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างผลิตผลกับน้ำแข็งเหลืออยู่ ช่องว่างนี้กลายเป็นสิ่งขัดขวางการถ่ายเทความร้อนระหว่างผลิตผลกับน้ำแข็ง ทำให้อุณหภูมิลดลงได้ช้า เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการทำ pre-cooling ได้โดยการใช้น้ำแข็งร่วมกับน้ำอาศัยน้ำเป็นตัวพาน้ำแข็งให้ไปสัมผัสกับผลิตผลมากขึ้น

2.2.4 Evaporative Cooling

เป็นการการลดอุณหภูมิโดยอาศัยการระเหยน้ำนี้เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก เพราะไม่ต้องใช้พลังงานที่มีราคาแพง เหมาะสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนาแต่มีข้อจำกัดว่าไม่สามารถลดอุณหภูมิได้มากและเร็วตามความต้องการได้ วิธีนี้ใช้ได้ผลดีในพื้นที่ที่มีความชื้นต่ำการระเหยน้ำเกิดขึ้นได้มาก ในทางการปฏิบัติผักและผลไม้จะถูกนำไปเก็บไว้ในห้อง ภาชนะ อุโมงค์ หรือ ถ้ำที่สร้างขึ้นโดยจัดให้มีน้ำไหลผ่านผนังทั้งด้านบนและด้านข้าง เมื่อน้ำระเหยออกไปเกิดการถ่านเทความร้อนจากผลิตผลมายังผนังห้องและน้ำ ทำให้ผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงได้พอสมควร อาจเรียกวิธีการนี้อีกอย่างหนึ่งว่า passive cooling



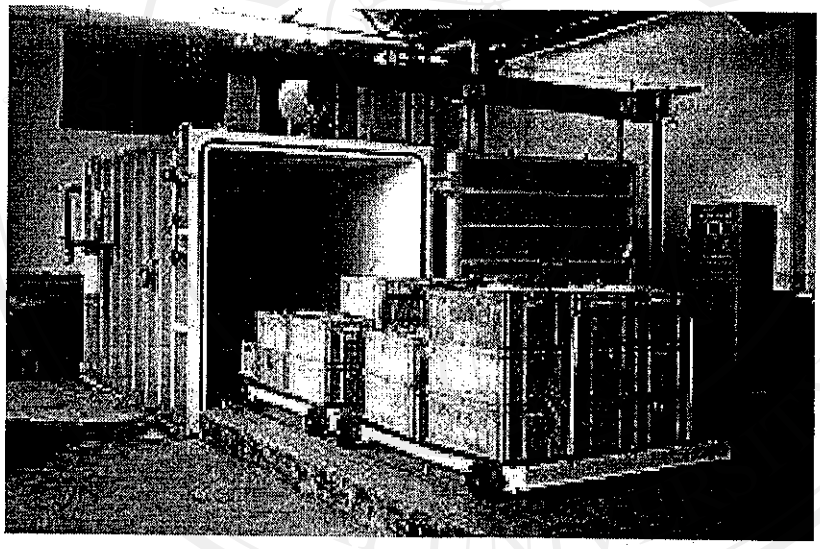
รูปที่ 2.4 การลดอุณหภูมิขั้นต้นโดยวิธี Evaporative Cooling

2.2.5 Vacuum Cooling

การทำให้เย็นด้วยวิธีนี้มิได้ทำในที่ๆ เป็นสูญญากาศตามชื่อแต่ทำในสภาพที่มีความดันต่ำโดยการดูดเอาอากาศออกไปจากห้องลดอุณหภูมิซึ่งต้องมีความแข็งแรงมาก ในสภาพเช่นนี้จุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เดือดของน้ำจะลดต่ำลงใกล้ 0 ^{0}C ตามความดันบรรยากาศที่ลดลงน้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอออกไปได้ง่ายโดยใช้ความร้อนจากผลิตผลนั่นเองทำให้อุณหภูมิของผลิตผลต่ำลง ดังนั้นผลิตผลที่มีพื้นผิวมาก เช่น พวกผักรับประทานใบ สามารถคายความร้อนออกไปได้มากด้วยวิธีนี้และอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในผลิตผลที่มีลักษณะเป็นผลหรือหัว มีพื้นที่ผิวน้อย เช่น มะเขือเทศ และมันฝรั่ง วิธีนี้ใช้ไม่ได้ผลนัก เพราะพื้นที่ที่จะให้มีการเปลี่ยนสถานะของน้ำไปเป็นไอน้อย อย่างไรก็ตามในผลิตผลที่มีพื้นที่ผิวมาก หากมีการสูญเสียน้ำไปมากจะทำให้ผลิตผลเหี่ยวมีคุณภาพต่ำลง จากการศึกษาพบว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนัก 0.2% ทุกๆ อุณหภูมิ 1 ^{0}C ที่ลดลง จึงต้องมีการพรมผลิตผลด้วยน้ำเย็นก่อนทำการลดความดันบรรยากาศ วิธีนี้สามารถลดการสูญเสียน้ำจากผลิตผลลงได้ เพราะการระเหยกลายเป็นไอและพาความร้อนออกไปจะเกิดกับน้ำที่พรมไว้ก่อนทำให้ผลิตผลมีคุณภาพดี อาจเรียกวิธีการลดอุณหภูมิแบบนี้ว่า evaporative cooling ได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.5 การลดอุณหภูมิขั้นต้นโดยวิธี Vacuum Cooling

2.2.6 การลดอุณหภูมิ ด้วยวิธีอื่นๆ

นอกจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีวิธีลดอุณหภูมิผักและผลไม้อื่นๆ อีก เช่น การใช้ไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์เหลว และคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง ซึ่งมีความเหมาะสมแล้วแต่กรณีแตกต่างกันไปดังนี้

การใช้ไนโตรเจนเหลว คาร์บอนไดออกไซด์เหลว และคาร์บอนไดออกไซด์แข็ง วิธีนี้มักใช้กับผลิตผลในตู้สินค้า โดยการพ่นไนโตรเจนเหลวหรือคาร์บอนไดออกไซด์ไปในตู้สินค้า ซึ่งสามารถทำให้อากาศภายใน และผลิตผลเย็นลงอย่างรวดเร็วทั้งนี้ต้องให้ไนโตรเจนเหลวหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ผสมกับอากาศให้อุณหภูมิต่ำลงพอสมควรก่อนสัมผัสกับผลิตผล และต้องจัดเรียง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลิตผลภายใน container ให้มีการไหลเวียนของอากาศได้ดีด้วย มิฉะนั้นจะทำให้ผลิตผลเสียหายได้ อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายของการใช้ไนโตรเจนเหลว และคาร์บอนไดออกไซด์เหลวค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับน้ำแข็ง ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถใช้ได้สะดวก สะอาด และใช้ลด field heat ได้ดี สามารถนำเข้าไปปฏิบัติในแปลงพร้อมกับรถห้องเย็นได้ ลดค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องสร้าง cooling unit นอกจากนั้นการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวหรือแข็งยังมีประโยชน์ในแง่ของการปรับสภาพบรรยากาศของการเก็บรักษามากขึ้นด้วย

2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ของการลดอุณหภูมิ (Ibrahim, 1997b)

สมมุติฐาน (assumption)

- สมมุติให้ผักมีรูปร่างที่สมมาตร และ เป็นเนื้อเดียวกัน
- สมบัติทางความร้อนของผักมีค่าคงที่
- สมบัติทางความร้อนของอากาศมีค่าคงที่
- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่
- อุณหภูมิเริ่มต้นของผักเท่ากันทั้งหมด
- ความร้อนที่เกิดจากการหายใจมีค่าน้อยมาก (Ibrahim, 1997a)
- มีการสูญเสียความชื้นน้อยมากจึงไม่นำมาคิดการถ่ายเทความร้อนจาการระเหยของน้ำ (Ibrahim, 1997a)
- การถ่ายเทความร้อนอยู่ในสภาวะที่ไม่คงตัว (unsteady-state)
- มีการนำความร้อนในมิติเดียว

การลดอุณหภูมิ คือการถ่ายเทเอาความร้อนจากผลิตผลออกไปโดยอาศัยตัวกลางเป็นตัวนำและ/หรือพาความร้อนออกไป ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์ของการนำความร้อนของพิกัดทรงกลม และทรงกระบอก ดังสมการต่อไปนี้

ทรงกระบอก $(\partial^2T/\partial r^2)+(1/r)(\partial T/\partial r) = (1/\alpha)(\partial T/\partial t)$ (1)

ทรงกลม $(\partial^2T/\partial r^2)+(2/r)(\partial T/\partial r) = (1/\alpha)(\partial T/\partial t)$ (2)

เขียนสมการ (1) และ (2) ให้อยู่ในรูปของ $\Phi = T - T_a$

ทรงกระบอก $(\partial^2\Phi/\partial r^2)+(1/r)(\partial \Phi/\partial r) = (1/\alpha)(\partial \Phi/\partial t)$ (3)

ทรงกลม $(\partial^2\Phi/\partial r^2)+(2/r)(\partial \Phi/\partial r) = (1/\alpha)(\partial \Phi/\partial t)$ (4)

เมื่อ

α = Thermal diffusivity (m^2/s)

r = Radial coordinate

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

t = เวลา (s)

T = อุณหภูมิที่เวลาใดๆ (^oC)

T_a = อุณหภูมิตัวกลาง (^oC)

โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นและขอบเขตแสดงได้ในสมการดังต่อไปนี้

$$\Phi(r, 0) = \Phi i = (T - Ta) \quad (5)$$

$$\partial\Phi/\partial R = 0 \quad (6)$$

$$(\partial\Phi(R,t)/\partial r) = -(h\Phi(R,t)/k) \quad (7)$$

เมื่อ

k = ค่าการนำความร้อน (W/m^oC)

R = รัศมีของทรงกระบอกและทรงกลม (m)

หาคำตอบของอนุพันธ์โดยใช้วิธีแยกตัวแปร ซึ่งสามารถเขียนคำตอบของอนุพันธ์ในรูปของอนุกรมได้ดังนี้

ทรงกระบอก
$$\Phi(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n[\exp(-\alpha M_n^2 t)]J_0(M_n R) \quad (8)$$

ทรงกลม
$$\Phi(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n[\exp(-\alpha N_n^2 t)]J_0(N_n R) \quad (9)$$

โดย a_n เป็นค่าคงที่ในสมการ (8) และ (9) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในพิกัดของ

ทรงกระบอก $a_n = 2\Phi Bi/[(M_n^2+Bi^2)\, J_o(M_n R)]$ (10)

ทรงกลม $a_n = 2\Phi(\sin N_n R - N_n R\cos N_n R)/ N_n(N_n R - \sin N_n R\cos N_n R)$ (11)

เมื่อ

Bi = Biot number

J_o = ฟังก์ชั่นเบสเซลอันดับ 0 ชนิดที่หนึ่ง

M_n และ N_n = Roots of characteristic equations สำหรับ ทรงกลม และ ทรงกระบอก

แทนค่า a_n ในสมการที่ (10) ลงในสมการที่ (8) และแทน a_n (11) ในสมการที่ (9) และเขียนคำตอบของอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของ dimensionless temperature (θ) จะได้

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n C_n \quad (12)$$

โดย

ทรงกระบอก $A_n = (2Bi)/[J_o(M_n)(M_n^2+Bi^2)]$

$B_n = \exp(-M_n^2 Fo)$

$C_n = J_o(M_n\Gamma)$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทรงกลม $A_n = (2Bi \sin N_n)/(N_n - \sin N_n \cos N_n)$

$B_n = \exp(-N_n^2 Fo)$

$C_n = (\sin N_n \Gamma)/(N_n \Gamma)$

เมื่อ

Fo = Fourier number

Γ = Dimensionless radial diatance (= r/R)

ซึ่งที่จุดศูนย์กลางของทรงกระบอกและทรงกลมนั้น $C_n = 1$ และ $\Gamma = 0$ และค่าของคำตอบจะประมาณค่าโดยใช้พจน์แรกของอนุกรม ซึ่งถือว่าในพจน์อื่นมีค่าน้อยมาก จะได้สมการดังนี้

ทรงกระบอก $\theta = A_1 \exp(-M_1^2 Fo)$ (13)

ทรงกลม $\theta = A_1 \exp(-N_1^2 Fo)$ (14)

เมื่อใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ทรงกระบอก $\theta = j\exp(-Ct)$ (15)

ทรงกลม $\theta = j\exp(-Ct)$ (16)

เมื่อ

C = Cooling coefficient (1/s)

j = lag factor

จากสมการที่ (11) , (12), (13) และ (14) จะได้ $A_1 = j$, $M_n^2 Fo = Ct$ และ $N_n^2 Fo = Ct$

ซึ่งค่าของ M_n และ N_n หาได้จากสมการ(Pflug และ Blaisdel, 1963)

$$M_n^2 = (6Bi)/(2.85 + Bi) \quad (17)$$

$$N_n^2 = (10.3Bi)/(3.2 + Bi) \quad (18)$$

จากสมการที่ 15 และ 16 เมื่อแทนค่าของ M_n^2 และ N_n^2 ลงในสมการ $M_n^2 Fo = Ct$ และ $N_n^2 Fo = Ct$ ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในเทอมของ effective convective heat transfer coefficients ได้ดังนี้

ทรงกลม $h = (3.2kRC)/(10.3\alpha - CR^2)$ (19)

ทรงกระบอก $h = (2.85kRC)/(6\alpha - CR^2)$ (20)

เมื่อ

h = convective heat transfer coefficient ($W/m^{2o}C$)

ซึ่ง ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity (k)) และค่า thermal diffusivity (α) หาได้จากสมการ (ASHRAE, 1981; Sweat, 1986)

$$k = 0.148 + 0.493W \quad (21)$$

$$\alpha = 0.088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0.088 \times 10^{-6})W \quad (22)$$

เมื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

W = ความชื้นของผัก (มาตรฐานเปียก)

เมื่อ ค่า α_w ที่ 25 ^{o}C มีค่าเท่ากับ 0.148 x 10^{-6} m^2/s

2.4 ตัวแปรแสดงประสิทธิภาพของการลดอุณหภูมิ (Cooling Parameters)

2.4.1 Half cooling time (Z) คือ เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของผลิตผลลงครึ่งหนึ่งของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตผลเมื่อเริ่มต้นกับอุณหภูมิของตัวกลาง เช่น ค่า half cooling time ของลูกท้อ ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 32 ^{o}C อุณหภูมิของอากาศ 0 ^{o}C ลดอุณหภูมิลูกท้อลงเหลือ 16 ^{o}C มีค่าเท่ากับ 4 ชั่วโมง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z = (\ln(2j))/C \quad (23)$$

เมื่อ

Z = Half cooling time (s)

2.4.2 Seven-eighths cooling time (S) คือ เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของผลิตผลลง 7/8 ของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผลิตผลเมื่อเริ่มต้นกับอุณหภูมิของตัวกลาง เช่น ลูกท้อลดอุณหภูมิลงเหลือ 4 ^{o}C ค่า seven-eighths cooling time เท่ากับ 9 ชั่วโมง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = (\ln(8j))/C \quad (24)$$

เมื่อ

S = Seven-eighths cooling time (s)

2.4.3 Cooling coefficient (C) คือ ความชันของเส้นกราฟระหว่าง ln(Y) กับ t ซึ่ง จะแสดงการเปลี่ยน แปลง อุณหภูมิของผลิตผลต่อหนึ่งหน่วยเวลา ค่าของ cooling coefficient จะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของผลิตผล และของตัวกลางที่ใช้ลดอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = (\ln\theta)/t \quad (25)$$

2.4.4 Lag factor (j) คือ อัตราส่วนระหว่าง θ กับ exp (-Ct) ซึ่งค่า lag factor นี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตผล เช่น รูปร่าง ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity (k)) thermal diffusivity (a) และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าของผลิตผล (surface heat tranfer coefficient (h_c))

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 ผักที่ใช้ในการทดลอง

2.5.1 ผักกาดขาวปลี (Chinese Cabbage)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Brassica campestris*

ช่วงเก็บเกี่ยว : เมื่ออายุประมาณ 60 วัน หรือเข้าหัวดีแล้ว

การจัดการในแปลงปลูก

1. เก็บเกี่ยวเมื่ออายุขนาดเหมาะสม เข้าปลีแน่นโดยใช้มีดตัดที่โคนต้น แล้วทาปูนแดงที่รอยตัด
2. จัดชั้นคุณภาพและกำจัดหัวที่มีตำหนิ ที่เน่าและแมลงเข้าทำลายทิ้ง ไว้ใบห่อหัว 2-3ใบ
3. ผึ่งให้แห้ง บรรจุในตะกร้าพลาสติก

ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ

คุณภาพขั้นต่ำเป็นผักกาดขาวปลีทั้งหัว เข้าปลีแน่นพอดี มีก้านใบสีขาว สด สะอาด มีใบนอกหุ้ม 2-3 ใบ แก่พอดี ไม่แทงช่อดอก ไม่มีอาการไส้เน่า ปลอดภัยจากสารเคมี

การจัดชั้นคุณภาพ แบ่งเป็น 3 ชั้น คือ

ชั้นหนึ่ง

1. น้ำหนักของหัว 700-1,500 กรัม
2. มีตำหนิได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ
3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้นสอง

1. น้ำหนักของหัว 500-700 กรัม
2. มีตำหนิได้ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ
3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้น u

1. น้ำหนักของหัว 500-700 กรัม
2. มีตำหนิได้ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ
3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ข้อกำหนดในการจัดเรียง

ผักกาดขาวปลีในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นชั้นคุณภาพเดียวกันและมีคุณภาพสม่ำเสมอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การเตรียมออกสู่ตลาด

หุ้มด้วยพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) หรือบรรจุลงถุงพลาสติกเจาะรู

การเก็บรักษา

อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95-100 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บรักษาได้นาน 2-3 สัปดาห์

2.5.2 ผักกาดหางหงษ์ (Michilli)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Brassica camprestis*

ช่วงเก็บเกี่ยว : เมื่ออายุประมาณ 60-75 วัน หรือเข้าหัวดีแล้ว

การจัดการในแปลงปลูก

1. เก็บเกี่ยวเมื่ออายุขนาดเหมาะสม เข้าปลีแน่นโดยใช้มีดตัดที่โคนต้นแล้วทาปูนแดงที่รอยตัด
2. ควรให้มีใบนอกเหลือ 2-3 ใบ
3. ผึ่งให้แห้ง จัดชั้นคุณภาพและกำจัดหัวที่เน่า หรือถูกแมลงทำลาย

ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ

คุณภาพขั้นต่ำเป็นผักกาดหางหงษ์ทั้งหัว เข้าปลีแน่น ใบเกาะชิดกัน แก่พอดี ไม่แทงช่อดอก ไม่มีอาการไส้เน่า สด สะอาด ก้านใบมีสีขาว ปลอดภัยจากสารเคมี

การจัดชั้นคุณภาพ แบ่งเป็น 3 ชั้น คือ

ชั้นหนึ่ง

1. น้ำหนักของหัว 800-1,500 กรัม
2. ใบและก้านใบแตกหักได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนในภาชนะบรรจุ
3. มีตำหนิได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ
4. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้นสอง

1. น้ำหนักของหัว 600-800 กรัม
2. ใบและก้านใบแตกหักได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนในภาชนะบรรจุ
3. มีตำหนิได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ
4. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้น น

1. น้ำหนักของหัว 400-600 กรัม หรือ 1,500-2,000 กรัม
2. ใบและก้านใบแตกหักได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนในภาชนะบรรจุ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. มีตำหนิได้ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะ บรรจุ

4. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ข้อกำหนดในการจัดเรียง

ผักกาดหางหงษ์ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นชั้นคุณภาพเดียวกัน และมีคุณภาพสม่ำเสมอ

การเตรียมสู่ตลาด

1. ตัดแต่งและกำจัดส่วนที่เป็นตำหนิ

2. บรรจุถุงพลาสติกเจาะรู

การเก็บรักษา

อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95-100 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บรักษาได้นานประมาณ 2-3 สัปดาห์

2.5.3. ผักกาดหอมห่อ (Head Lettuce)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : Lactuca sativa

ช่วงเก็บเกี่ยว : เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 40-45 วัน หลังปลูก ใช้มือกดดูต้องหัวแน่นพอดี (กดยุบแล้วกลับคืนเหมือนเดิม)

การจัดการในแปลงปลูก

1. เก็บเกี่ยวด้วยมีด เมื่อตัดแล้วทาปูนแดงบริเวณแผลที่ตัด

2. เหลือใบนอกไว้ 2-3 ใบ เพื่อป้องกันการช้ำของหัวระหว่างขนส่ง

3. หลีกเลี่ยงการที่จะทำให้ผักสกปรกเปื้อนดินถ้าผักเปียกน้ำผึ่งให้แห้ง เพื่อป้องกันการเน่าเสีย

4. จัดชั้นคุณภาพและเลือกหัวที่มีตำหนิมากออกแล้วขนส่งด้วยรถห้องเย็นอย่างระมัดระวัง

ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ

คุณภาพขั้นต่ำ เป็นผักกาดหอมห่อทั้งหัว สด สะอาด มีใบนอก 2-3 ใบ รูปร่างและสีตรงตามพันธ์ ห่อปลีแน่นพอดี ไม้หลวมหรือแน่นเกินไป ไม่มีอาการใบไหม้หรือตำหนิจากโรคหรือแมลง แก่พอดีไม่มีรสขม ไม่แทงช่อดอก และไม่เปียกน้ำเปื้อนดิน ปลอดภัยจากสารเคมี

การจัดชั้นคุณภาพ แบ่งเป็น 3 ชั้น คือ

ชั้นหนึ่ง

1. มีขนาดหัว 450 กรัมขึ้นไป เส้นผ่าศูนย์กลางหัว 17-20 เซนติเมตร

2. ใบและก้านใบแตกได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนในภาชนะบรรจุ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้นสอง

1. มีขนาดหัว 450 กรัมขึ้นไป เส้นผ่าศูนย์กลางหัว 17-20 เซนติเมตร

2. ใบและก้านใบแตกได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนในภาชนะบรรจุ

3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ข้อกำหนดในการจัดเรียง

ผักกาดหอมห่อในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นผักกาดหอมห่อพันธุ์เดียวกัน ชั้นคุณภาพเหมือนกัน และมีคุณภาพสม่ำเสมอ

การเตรียมสู่ตลาด

1. ตัดแต่งใบนอกออกให้หมดและกำจัดตำหนิเล็กน้อยที่เกิดระหว่างขนส่ง

2. ตัดโคนลำต้นออกเพื่อให้ดูสดขึ้น

3. จำหน่ายโดยบรรจุถุงพลาสติกที่เจาะรู

การเก็บรักษา

อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บรักษาได้นาน2-3 สัปดาห์

2.5.4 กะหล่ำปลี (Cabbage)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Brassica oleracea var. capitata*

ช่วงเก็บเกี่ยว : เมื่ออายุ 60-70 วัน หลังย้ายกล้าปลูก ห่อหัวแน่นพอดี

การจัดการในแปลงปลูก

1. เก็บเกี่ยวเมื่ออายุและขนาดเหมาะสม

2. ควรมีใบห่อหุ้มไม่เกิน 3 ใบ

3. คัดเลือกหัวที่มีตำหนิทิ้ง ทาด้วยปูนแดงที่รอยตัด และผึ่งให้แห้ง

4. บรรจุในตะกร้าพลาสติกโดยมีกระดาษกรุรองทั้งตะกร้า

ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ

คุณภาพขั้นต่ำ เป็นกะหล่ำปลีทั้งหัว มีรูปร่างละสีตรงตามพันธุ์ สดสะอาด ไม่มีตำหนิจากโรคหรือแมลง ไม่แทงช่อดอก ตัดแต่งให้เหลือใบนอก 2-3 ใบ ปลอดภัยจากสารเคมี

การจัดชั้นคุณภาพ แบ่งเป็น 3 ชั้นคือ

ชั้นหนึ่ง

1. มีน้ำหนัก 700-1,500 กรัม

2. เข้าหัวแน่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้นสอง

1. มีน้ำหนัก 500-700 กรัม

2. มีคุณภาพอย่างน้อยตามคุณภาพขั้นต่ำ

ชั้น U

1. มีน้ำหนักต่ำกว่า 500 กรัม หรือมากกว่า 1,500 กรัม

2. มีตำหนิได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนหัวในภาชนะบรรจุ

3. ปลอดภัยจากสารเคมี

ข้อกำหนดเรื่องจัดเรียง

กะหล่ำปลีในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องเป็นชั้นคุณภาพเดียวกัน พันธุ์เดียวกัน และมีคุณภาพสม่ำเสมอ

การเก็บรักษา

อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 98-100 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บรักษาได้นาน 3-6 สัปดาห์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved