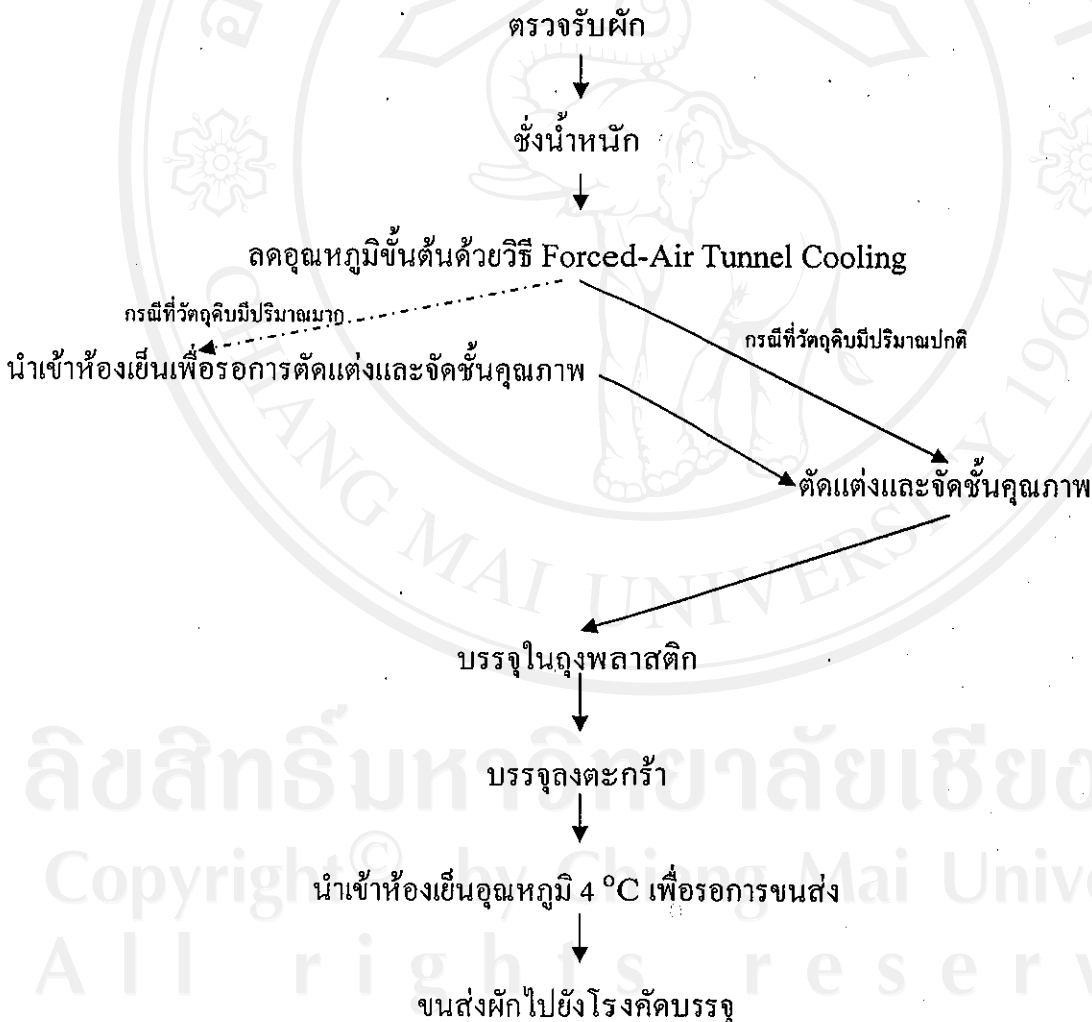


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว เป็นวิธีการที่ช่วยลดการสูญเสียและรักษาคุณภาพของผักซึ่งเป็นการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผักให้นานขึ้น ขั้นตอนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของผักกาดขาวปลี ผักกาดหางหงษ์ ผักกาดหอมห่อ และผักกะหล่ำปลี ของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงหนองหอยแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการจัดการหลังเก็บเกี่ยวของผักกาดขาวปลี ผักกาดหางหงษ์ ผักกาดหอมห่อ และ ผักกะหล่ำปลี ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงหนองหอย

#### 4.2 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนทำการ precooling และความเร็วลมภายในห้องเย็น

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการลดอุณหภูมิขั้นต้นของผักกาดขาวปลีมีค่าอยู่ในช่วง 16.8 ถึง 21 องศาเซลเซียส ผักกาดหางหงส์มีค่าอยู่ในช่วง 18.5 ถึง 21.6 องศาเซลเซียส ผักกาดหอมห่อมีค่าอยู่ในช่วง 16.9 ถึง 20.6 องศาเซลเซียส และผักกะหล่ำมีค่าอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 24.7 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิเริ่มต้นของผักในการลดอุณหภูมิขั้นต้นไม่เท่ากันเนื่องจากช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ประกอบกับอุณหภูมิของอากาศในขณะที่เก็บเกี่ยวไม่เท่ากันและเวลาที่ผลิตผลรอเข้าห้อง forced-air tunnel cooling แตกต่างกัน ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ก่อนการลดอุณหภูมิมิมีค่าไม่เท่ากัน สำหรับความเร็วลมขณะทำการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 1.8 เมตรต่อวินาที

#### 4.3 Cooling Parameters และ Local Heat Transfer Coefficients

จากการทดลองศึกษาวิธีการลดอุณหภูมิผักวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน (control) การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า กับผักกาดขาวปลี ผักกาดหางหงษ์ ผักกาดหอมห่อ และผักกะหล่ำปลี เพื่อศึกษาหารูปแบบที่เหมาะสมที่ทำให้การลดอุณหภูมิผักเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้ผลการศึกษาดังนี้

##### 4.3.1 ผักกาดขาวปลี

##### ก. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเย็นในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling

อุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองภายในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling มีค่าอยู่ในช่วง -2 ถึง 2 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยที่  $0^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงนาที่ที่ 140, 150, 140, 50 และ 100 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 มีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 15 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลมาจากการละลายน้ำแข็งของเครื่องทำความเย็นซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่เครื่องทำความเย็นทำการละลายน้ำแข็ง มีค่าลดลงประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากมาจากอุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงขึ้น

##### ข. Cooling Parameters

ค่า cooling parameters ของการลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ได้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่า lag factor ของการทดลองในสภาวะเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า และลดความกว้างขนาดผ้าใบ มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผักกาดขาวปลีมีความต้านทานการนำความร้อนภายในผัก (internal resistance) และการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งแบบการนำและการพาความร้อน ค่าของ lag factor มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 1 แสดงว่าผักมีความต้านทานภายในน้อยมาก ทำให้สามารถลดอุณหภูมิผักได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการลดอุณหภูมิขั้นต้นในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน พบว่าที่หัววัดที่

1 ค่า lag factor ที่คำนวณได้น้อยกว่า 1 ทั้งนี้เนื่องจากหัววัดที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิอาจหลุดออกมาจากฝัก ในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิ ทำให้ค่า lag factor ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่าของ half cooling time และ seven-eighths cooling time ในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน มีค่าอยู่ในช่วง 43 ถึง 131 และ 132 ถึง 339 นาทีตามลำดับ ซึ่งค่าจากหัววัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด และจากหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด สำหรับสภาวะการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่าจะอยู่ในช่วง 46 และ 94 และ 110 ถึง 247 นาทีตามลำดับ หัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าค่าอยู่ในช่วง 41 ถึง 99 และ 104 ถึง 254 นาทีตามลำดับ พบว่าในหัววัดที่ 4 เป็นค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าสภาวะการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ทำให้ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 29% และ 33.46% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 30.6% และ 35.38% ตามลำดับ

สำหรับค่า cooling coefficients ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการลดของอุณหภูมิฝัก ในกรณีที่มีค่าสูง หมายถึงการลดอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการจะใช้ระยะเวลาที่สั้น จะเห็นได้จากการทดลองว่าสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน ค่า cooling coefficients จะอยู่ในช่วง  $6.41 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.55 \times 10^{-2}$  และพบว่า หัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด ส่วนในหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิในหัววัดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในการลดขนาดความกว้างของผ้าใบค่า cooling coefficients ที่คำนวณได้จากการทดลองอยู่ในช่วง  $9.08 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.15 \times 10^{-2}$  หัววัดที่ 5 มีค่าสูงที่สุด และค่าจากหัววัดที่ 1 ต่ำที่สุด สำหรับค่า cooling coefficients จากการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้ามีค่าอยู่ในช่วง  $8.94 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.21 \times 10^{-2}$  และพบว่าหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุดในหัววัดที่ 6 พบว่าการทดลองในสภาวะลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าให้ค่า cooling coefficients ที่สูงกว่าในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 22.74% และ 28.67% ตามลำดับ

การสูญเสียน้ำหนักในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า มีค่าเท่ากับ 0.35 1.34 และ 1.38 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าการปรับเปลี่ยนสภาวะการลดอุณหภูมิจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นประมาณ 1.01 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนสภาวะเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่ฝักสัมผัสกับอากาศเย็นมากขึ้น จึงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามไปด้วย

จากตารางที่ 4.3 พบว่าในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าต่างก็ทำให้ค่า lag factor ในทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าฝักขาดชาวปลีมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในฝัก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ

การนำและการพาความร้อน ซึ่งในกรณีนี้ค่าของ Bi จะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 100 จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า lag factor ยิ่งมากจะทำให้ต้องใช้เวลาในการลดอุณหภูมิมากตามไปด้วย สำหรับค่าของ half - cooling time และ seven-eighths cooling time ในวิธีที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 67 ถึง 128 และ 157 ถึง 327 นาทีตามลำดับ พบว่าห้วงวัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และห้วงวัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับสถานะการลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่าอยู่ในช่วง 44 ถึง 148 และ 116 ถึง 412 นาทีตามลำดับ พบว่าห้วงวัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และห้วงวัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับค่า half cooling time ของสถานะการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าอยู่ในช่วง 70 ถึง 99 นาที พบว่าห้วงวัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และห้วงวัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด และสำหรับค่า seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 184 ถึง 261 นาที พบว่าห้วงวัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และห้วงวัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 12.77% และ 3.82% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 8.24% และ 1.5% ตามลำดับ สำหรับค่าของ cooling coefficients ของสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $6.95 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.53 \times 10^{-2}$  พบว่าห้วงวัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และน้อยที่สุดจากห้วงวัดที่ 1 สำหรับสถานะการลดขนาดความกว้างของผ้าใบค่า cooling coefficients จะอยู่ในช่วง  $5.25 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.91 \times 10^{-2}$  พบว่าห้วงวัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และในห้วงวัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด และสำหรับสถานะการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้ามีค่าอยู่ในช่วง  $8.31 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.21 \times 10^{-2}$  พบว่าในห้วงวัดที่ 3 มีค่ามากที่สุด และห้วงวัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าพบว่ามีค่า 0.42 0.58 และ 1.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าการปรับเปลี่ยนสถานะในการลดอุณหภูมิจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่ก่อให้เกิดการเหี่ยวและแห้งให้ปรากฏ

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิตีขึ้นกว่าวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน เมื่อเปรียบเทียบค่า cooling coefficients พบว่าค่า cooling coefficients ส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในบางห้วงวัดที่ตำแหน่งเดียวกันของการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าค่าของ cooling coefficients ที่ได้น้อยกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดของผักที่ไม่เท่ากัน และการจัดเรียงผักภายในตะกร้าที่อัดแน่นไม่เท่ากัน ทำให้ผักมีพื้นที่สัมผัสกับอากาศเย็นน้อยจึงส่งผลให้ค่าของ cooling coefficients มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน

### ค. Local Heat Transfer Coefficients

ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่า local heat transfer coefficients ในการลดอุณหภูมิขึ้นต้นด้วยวิธี Forced-Air Tunnel Cooling ของผักกาดขาวปลี จากผลการทดลองพบว่า local heat transfer coefficients จากการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าเพิ่มขึ้น 17.68% และ 22.15% ตามลำดับ จากตารางจะเห็นได้ว่า local heat transfer coefficients นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าของ cooling coefficients และพบว่าในตำแหน่งที่ 1 จะเป็นตำแหน่งที่เย็นช้ากว่าตำแหน่งอื่นเสมอ เนื่องจากตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่มีอากาศเย็นไหลผ่านได้น้อยกว่าตำแหน่งอื่นเพราะว่าในตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งที่อยู่ไกลจากพัดลมดูดอากาศมากที่สุด และการหมุนเวียนของอากาศเย็นภายในห้องเย็นนั้นตะกร้าในตำแหน่งข้างล่างจะมีการหมุนเวียนของอากาศที่ดีกว่าเนื่องจากพัดลมที่เป่าอากาศเย็นอยู่ด้านบน เมื่อเป่าลมออกมาปะทะกับผนังห้องเย็นจะทำให้อากาศเย็นไหลเวียนลงข้างล่างมากกว่าที่จะผ่านในตำแหน่งที่ 1 และในตะกร้าด้านล่างก็อยู่ในแนวเดียวกันกับพัดลมดูดอากาศจึงทำให้การหมุนเวียนของอากาศดียิ่งขึ้น

#### ง. ค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimensionless temperature จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลอง แสดงไว้ในตาราง 4.4 สำหรับกราฟ แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการลดอุณหภูมิขึ้นต้น แสดงดังรูปที่ 4.6 4.7 และ ภาคผนวก ค. ค่า Root Mean Square ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.9593 ถึง 0.9995 และค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0258 ถึง 0.1040 จากค่า  $R^2$  และ RMSE จะเห็นได้ว่าค่า dimensionless temperature จากแบบจำลองและจากการทดลองมีความสอดคล้องกันในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้พยากรณ์เวลาในการลดอุณหภูมิขึ้นต้นของผักกาดขาวปลีได้ดี

### 4.3.2 ผักกาดทางหงษ์

#### ก. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเย็นในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling

อุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองภายในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling มีค่าอยู่ในช่วง -2 ถึง 2 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงนาที่ที่ 60, 110, 140, 40, 150 และ 130 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 มีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 14 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลมาจากการละลายน้ำแข็งของเครื่องทำความเย็นซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่เครื่องทำความเย็นทำการละลายน้ำแข็ง มีค่าลดลงประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงขึ้น



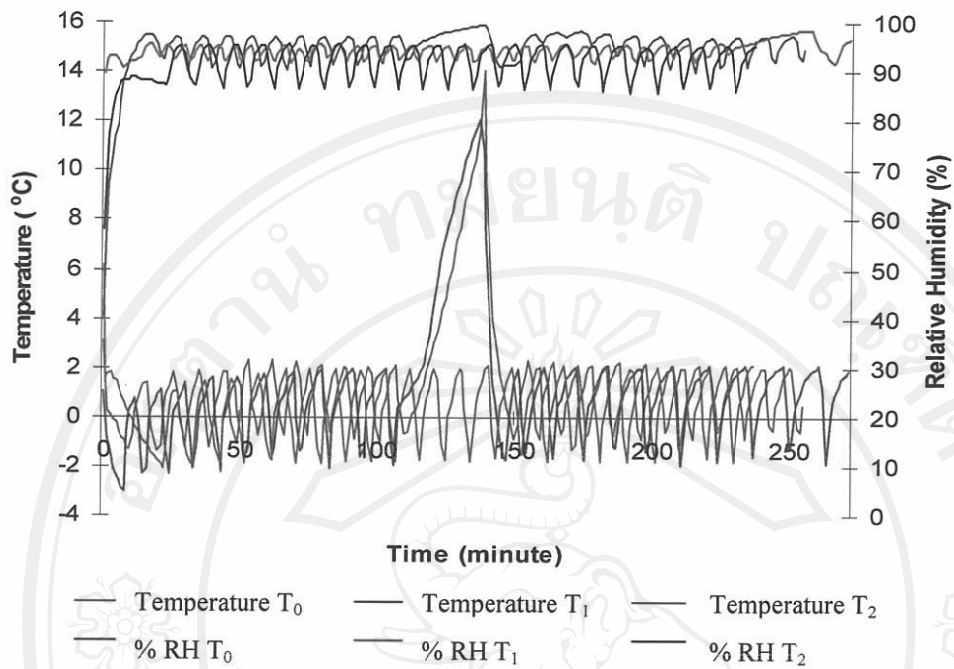
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนการทดลองและความเร็วลมภายในห้องเย็นในกระบวนการลดอุณหภูมิของผักกาดขาวปลีด้วยวิธี Forced-Air Tunnel Cooling ที่สภาวะต่างๆ

Treatment	ผักกาดขาวปลี		ผักกาดทางหยษ์		ผักกาดหอมห่อ		ผักกะหล่ำ	
	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (°C)	ความเร็ว ลมเฉลี่ย (m/s)	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (°C)	ความเร็ว ลมเฉลี่ย (m/s)	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (°C)	ความเร็ว ลมเฉลี่ย (m/s)	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (°C)	ความเร็ว ลมเฉลี่ย (m/s)
T <sub>0</sub> ครั้งที่ 1	16.8	1.1	18.5	1.1	19.0	1.1	20.6	1.1
T <sub>0</sub> ครั้งที่ 2	17.2	1.1	21.5	1.1	16.9	1.1	18.4	1.1
T <sub>1</sub> ครั้งที่ 1	20.7	1.1	21.6	1.1	17.5	1.1	17.3	1.1
T <sub>1</sub> ครั้งที่ 2	16.9	1.1	20.3	1.1	20.6	1.1	15.5	1.1
T <sub>2</sub> ครั้งที่ 1	21.0	1.1	21.5	1.1	19.3	1.1	24.7	1.1
T <sub>2</sub> ครั้งที่ 2	19.3	1.1	19.5	1.1	16.9	1.1	15.6	1.1

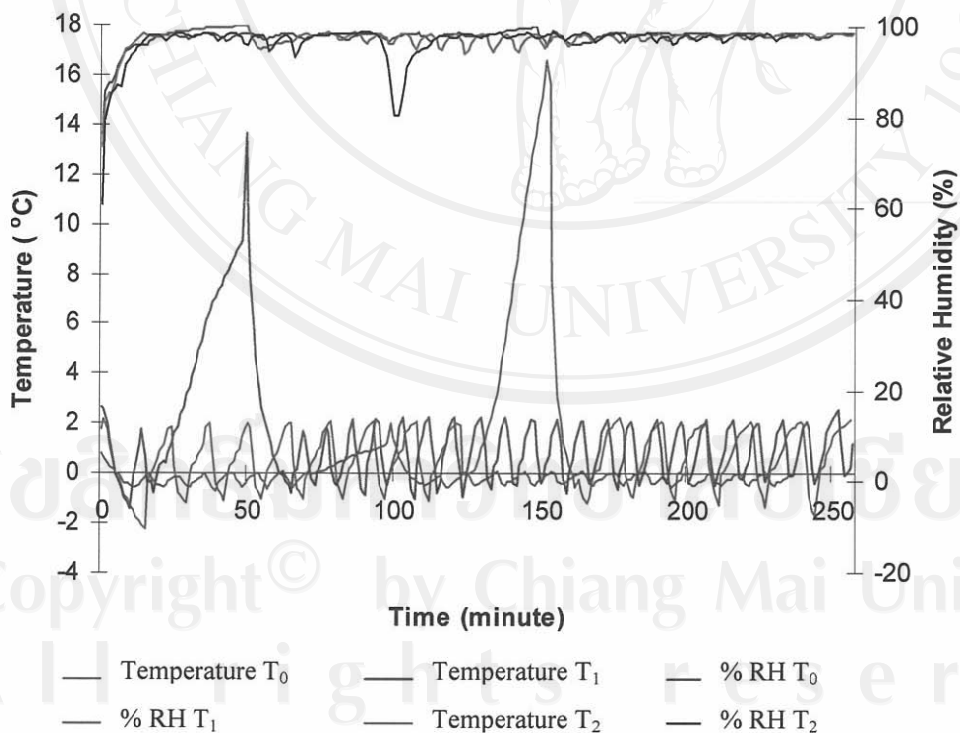
T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการขึ้นสัมพันธ์และอุณหภูมิอากาศของผักกาดขาวปลี ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการขึ้นสัมพันธ์และอุณหภูมิอากาศของผักกาดขาวปลี ในการทดลองครั้งที่ 2

\* หมายถึง T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)

ตารางที่ 4.2 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิชิ้นต้น  
ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดขาวปลี ในการทดลองครั้งที่ 1

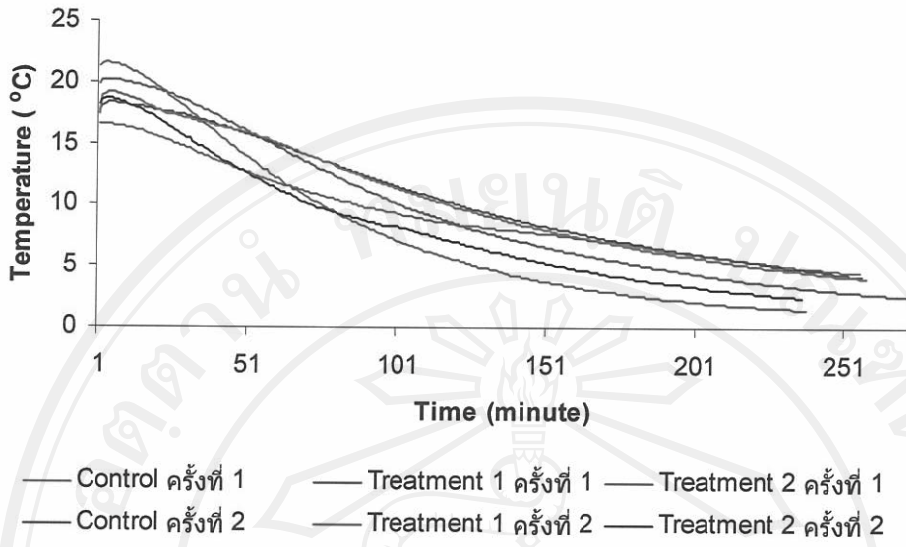
ลำดับ ตำแหน่ง ที่	j		C (1/minute)		half cooling time (min)		seven-eighths cooling time (min)		local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)		weight loss percentage (%)			
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
1	0.979	1.173	1.287	1.55 x 10 <sup>-2</sup>	9.08 x 10 <sup>-3</sup>	43	94	69	132	247	171	59.13	21.28	43.64
2	1.216	1.209	1.256	8.86 x 10 <sup>-3</sup>	1.05 x 10 <sup>-2</sup>	100	84	80	257	216	201	20.51	26.90	31.42
3	1.023	1.334	1.385	6.41 x 10 <sup>-3</sup>	1.18 x 10 <sup>-2</sup>	112	83	64	328	199	151	12.98	33.47	62.55
4	1.164	1.278	1.246	7.09 x 10 <sup>-3</sup>	1.36 x 10 <sup>-2</sup>	119	69	41	315	171	104	14.85	43.57	230.44
5	1.169	1.343	1.303	8.48 x 10 <sup>-3</sup>	2.15 x 10 <sup>-2</sup>	100	46	56	264	110	138	19.18	194.79	75.54
6	1.201	1.335	1.212	6.67 x 10 <sup>-3</sup>	1.41 x 10 <sup>-2</sup>	131	69	99	339	167	254	13.66	47.52	20.78

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

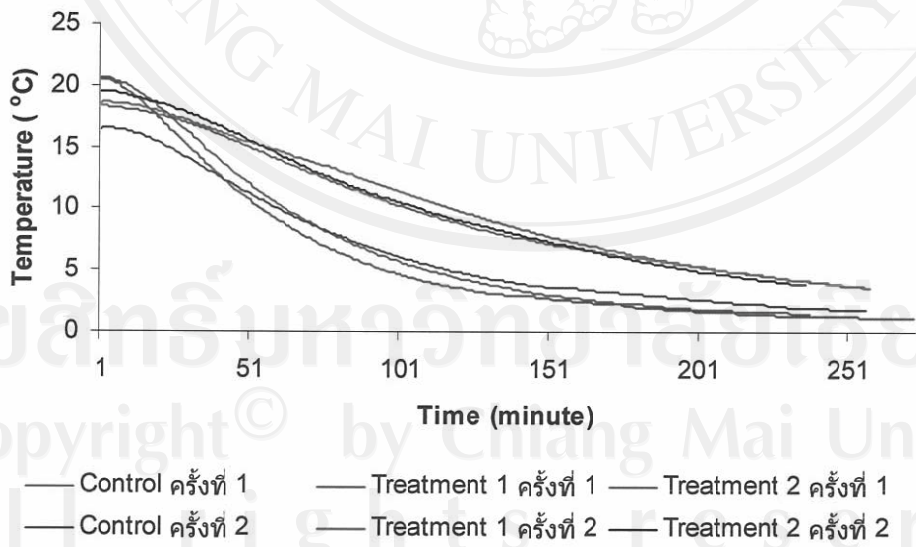
T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)





รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของผักกาดขาวปลีจากหัววัดที่ 3



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของผักกาดขาวปลีจากหัววัดที่ 5

ตารางที่ 4.3 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิขึ้นต้น  
ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดขาวปลี ในการทดลองครั้งที่ 2

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j		C (1/minute)			half cooling time (min)		seven-eighths cooling time (min)			local convective heat transfer (W/m <sup>20</sup> C)			weight loss percentage (%)				
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>			
	1	1.216	1.088	1.274	6.95 x 10 <sup>-3</sup>	5.25 x 10 <sup>-3</sup>	9.46 x 10 <sup>-3</sup>	128	148	99	327	412	245	14.45	10.03	22.70		
2	1.271	1.115	1.224	1.18 x 10 <sup>-2</sup>	6.96 x 10 <sup>-3</sup>	1.04 x 10 <sup>-2</sup>	78	115	86	195	314	218	33.44	14.50	26.72			
3	1.273	1.043	1.174	7.97 x 10 <sup>-3</sup>	1.35 x 10 <sup>-2</sup>	1.21 x 10 <sup>-2</sup>	117	54	70	291	156	184	17.51	43.34	34.87	0.42	0.58	1.22
4	1.265	1.122	1.128	9.32 x 10 <sup>-3</sup>	8.25 x 10 <sup>-3</sup>	1.08 x 10 <sup>-2</sup>	100	98	75	248	266	202	22.16	18.42	28.47			
5	1.393	1.158	1.156	1.53 x 10 <sup>-2</sup>	1.91 x 10 <sup>-2</sup>	9.34 x 10 <sup>-3</sup>	67	44	90	157	116	238	57.50	111.54	22.23			
6	1.288	1.144	1.089	1.17 x 10 <sup>-2</sup>	8.82 x 10 <sup>-3</sup>	8.31 x 10 <sup>-3</sup>	81	94	94	199	251	261	32.71	20.36	18.62			

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)

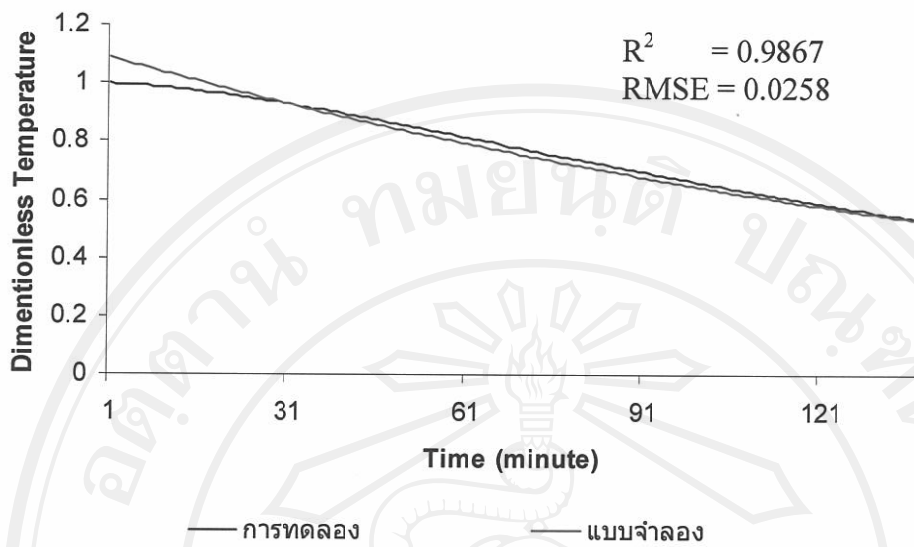
ตารางที่ 4.4 ค่า  $R^2$  และ RMSE ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการลดอุณหภูมิภาคขาวปลี

ลำดับ ตำแหน่ง	RMSE											
	$R^2$						T <sub>0</sub>					
	T <sub>1</sub>		T <sub>2</sub>		T <sub>1</sub>		T <sub>1</sub>		T <sub>1</sub>		T <sub>2</sub>	
ที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	0.9694	0.9960	0.9986	0.9867	0.9983	0.9973	0.06849	0.0558	0.0484	0.0258	0.0671	0.0755
2	0.9962	0.9931	0.9989	0.9901	0.9987	0.9984	0.06816	0.0679	0.0540	0.0324	0.0585	0.0628
3	0.9925	0.9968	0.9979	0.9991	0.9984	0.9990	0.0604	0.0693	0.0812	0.0553	0.0836	0.0400
4	0.9970	0.9975	0.9967	0.9930	0.9593	0.9995	0.0894	0.0699	0.0702	0.0422	0.0515	0.0392
5	0.9970	0.9871	0.9683	0.9964	0.9882	0.9987	0.1040	0.0916	0.0741	0.0650	0.0637	0.0430
6	0.9940	0.9955	0.9951	0.9909	0.9975	0.9970	0.0756	0.0703	0.0818	0.0433	0.0488	0.0311

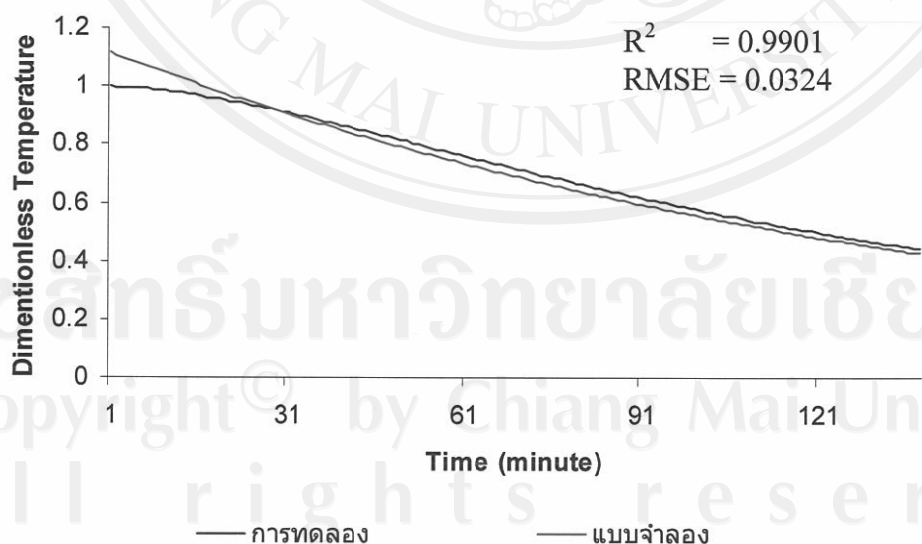
T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดพื้นที่ปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกาดขาวปรี ในการลดอุณหภูมิโดยลดขนาดของผ้าใบจากหัววัดที่ 1 ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกาดขาวปรี ในการลดอุณหภูมิโดยลดขนาดของผ้าใบจากหัววัดที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 2

## ข. Cooling Parameters

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่า lag factor ในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบันในหัววัดที่ 1 และ 4 มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าฝักมีการถ่ายเทความร้อนแบบการพามากกว่าการนำความร้อนจึงไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการเสียบหัววัดในการวัดอุณหภูมิผิดพลาดคือปลายของหัววัดไม่อยู่จุดกึ่งกลางฝัก และหัววัดอื่นมีค่ามากกว่า 1 สำหรับหัววัดที่มีค่า lag factor มากกว่า 1 แสดงว่ามีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายใน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งแบบการพาและแบบการนำความร้อน ทำให้การลดอุณหภูมิของฝักต้องใช้ระยะเวลามากขึ้น การลดขนาดความกว้างของผ้าใบในหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยกว่า 1 และวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 สำหรับค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time พบว่าในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 82 ถึง 180 และ 256 ถึง 502 นาทีตามลำดับ หัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 27 ถึง 130 และ 90 ถึง 350 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า มีค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 44 ถึง 158 และ 123 ถึง 423 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และในหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 36.26% และ 25.59% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 21.66% และ 19.33% ตามลำดับ สำหรับค่า cooling coefficient พบว่าสภาวะที่ใช้ในปัจจุบันพบว่าอยู่ในช่วง  $4.3 \times 10^{-3}$  ถึง  $8.27 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด อัตราการลดอุณหภูมิของหัววัดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $6.32 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.19 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้ามีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $5.23 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.77 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าพบว่ามีค่า 1.12 1.08 และ 0.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการคำนวณค่า cooling parameters ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่าค่า lag factor ในสภาวะที่ใช้ในปัจจุบัน หัววัดที่ 3 4 และ 5 มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความต้านทานการนำความร้อนภายในฝักน้อย การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่าทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายใน การถ่ายเทความร้อน



ร้อนเกิดขึ้นทั้งแบบการพาและการนำความร้อน สำหรับค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time พบว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 43 ถึง 196 และ 161 ถึง 582 นาที ตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 109 ถึง 258 และ 264 ถึง 714 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรงมีค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 65 ถึง 117 และ 149 ถึง 311 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 13.56% และ 15.21% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 28.58% และ 25.59% ตามลำดับ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรงพบว่ามีค่า 0.27, 0.37 และ 0.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

สำหรับค่า cooling coefficients พบว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $3.59 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.16 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด อัตราการลดอุณหภูมิของผักแสดงดังรูปที่ 4.35 วิธีลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $3.04 \times 10^{-3}$  ถึง  $8.89 \times 10^{-3}$  ในหัววัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรงมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $7.14 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.65 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด

จากข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของผักดีขึ้นกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งจะเห็นได้จากค่าของ cooling coefficients ที่มีค่าเพิ่มประมาณ 26.02% และ 46% ตามลำดับ ส่งผลให้การลดอุณหภูมิผักใช้เวลาที่สั้นลงกว่าเดิม อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าหัววัดที่ตำแหน่งเดียวกันของการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรงมีค่าของ cooling coefficients น้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดของผักที่ไม่เท่ากันและการจัดเรียงผักในตะแกรงที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อากาศเย็นผ่านเข้าไปในตะแกรงที่ตำแหน่งเดียวกันไม่เท่ากันจึงส่งผลให้ค่าของ cooling coefficients มีค่าน้อยกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน

#### ค. Local Heat Transfer Coefficients

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าค่า local heat transfer coefficients นั้นมีทิศทางเดียวกันกับค่าของ cooling coefficients ซึ่งคือเมื่อค่าของ cooling coefficients มาก ค่า local

heat transfer coefficients ก็จะมากตามไปด้วย จากผลการทดลองพบว่า ค่า local heat transfer coefficients จากการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า เพิ่มขึ้น 23.33% และ 23.12% ตามลำดับ ซึ่งค่า local heat transfer coefficients จะขึ้นอยู่กับปริมาณของอากาศที่ไหลผ่านตะกร้าในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.6 จะพบว่าในตำแหน่งที่ 4 เป็นตำแหน่งที่จะเย็นช้า และค่าของ local heat transfer coefficients มีค่าน้อยกว่าตำแหน่งอื่น การที่อากาศเย็นไหลผ่านตำแหน่งนี้น้อยเพราะ ตำแหน่งที่ 4 นี้เป็นตำแหน่งที่อยู่เหนือพัดลมดูดอากาศจึงทำให้การไหลของอากาศจึงทำได้น้อยกว่าตำแหน่งที่ในแนวเดียวหรืออยู่ตรงกับพัดลมดูดอากาศ และเมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละการทดลองจะพบว่า ถ้าในการทดลองนั้นตำแหน่งที่อยู่ด้านล่างเย็นเร็วที่สุด ตำแหน่งที่จะเย็นช้าที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่งด้านบน ในทางกลับกันถ้าตำแหน่งที่เย็นเร็วที่สุดอยู่ด้านบน ตำแหน่งที่ช้าที่สุดจะอยู่ด้านล่าง ทั้งนี้เนื่องมาจากการจัดเรียงตะกร้าภายในห้องเย็น บริเวณที่พัดลมเป่าอากาศเย็นออกมาซึ่งเป็นตัวที่คอยบังคับทิศทางของการไหลเวียนของอากาศให้ไหลเข้าด้านบนหรือไหลลงด้านล่างมากกว่ากัน จึงส่งผลให้ค่าของ local heat transfer coefficients ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด

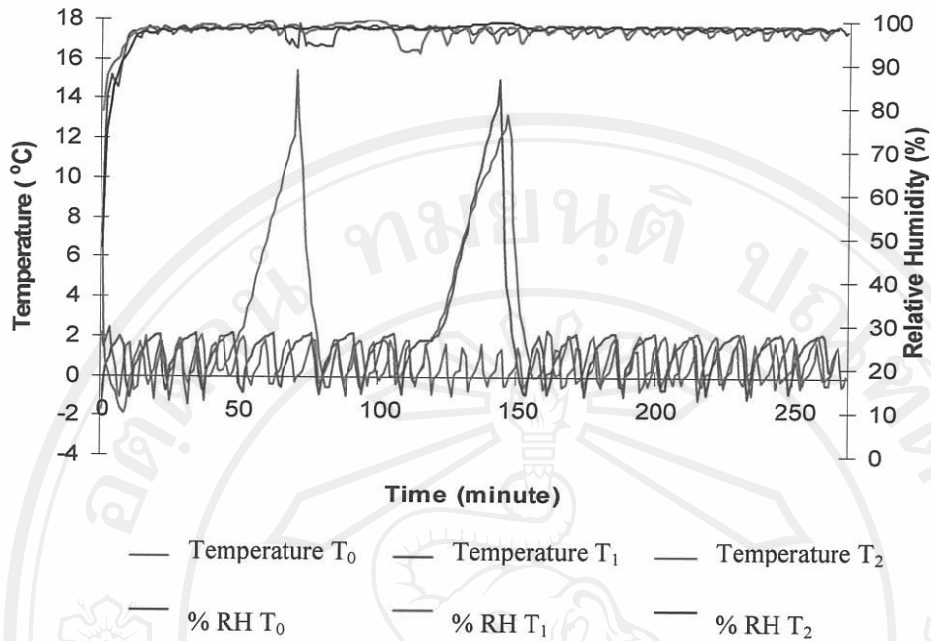
#### ง. ค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimensionless temperature จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง แสดงไว้ในตาราง 4.7 สำหรับกราฟ แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการลดอุณหภูมิขั้นต้น แสดงดังรูปที่ 4.12 4.13 และ ภาคผนวก ค. ค่า Root Mean Square ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.9166 ถึง 0.9990 และค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0114 ถึง 0.2929 จากค่า  $R^2$  และ RMSE จะเห็นได้ว่าค่า dimensionless temperature จากแบบจำลองและการทดลองมีความสอดคล้องกันในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้พยากรณ์เวลาในการลดอุณหภูมิขั้นต้นของผักกาดทางหงษ์ได้ดี

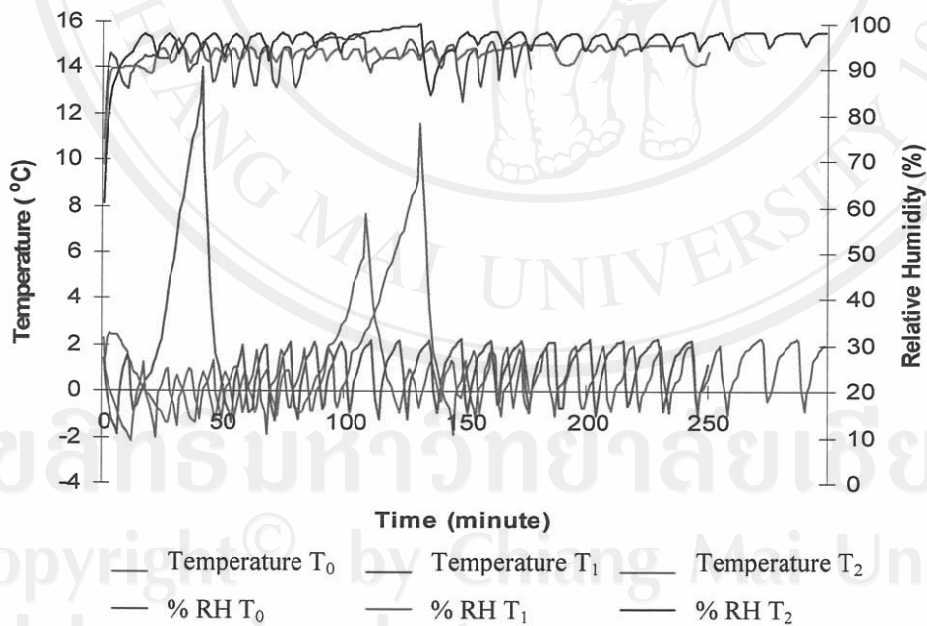
#### 4.3.3 ผักกาดหอมห่อ

##### ก. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเย็นในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling

อุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองภายในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling มีค่าอยู่ในช่วง -2 ถึง 2 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ย 0 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงนาที่ที่ 110, 180 และ 100 ดัง แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 มีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 15 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลมาจากการละลายน้ำแข็งของเครื่องทำความเย็นซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่เครื่องทำความเย็นทำการละลายน้ำแข็ง มีค่าลดลงประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากมาจากการอุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของฝักกาดหางหงษ์  
ในการทดลองครั้งที่ 1

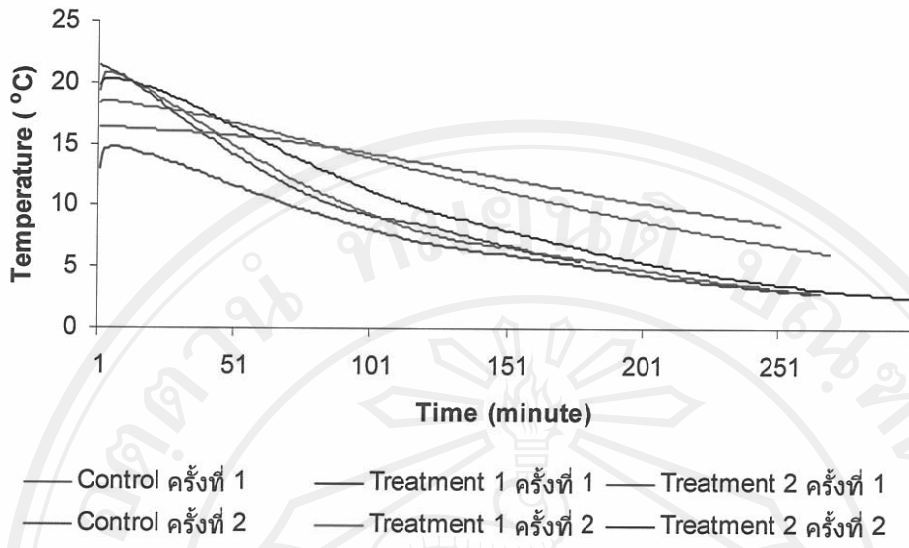


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอุณหภูมิสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของฝักกาดหางหงษ์  
ในการทดลองครั้งที่ 2

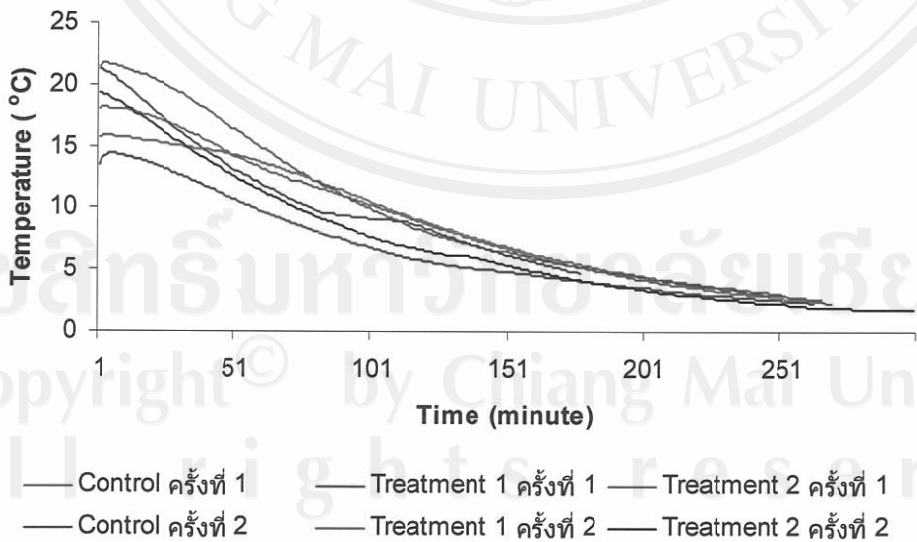
\*หมายเหตุ  $T_0$  = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

$T_1$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

$T_2$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของผักกาดหางหงษ์จากหัววัดที่ 3



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของผักกาดหางหงษ์จากหัววัดที่ 5

ตารางที่ 4.5 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิขั้นต้น ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดทางหงษ์ ในการทดลองครั้งที่ 1

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j			C (1/minute)			half cooling time (min)			seven-eighths cooling time (min)			local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)			weight loss percentage (%)		
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
1	0.976	1.183	1.226	7.41 x 10 <sup>-3</sup>	9.20 x 10 <sup>-3</sup>	8.18 x 10 <sup>-3</sup>	90	94	110	277	244	279	17.83	25.03	20.70			
2	1.087	1.203	1.217	7.55 x 10 <sup>-3</sup>	1.15 x 10 <sup>-2</sup>	7.72 x 10 <sup>-3</sup>	103	76	115	286	196	295	18.33	38.06	18.95			
3	1.087	1.186	1.109	4.31 x 10 <sup>-3</sup>	9.84 x 10 <sup>-3</sup>	8.96 x 10 <sup>-3</sup>	180	88	89	502	228	243	8.61	28.15	23.99	1.12	1.08	0.64
4	0.961	1.141	1.145	7.96 x 10 <sup>-3</sup>	6.32 x 10 <sup>-3</sup>	5.23 x 10 <sup>-3</sup>	82	130	158	256	350	423	19.85	14.19	11.00			
5	1.080	1.238	1.173	8.27 x 10 <sup>-3</sup>	1.23 x 10 <sup>-2</sup>	1.03 x 10 <sup>-2</sup>	93	73	82	261	185	216	21.06	44.05	30.90			
6	1.074	0.903	1.099	6.09 x 10 <sup>-3</sup>	2.19 x 10 <sup>-2</sup>	1.77 x 10 <sup>-2</sup>	126	27	44	353	90	123	13.48	1116.76	131.23			

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง (treatment 2)



ตารางที่ 4.6 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิเริ่มต้น ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดทางหงษ์ ในการทดลองครั้งที่ 2

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j		C (1/minute)		half cooling time (min)		seven-eighths cooling time (min)		local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)		weight loss percentage (%)								
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>						
1	1.019	1.153	1.251	1.251	3.75 x 10 <sup>-3</sup>	5.18 x 10 <sup>-3</sup>	1.26 x 10 <sup>-2</sup>	190	161	72	559	429	182	7.28	10.87	46.56	0.27	0.37	0.92
2	1.009	1.168	1.449	1.449	3.59 x 10 <sup>-3</sup>	6.61 x 10 <sup>-3</sup>	1.65 x 10 <sup>-2</sup>	196	128	65	582	338	149	6.90	15.11	97.87			
3	0.991	1.096	1.278	1.278	8.69 x 10 <sup>-3</sup>	3.04 x 10 <sup>-3</sup>	9.40 x 10 <sup>-3</sup>	79	258	100	238	714	247	22.80	5.68	25.98			
4	0.823	1.121	1.154	1.154	1.16 x 10 <sup>-2</sup>	6.24 x 10 <sup>-3</sup>	7.14 x 10 <sup>-3</sup>	43	129	117	161	351	311	39.05	13.94	16.88			
5	0.967	1.313	1.156	1.156	9.02 x 10 <sup>-3</sup>	8.89 x 10 <sup>-3</sup>	1.20 x 10 <sup>-2</sup>	73	109	70	227	264	185	24.26	23.65	41.21			
6	1.073	1.164	1.092	1.092	6.95 x 10 <sup>-3</sup>	6.45 x 10 <sup>-3</sup>	8.63 x 10 <sup>-3</sup>	110	131	91	309	346	251	16.22	14.59	22.54			

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง (treatment 2)

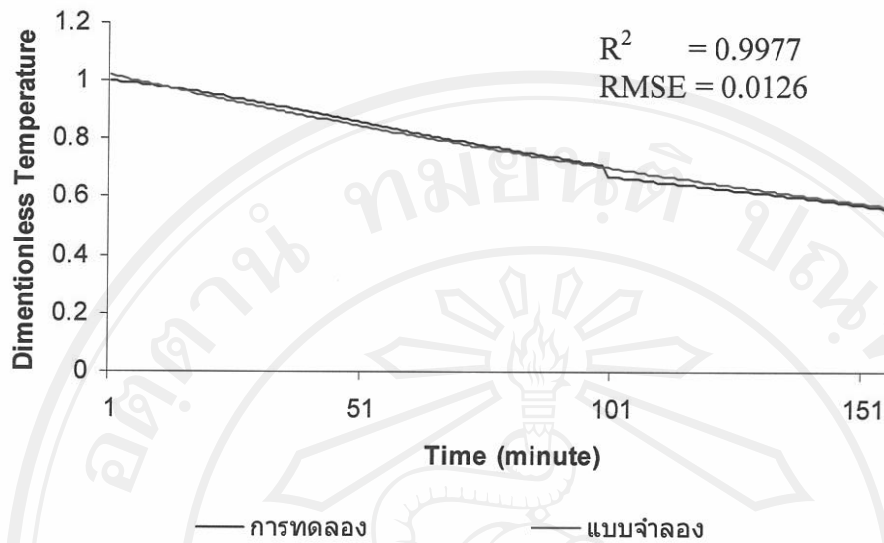
ตารางที่ 4.7 ค่า  $R^2$  และ RMSE ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการลดอุณหภูมิผักกาดหางหงษ์

สายวัด	RMSE																		
	T <sub>0</sub>			T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			T <sub>0</sub>			T <sub>1</sub>			T <sub>2</sub>			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
1	0.9959	0.9977	0.9985	0.9660	0.9976	0.994	0.9976	0.994	0.9981	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987
2	0.9959	0.9976	0.9782	0.9811	0.9978	0.9867	0.9811	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867	0.9867
3	0.9907	0.9912	0.9969	0.9764	0.9944	0.9981	0.9944	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981	0.9981
4	0.9967	0.9586	0.9931	0.9510	0.9941	0.9987	0.9941	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987	0.9987
5	0.9945	0.9863	0.9983	0.9166	0.9973	0.9966	0.9973	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966
6	0.9950	0.9966	0.9988	0.9863	0.9770	0.9990	0.9863	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990	0.9990

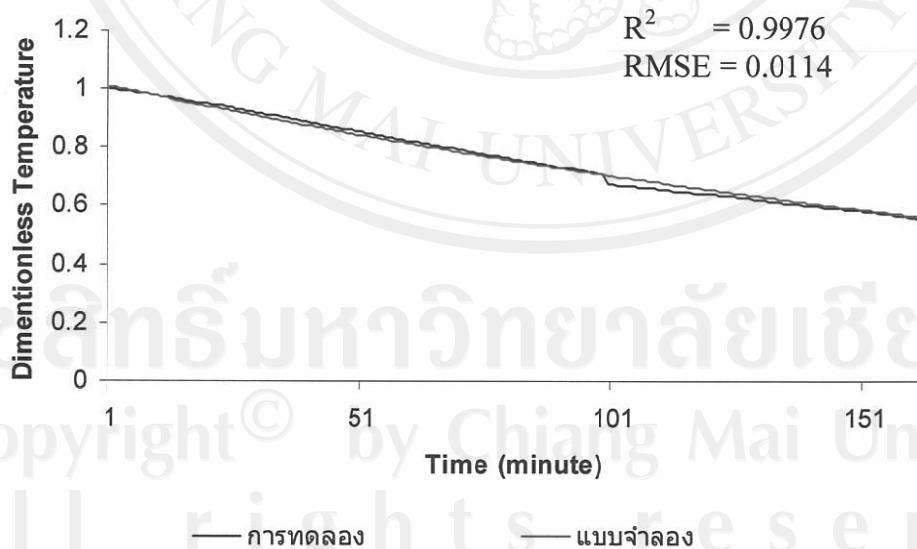
T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดของผ้าใบ (treatment 1)

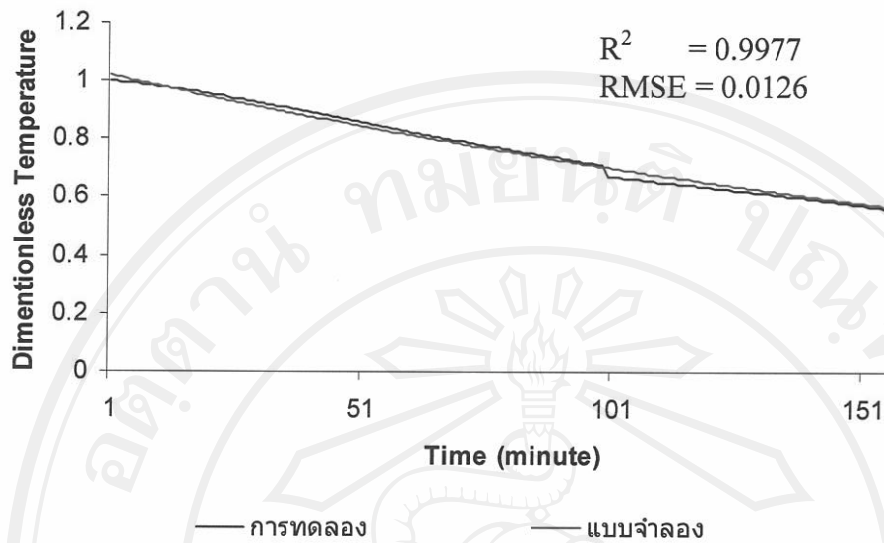
T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดพื้นที่ปิดของตะกร้า (treatment 2)



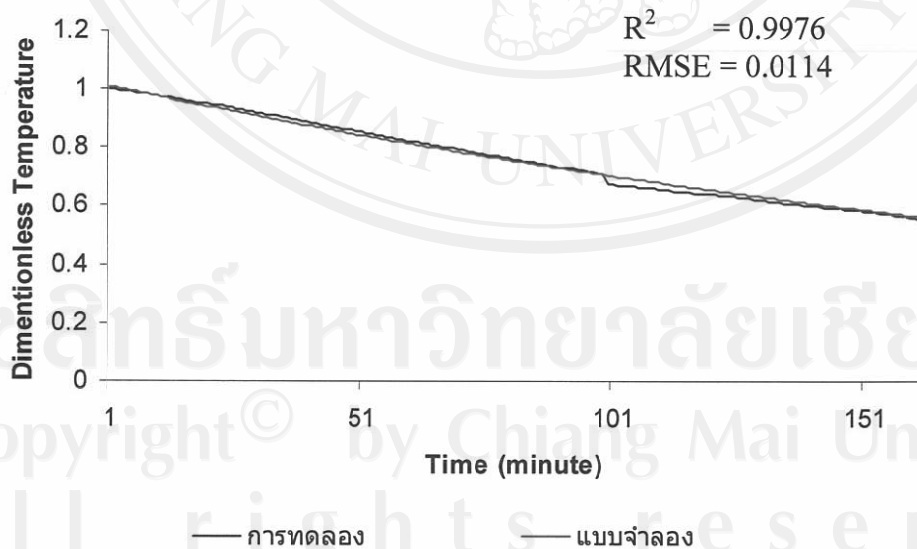
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของผักกาดหางหงษ์ ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบัน จากหัววัดที่ 1 ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของผักกาดหางหงษ์ ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบัน จากหัววัดที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองของผักกาดหางหงษ์ ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบัน จากหัววัดที่ 1 ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองของผักกาดหางหงษ์ ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบัน จากหัววัดที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 2

## ข. Cooling Parameters

จากการคำนวณเพื่อหาค่า cooling parameters ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ค่าของ lag factor ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 การลดขนาดความกว้างของผ้าใบในหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยกว่า 1 นอกนั้นมีค่ามากกว่า 1 และการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะกร้าพบว่าทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 ค่าของ lag factor ที่มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของผักแต่ละชนิด และค่า lag factor ที่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความต้านทานการนำความร้อนภายในน้อยมาก การถ่ายเทความร้อนจะเป็นแบบการพาอย่างเดียว ค่าของ Bi มีค่าน้อยกว่า 0.1 สำหรับค่า lag factor ที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีความต้านทานการนำความร้อนภายใน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นทั้งแบบการพาและการนำความร้อน ค่าของ Bi มีค่า 0.1 ถึง 100 สำหรับค่าของ half cooling time และ seven-eighths cooling time พบว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 62 ถึง 110 และ 162 ถึง 294 นาที ตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า half cooling time อยู่ในช่วง 29 ถึง 71 นาที พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับค่า seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 101 ถึง 195 นาที พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุดและหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าพบว่ามีค่าของ half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 45 ถึง 61 และ 109 ถึง 153 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด และสำหรับค่า cooling coefficients พบว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $7.52 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.38 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $1.07 \times 10^{-2}$  ถึง  $2.30 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า มีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $1.49 \times 10^{-2}$  ถึง  $2.23 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 29.66% และ 27.47% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 31.36% และ 36.22% ตามลำดับ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่ามีค่า 1.11, 1.23 และ 0.95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าของ lag factor ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันหัววัดที่ 5 มีค่าน้อยกว่า 1 ส่วนในสถานะลดขนาดความกว้างของผ้าใบหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งแสดงถึงว่าการนำความร้อนภายในผักมีค่าสูงมาก การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนเพียงอย่าง



เดียว ค่าของ Bi มีค่าน้อยกว่า 0.1 สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่าทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 ทุกหัววัด สำหรับค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 34 ถึง 96 และ 98 ถึง 253 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time อยู่ในช่วง 29 ถึง 78 นาที หัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด สำหรับ seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 90 ถึง 203 นาที หัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าพบว่า half cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 42 ถึง 92 นาที หัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด และ seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 108 ถึง 242 นาที หัววัดที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด และสำหรับค่า cooling coefficients พบว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $8.83 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.19 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด ลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $1.10 \times 10^{-2}$  ถึง  $2.45 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด และเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้ามีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $9.26 \times 10^{-3}$  ถึง  $2.11 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 5 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 16.58% และ 14.62% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 6.60% และ 10.33% ตามลำดับ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่ามีค่า 1.01 0.62 และ 1.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าค่าของ cooling coefficients ของการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 18.46% และ 25.68% ตามลำดับ ส่งผลให้การลดอุณหภูมิโดยการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ใช้เวลาในการลดอุณหภูมิน้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน แต่บางตำแหน่ง พบว่ายังมีค่าของ cooling coefficients น้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ตำแหน่งนั้นอากาศเย็นผ่านเข้าไปน้อยเมื่อเทียบกับสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดของผักที่ไม่เท่ากัน และการจัดเรียงภายในตะกร้าที่ไม่เหมือนกันจึงทำให้ปริมาณอากาศเย็นไหลผ่านผักได้น้อยลง ส่งผลทำให้ค่าของ cooling coefficients ที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าน้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน

### ค. Local Heat Transfer Coefficients

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าค่าของ local heat transfer coefficients ในแต่ละตำแหน่งของตะกร้ามีค่าแตกต่างกันซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในแต่ละตำแหน่งในการวัดนั้นจะมีการลดอุณหภูมิได้เร็วไม่เท่ากันเนื่องมาจากการไหลของอากาศเย็นภายในห้องเย็นไม่มีความสม่ำเสมอ จะเห็นว่า ในตำแหน่งที่ 2 และ 4 จะเป็นตำแหน่งที่จะเย็นช้ากว่าตำแหน่งอื่นเสมอ เนื่องมาจากการไหลของอากาศจะไหลลงสู่ตำแหน่งข้างล่างมากกว่า จึงทำให้ตำแหน่งตะกร้าด้านบนมีการไหลเวียนของอากาศเย็นน้อยกว่าตำแหน่งด้านล่างประกอบกับการจัดเรียงผักภายในตะกร้าที่ทำให้ช่องว่างภายในตะกร้ามีไม่เท่ากันจึงทำค่าของ local heat transfer coefficients มีค่าแตกต่างกันออกไป จากผลการทดลองพบว่า ค่า local heat transfer coefficients จากการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า เพิ่มขึ้น 8.33% และ 56.07% ตามลำดับ

### ง. ค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimensionless temperature จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลอง แสดงไว้ในตาราง 4.10 สำหรับกราฟ แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการลดอุณหภูมิขั้นต้น แสดงดังรูปที่ 4.18 4.19 และ ภาคผนวก ก. ค่า Root Mean Square ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.9507 ถึง 0.9987 และค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0270 ถึง 0.2206 จากค่า  $R^2$  และ RMSE จะเห็นได้ว่าค่า dimensionless temperature จากแบบจำลองและจากการทดลองมีความสอดคล้องกันในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้พยากรณ์เวลาในการลดอุณหภูมิขั้นต้นของผักกาดหอมห่อได้ดี

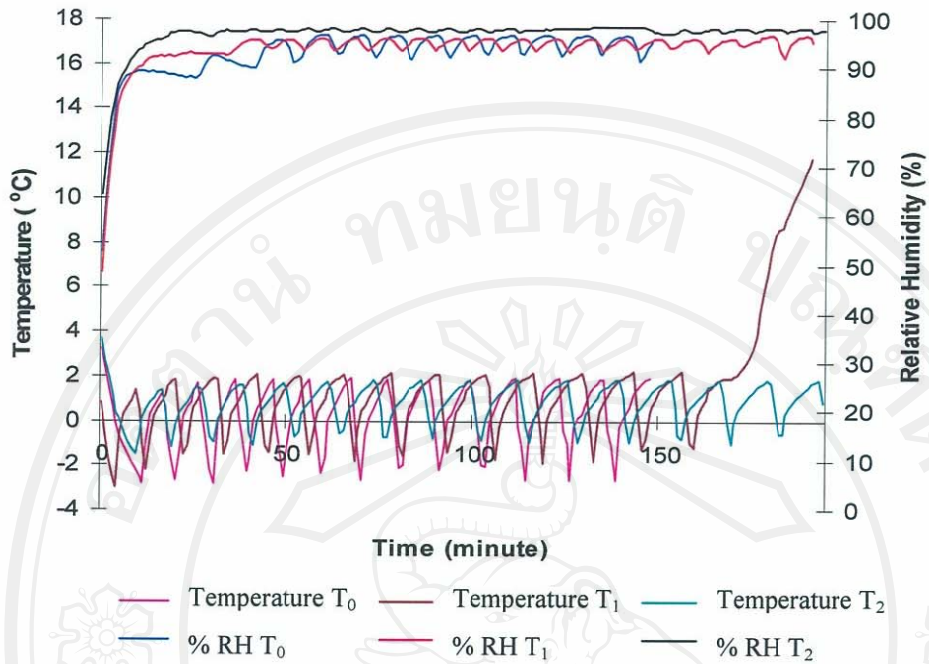
#### 4.3.4 ผักกะหล่ำปลี

##### ก. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเย็นในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling

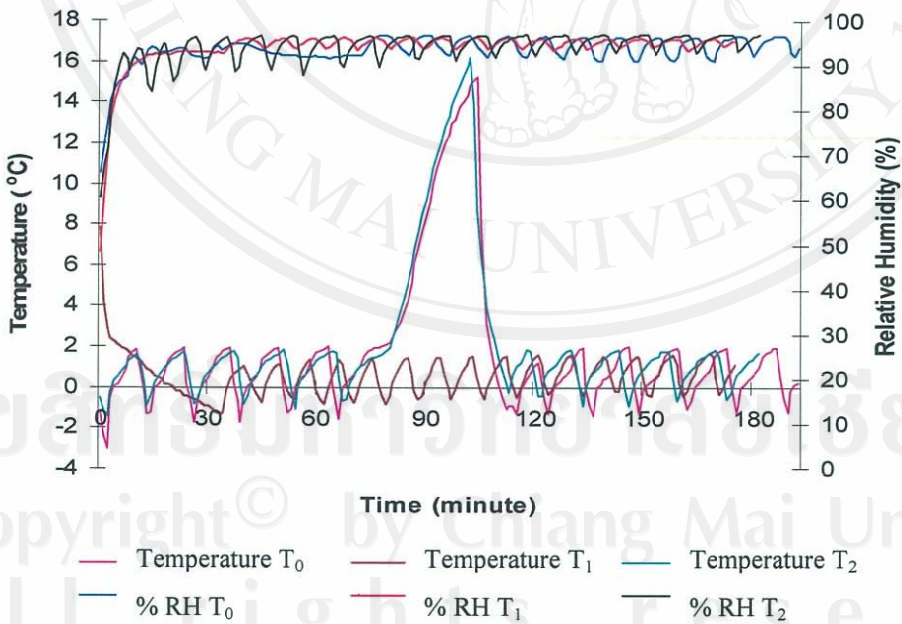
อุณหภูมิของอากาศขณะทำการทดลองภายในห้อง Forced-Air Tunnel Cooling มีค่าอยู่ในช่วง -2 ถึง 2 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 0 °C อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงนาทิตี่ 200, 170, 160, 250, 90 และ 190 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 มีค่าสูงขึ้นถึงประมาณ 15 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เป็นผลมาจากการละลายน้ำแข็งของเครื่องทำความเย็นซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ความชื้นสัมพัทธ์ขณะที่เครื่องทำความเย็นทำการละลายน้ำแข็ง มีค่าลดลงประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของอากาศมีค่าสูงขึ้น

##### ข. Cooling Parameters

จากการคำนวณหาค่าของ cooling parameters ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.11 พบว่าค่า lag factor ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของฝักกาดหอมห่อ  
ในการทดลองครั้งที่ 1

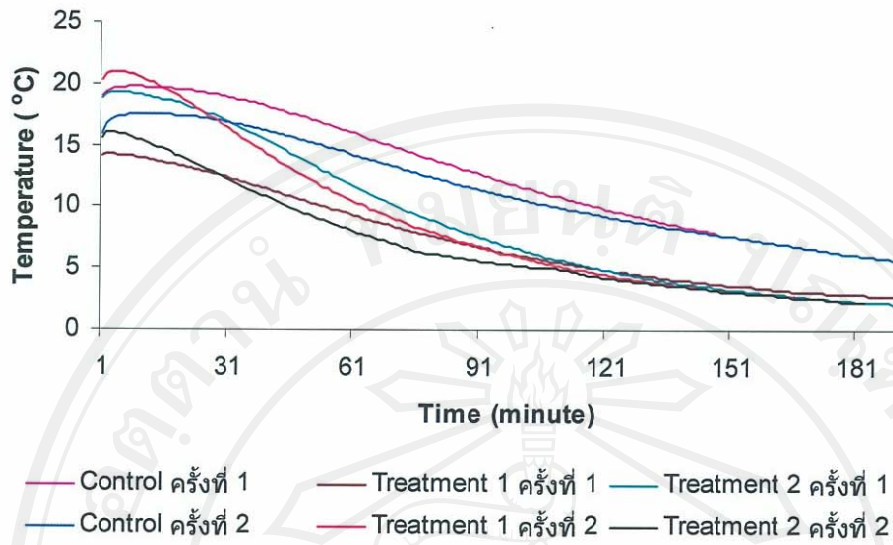


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของฝักกาดหอมห่อ  
ในการทดลองครั้งที่ 2

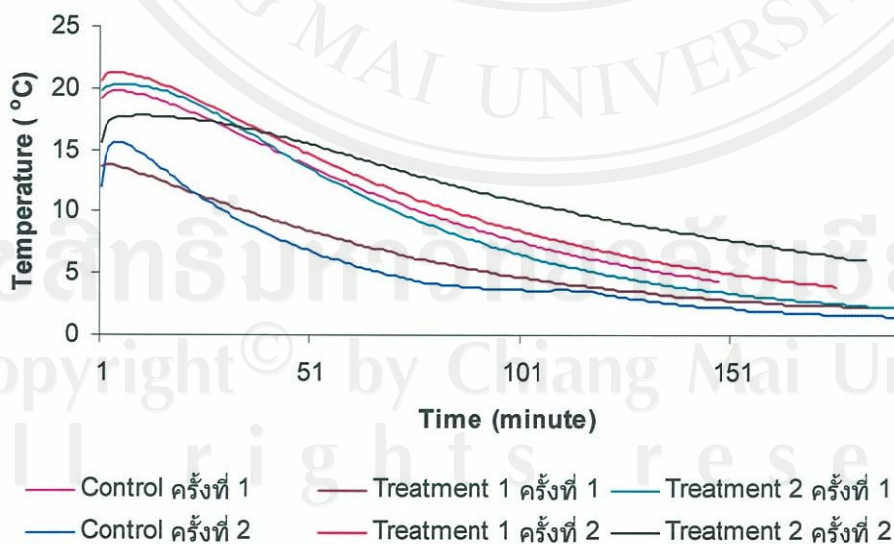
\*หมายเหตุ T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของฝักกาดหอมห่อจากหัววัดที่ 1



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของฝักกาดหอมห่อจากหัววัดที่ 2

ตารางที่ 4.8 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ plot เส้นกราฟการสูญเสียความร้อนในกระบวนการลดอุณหภูมิเริ่มต้น ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดหอมห่อ ในการทดลองครั้งที่ 1

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j			C (1/minute)			half cooling time (min)			seven-eighths cooling time (min)			local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)			weight loss percentage (%)		
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
1	1.142	1.199	1.264	7.52 x 10 <sup>-3</sup>	1.24 x 10 <sup>-2</sup>	1.51 x 10 <sup>-2</sup>	110	71	61	294	182	153	14.29	32.63	50.76			
2	1.130	1.142	1.233	1.22 x 10 <sup>-2</sup>	1.49 x 10 <sup>-2</sup>	1.52 x 10 <sup>-2</sup>	66	55	59	179	148	150	32.03	48.89	51.62			
3	1.208	1.210	1.327	1.20 x 10 <sup>-2</sup>	1.31 x 10 <sup>-2</sup>	2.16 x 10 <sup>-2</sup>	73	67	45	188	173	109	31.02	36.58	209.10	1.11	1.23	0.95
4	1.163	1.019	1.141	9.17 x 10 <sup>-3</sup>	1.07 x 10 <sup>-2</sup>	1.49 x 10 <sup>-2</sup>	92	66	55	243	195	148	19.26	25.03	48.82			
5	1.178	0.879	1.507	1.38 x 10 <sup>-2</sup>	1.92 x 10 <sup>-2</sup>	2.03 x 10 <sup>-2</sup>	62	29	54	162	101	122	41.30	110.29	142.97			
6	1.197	1.371	1.523	1.26 x 10 <sup>-2</sup>	2.30 x 10 <sup>-2</sup>	2.23 x 10 <sup>-2</sup>	69	44	50	179	104	112	33.98	370.54	275.38			

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่ปิดของตะกร้า (treatment 2)



ตารางที่ 4.9 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในระบบการลดอุณหภูมิขั้นต้น  
ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกาดหอมห่อ ในการทดลองครั้งที่ 2

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j			C (1/minute)			half cooling time (min)			seven-eighths cooling time (min)			local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)			weight loss percentage (%)		
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
1	1.164	1.197	1.147	8.83 x 10 <sup>-3</sup>	1.47 x 10 <sup>-2</sup>	1.82 x 10 <sup>-2</sup>	96	59	46	253	153	122	18.13	47.53	88.41			
2	1.065	1.178	1.177	2.19 x 10 <sup>-3</sup>	1.10 x 10 <sup>-2</sup>	9.26 x 10 <sup>-3</sup>	34	78	92	98	203	242	231.80	26.33	19.53			
3	1.255	0.879	1.328	1.63 x 10 <sup>-2</sup>	1.92 x 10 <sup>-2</sup>	2.09 x 10 <sup>-2</sup>	56	29	47	141	101	113	62.55	110.29	169.83	1.01	0.62	1.44
4	1.133	1.133	1.204	1.71 x 10 <sup>-2</sup>	1.20 x 10 <sup>-2</sup>	1.28 x 10 <sup>-2</sup>	48	68	68	128	183	176	72.23	30.86	34.97			
5	0.927	1.046	1.235	1.42 x 10 <sup>-3</sup>	2.36 x 10 <sup>-2</sup>	2.11 x 10 <sup>-2</sup>	44	31	43	141	90	108	43.55	543.80	179.31			
6	1.159	1.251	1.092	2.16 x 10 <sup>-2</sup>	2.45 x 10 <sup>-2</sup>	1.87 x 10 <sup>-2</sup>	39	37	42	103	94	115	211.04	1426.89	99.45			

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)

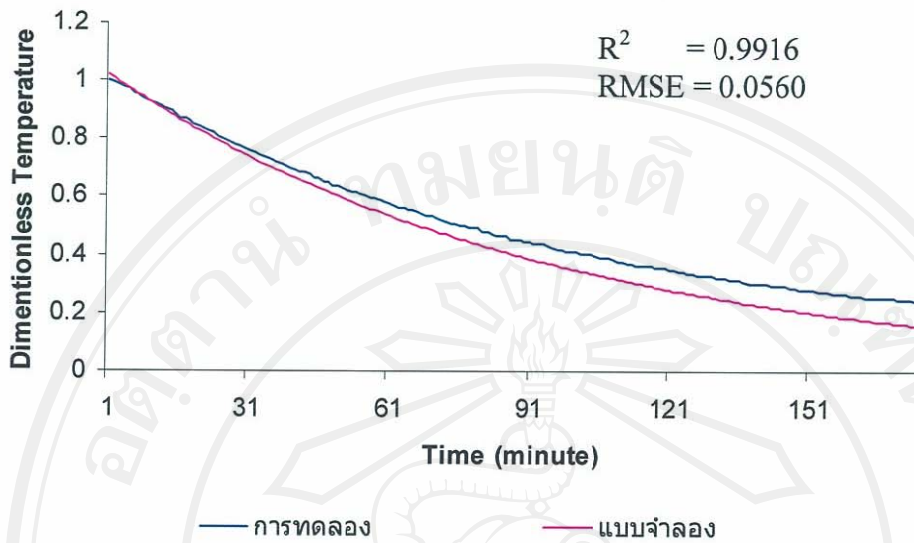
ตารางที่ 4.10 ค่า  $R^2$  และ RMSE ของแบบจำลองทางทฤษฎีศาสตร์ในการลดอุณหภูมิผักกาดหอมหัว

ลำดับ ตำแหน่ง	$R^2$												RMSE					
	$T_0$				$T_1$				$T_2$				$T_1$		$T_2$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.9822	0.9953	0.9963	0.9971	0.9956	0.9941	0.9969	0.0467	0.0676	0.0410	0.0630	0.0736	0.0630	0.0410	0.0630	0.0736		
2	0.9976	0.9761	0.9921	0.9987	0.9967	0.9923	0.0408	0.0538	0.0695	0.0394	0.0485	0.0542	0.0485	0.0394	0.0485	0.0542		
3	0.9897	0.9980	0.9973	0.9849	0.9958	0.9972	0.0530	0.0640	0.0690	0.0429	0.0705	0.0924	0.0705	0.0429	0.0705	0.0924		
4	0.9881	0.9911	0.9916	0.9987	0.9978	0.9970	0.0385	0.0553	0.0560	0.0270	0.0477	0.0770	0.0477	0.0270	0.0477	0.0770		
5	0.9968	0.9764	0.9825	0.9749	0.9507	0.9750	0.0453	0.0465	0.1513	0.0308	0.1757	0.0509	0.1757	0.0308	0.1757	0.0509		
6	0.9928	0.9859	0.9980	0.9775	0.9859	0.9895	0.0524	0.0565	0.2206	0.0496	0.1450	0.0588	0.1450	0.0496	0.1450	0.0588		

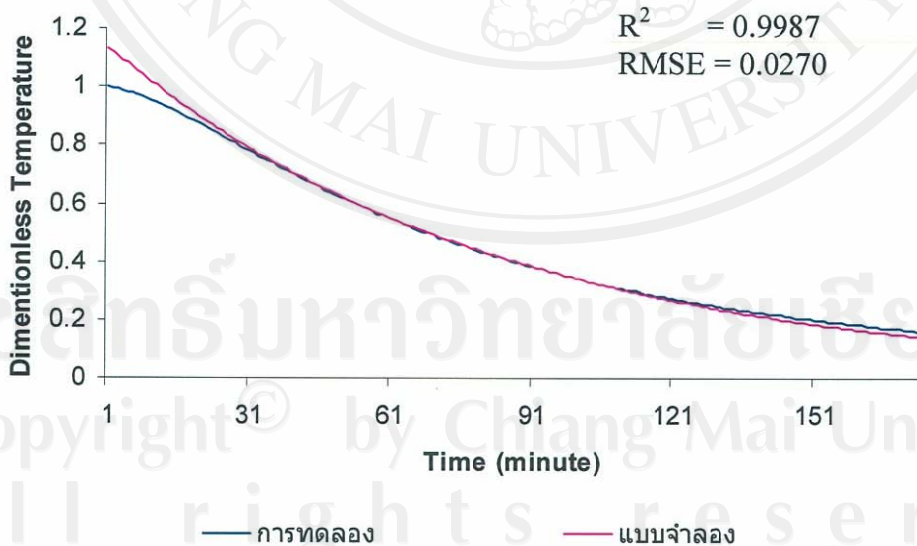
$T_0$  = วิธีการลดอุณหภูมิที่ซ้ำใจกัน (control)

$T_1$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดของผ้าใบ (treatment 1)

$T_2$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกาดหอมห่อ ในการลดอุณหภูมิโดยลดขนาดความกว้างของผ้าใบ จากหัววัดที่ 4 ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกาดหอมห่อ ในการลดอุณหภูมิโดยลดขนาดความกว้างของผ้าใบ จากหัววัดที่ 4 ในการทดลองครั้งที่ 2

ตะกร้าในทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าฝักกะหล่ำปลีมีความต้านทานการนำความร้อนภายในฝัก การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นทั้งแบบการพาและการนำความร้อนค่าของ Bi มีค่า 0.1 ถึง 100 ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันพบว่าค่าของ half cooling time และ seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 102 ถึง 181 และ 289 ถึง 484 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุด สำหรับการลดขนาดความกว้างของผ้าใบพบว่าค่า half cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 92 ถึง 160 นาที ในหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด สำหรับค่า seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 244 ถึง 415 นาที พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 4 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้าพบว่าค่าของ half cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 110 ถึง 151 นาที พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด และ seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 303 ถึง 407 นาที ในหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับค่า cooling coefficients ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $4.57 \times 10^{-3}$  ถึง  $7.40 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุดและหัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอัตราการลดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.44 การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $5.44 \times 10^{-3}$  ถึง  $9.41 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุดและหัววัดที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด และการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะกร้ามีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $5.39 \times 10^{-3}$  ถึง  $7.30 \times 10^{-3}$  พบว่าในหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุดและหัววัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่า การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 10.07% และ 14.25% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 13.89% และ 13.36% ตามลำดับ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่ามีค่า 0.95 0.52 และ 0.74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าการปรับเปลี่ยนสถานะในการลดอุณหภูมิจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ก่อให้เกิดการเหี่ยวและแห้งให้ปรากฏ

จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่าของ lag factor ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า พบว่าทุกหัววัดมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีความต้านทานการนำความร้อนภายในฝัก การถ่ายเทความร้อนจะเป็นทั้งแบบการพาและแบบการนำความร้อน ค่าของ Bi มีค่า 0.1 ถึง 100 สำหรับค่าของ lag factor ขึ้นอยู่กับค่าของคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของฝักแต่ละชนิด ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันพบว่า half cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 108 ถึง 175 นาที พบว่าหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุด และ seven-eighths cooling time มีค่าอยู่ในช่วง 277 ถึง 449 นาที หัววัดที่ 1 มีค่าน้อย

ที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุด สำหรับการลดขนาดความกว้างของผ้าใบค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 83 ถึง 163 และ 214 ถึง 440 นาทีตามลำดับ หัววัดที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 6 มีค่ามากที่สุด และการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง มีค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time อยู่ในช่วง 75 ถึง 112 และ 200 ถึง 313 นาทีตามลำดับ พบว่าหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด และหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด สำหรับค่าของ cooling coefficients ในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง  $5.05 \times 10^{-3}$  ถึง  $8.48 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 1 มีค่ามากที่สุด และหัววัดที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด การลดขนาดความกว้างของผ้าใบมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $5.00 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.06 \times 10^{-2}$  พบว่าหัววัดที่ 2 มีค่ามากที่สุดและหัววัดที่ 6 มีค่าน้อยที่สุด และการปรับเปลี่ยนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะแกรงมีค่า cooling coefficients อยู่ในช่วง  $6.90 \times 10^{-3}$  ถึง  $1.11 \times 10^{-3}$  พบว่าหัววัดที่ 3 มีค่ามากที่สุดและหัววัดที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด (อัตราการลดอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23) จากผลการทดลองพบว่า การลดขนาดความกว้างของผ้าใบ ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 10.03% และ 6.50% ตามลำดับ สำหรับการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง ค่า half cooling time และ seven-eighths cooling time ลดลงประมาณ 20.54% และ 17.00% ตามลำดับ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักของวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน วิธีลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง พบว่ามีค่า 0.78 0.41 และ 0.47 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าค่าของ cooling coefficients การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง มีค่าเพิ่มสูงประมาณ 9.37% และ 20.57% ตามลำดับขึ้นทำให้การลดอุณหภูมิผกใช้เวลาน้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบันและในหัววัดเดียวกัน พบว่าค่าของ cooling coefficients ของการปรับเปลี่ยนขนาดผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรงมีค่าน้อยกว่าในสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องมาจากปริมาณอากาศเย็นที่ไหลผ่านตะแกรงได้น้อยกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน อาจเนื่องมาจากขนาดของผกที่ไม่เท่ากันและการจัดเรียงผกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีช่องว่างภายในตะแกรงน้อย อากาศเย็นผ่านได้น้อยจึงส่งผลให้ค่าของ cooling coefficients มีค่าน้อยกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน

#### ค. Local Heat Transfer Coefficients

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าค่า local heat transfer coefficients นั้นจะไปในทิศทางเดียวกันกับค่าของ cooling coefficients เมื่อค่า cooling coefficients มีค่ามาก ค่าของ local heat transfer coefficients จะมากตามไปด้วย จากการลดขนาดความกว้างของผ้าใบและการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง เพิ่มขึ้น 23.93% และ 26.80% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในตำแหน่งต่างๆ จะพบว่าตำแหน่งที่มีการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ซึ่งแสดงถึงว่ามีการลดอุณหภูมิลงได้ช้าที่จะอยู่



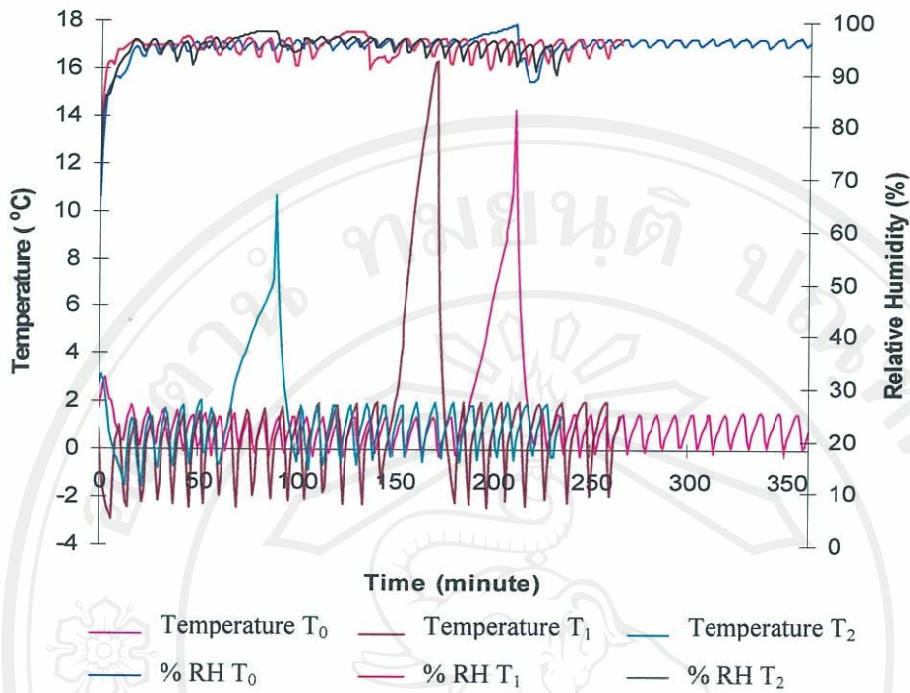
ในตำแหน่งด้านบนของชั้นตะกร้า คือในตำแหน่งที่ 1 2 และ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทิศทางการไหลของอากาศภายในห้องเย็นนั้นจะไหลลงสู่ตำแหน่งด้านล่างมากกว่าด้านบน ประกอบกับในตำแหน่งด้านล่างมีพัดลมดูดอากาศจึงทำให้ตะกร้าในตำแหน่งด้านล่างมีการลดอุณหภูมิลงได้เร็วกว่าตะกร้าชั้นบน

#### ง. ค่าความคลาดเคลื่อน

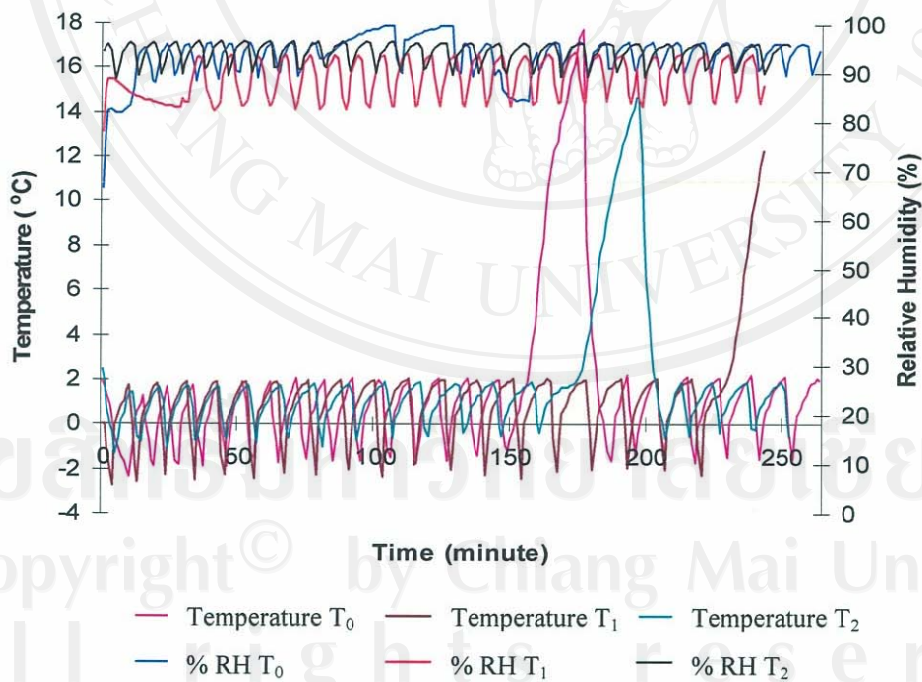
ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimensionless temperature จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลอง แสดงไว้ในตาราง 4.13 สำหรับกราฟ แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการลดอุณหภูมิขั้นต้น แสดงดังรูปที่ 4.24 4.25 และ ภาคผนวก ก. ค่า Root Mean Square ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 0.9884 ถึง 0.9987 และค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0108 ถึง 0.1177 จากค่า  $R^2$  และ RMSE จะเห็นได้ว่าค่า dimensionless temperature จากแบบจำลองและจากการทดลองมีความสอดคล้องกันในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้พยากรณ์เวลาในการลดอุณหภูมิขั้นต้นของผักกะหล่ำปลีได้ดี

#### 4.4 การสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการลดอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.2 ถึง 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ระหว่างการลดอุณหภูมิด้วยวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน วิธีลดขนาดความกว้างของผ้าใบ และวิธีเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า ผักกาดขาวปลี ครั้งที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.35, 1.34 และ 1.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และครั้งที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.42, 0.58 และ 1.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับผักกาดทางหงษ์ ครั้งที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนัก 1.12, 1.08 และ 0.64 เปอร์เซ็นต์ และครั้งที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.27, 0.37 และ 0.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับผักกาดหอมห่อ ครั้งที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนัก 1.11, 1.23 และ 0.95 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และครั้งที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนัก 1.01, 0.62 และ 1.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับผักกะหล่ำปลี ครั้งที่ 1 มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.95, 0.52 และ 0.74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และครั้งที่ 2 มีการสูญเสียน้ำหนัก 0.78, 0.41 และ 0.47 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นว่าการปรับเปลี่ยนสถานะในบางการทดลองมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าสถานะที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเย็นของการปรับเปลี่ยนสถานะมีค่ามากกว่าจึงทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า พบว่า ผักมีการสูญเสียน้ำหนักที่แตกต่างกันอาจเนื่องมาจาก การลดขนาดความกว้างของผ้าใบและอัตราส่วนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะกร้า ทำให้ผักสัมผัสกับอากาศเย็นได้มากขึ้น ประกอบกับความเร็วมวลของอากาศที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้ผักมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของผักกะหล่ำ ในการทดลองครั้งที่ 1

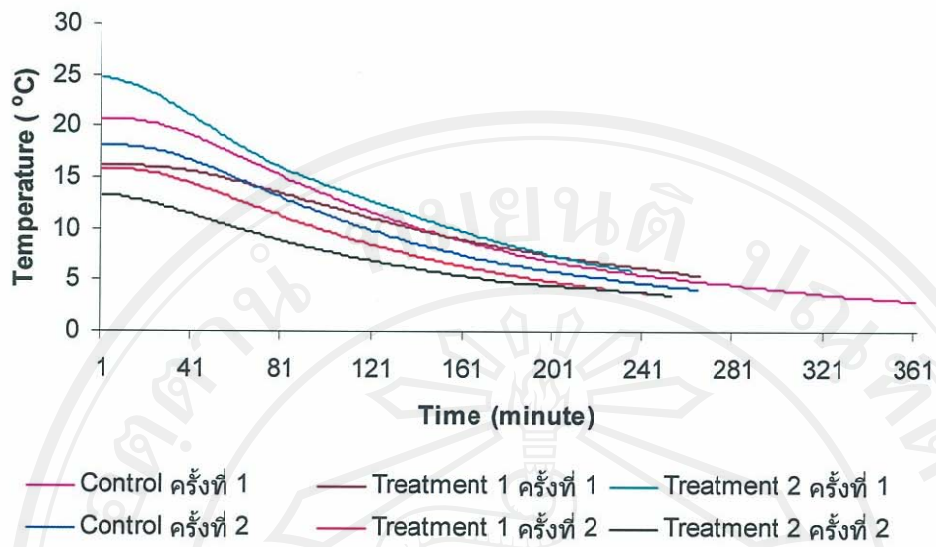


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศของผักกะหล่ำ ในการทดลองครั้งที่ 2

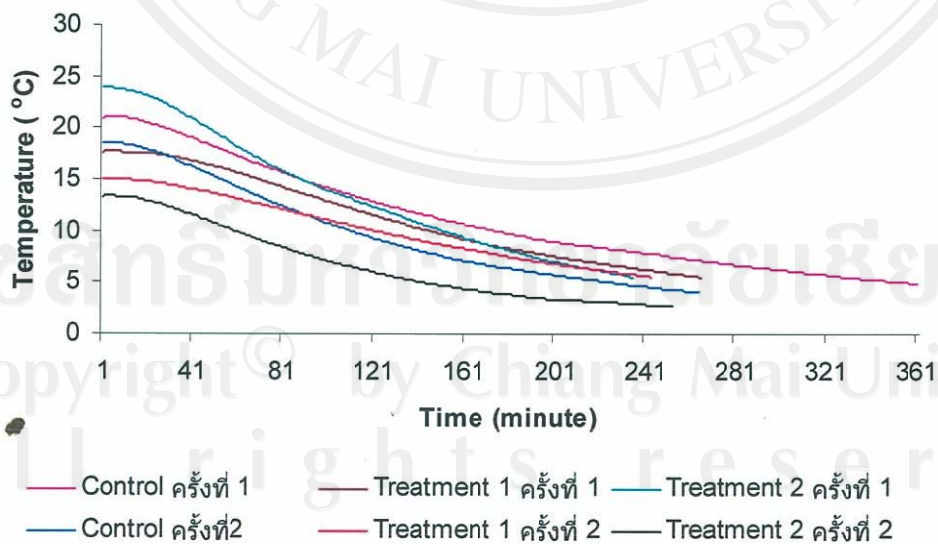
\*หมายเหตุ T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของฝักกะหล่ำปลีจากหัววัดที่ 5



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการลดอุณหภูมิของฝักกะหล่ำปลีจากหัววัดที่ 6

ตารางที่ 4.11 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิชิ้นต้น  
ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกะหล่ำปลี ในการทดลองครั้งที่ 1

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j		C (1/minute)		half cooling time (min)		seven-eighths cooling time (min)		local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)		weight loss percentage (%)	
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub>
1	1.110	1.199 1.127	5.30 x 10 <sup>-3</sup>	7.26 x 10 <sup>-3</sup> 5.39 x 10 <sup>-3</sup>	150 121 151	412 311 407	12.41	20.51 12.73	0.95	0.52 0.74		
2	1.144	1.238 1.100	4.57 x 10 <sup>-3</sup>	9.41 x 10 <sup>-3</sup> 6.48 x 10 <sup>-3</sup>	181 96 122	484 244 335	10.06	34.49 16.92				
3	1.061	1.029 1.144	7.40 x 10 <sup>-3</sup>	7.88 x 10 <sup>-3</sup> 7.30 x 10 <sup>-3</sup>	102 92 113	289 267 303	21.22	23.83 20.72				
4	1.162	1.197 1.062	5.36 x 10 <sup>-3</sup>	5.44 x 10 <sup>-3</sup> 5.51 x 10 <sup>-3</sup>	157 160 137	415 415 388	12.63	12.89 13.15				
5	1.137	1.207 1.067	6.93 x 10 <sup>-3</sup>	5.56 x 10 <sup>-3</sup> 6.86 x 10 <sup>-3</sup>	119 159 111	318 408 312	18.94	13.31 18.60				
6	1.042	1.208 1.104	4.74 x 10 <sup>-3</sup>	5.92 x 10 <sup>-3</sup> 7.17 x 10 <sup>-3</sup>	155 149 110	447 383 304	10.57	14.67 20.08				

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ไปจุ่ม (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะแกรง (treatment 2)

ตารางที่ 4.12 ค่า cooling parameters local convective heat transfer และ เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการลดอุณหภูมิขึ้นต้น

ด้วยวิธี forced-air tunnel cooling ของผักกะหล่ำปลี ในการทดลองครั้งที่ 2

สายวัด ตำแหน่ง ที่	j		C (1/minute)			half cooling time (min)		seven-eighths cooling time (min)		local convective heat transfer (W/m <sup>2</sup> °C)		weight loss percentage (%)			
	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	
1	1.306	1.226	1.085	8.48 x 10 <sup>-3</sup>	8.69 x 10 <sup>-3</sup>	6.90 x 10 <sup>-3</sup>	113	103	112	277	263	313	27.56	28.94	18.78
2	1.247	1.212	1.283	6.21 x 10 <sup>-3</sup>	1.06 x 10 <sup>-2</sup>	1.03 x 10 <sup>-2</sup>	147	83	91	370	214	225	15.81	46.75	43.39
3	1.208	1.143	1.155	5.05 x 10 <sup>-3</sup>	6.16 x 10 <sup>-3</sup>	1.11 x 10 <sup>-2</sup>	175	134	75	449	359	200	11.56	15.59	53.41
4	1.287	1.161	1.264	7.84 x 10 <sup>-3</sup>	5.72 x 10 <sup>-3</sup>	8.90 x 10 <sup>-3</sup>	121	147	104	297	389	260	23.64	13.91	30.43
5	1.258	1.211	1.125	8.07 x 10 <sup>-3</sup>	7.78 x 10 <sup>-3</sup>	7.74 x 10 <sup>-3</sup>	114	114	105	286	292	284	24.98	23.25	23.08
6	1.204	1.129	1.252	8.15 x 10 <sup>-3</sup>	5.00 x 10 <sup>-3</sup>	1.04 x 10 <sup>-2</sup>	108	163	88	278	440	220	25.44	11.39	44.86

T<sub>0</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

T<sub>1</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ (treatment 1)

T<sub>2</sub> = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการเพิ่มพื้นที่เปิดของตะกร้า (treatment 2)



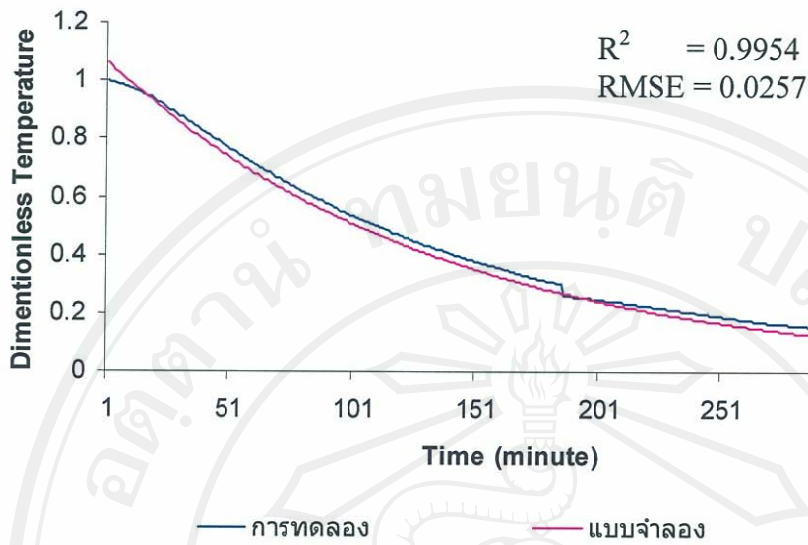
ตารางที่ 4.13 ค่า  $R^2$  และ RMSE ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการลดอุณหภูมิผักกะหล่ำปลี

ลำดับ ตำแหน่ง	$R^2$																			
	$T_0$			$T_1$			$T_2$			$T_0$			$T_1$			$T_2$				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.9967	0.9943	0.9940	0.9961	0.9908	0.9904	0.0245	0.0747	0.0480	0.0586	0.0516	0.0496	0.0480	0.0586	0.0516	0.0496	0.0480	0.0586	0.0516	0.0496
2	0.9978	0.9901	0.993	0.9977	0.9975	0.9908	0.0400	0.0638	0.0551	0.0641	0.0469	0.0787	0.0551	0.0641	0.0469	0.0787	0.0551	0.0641	0.0469	0.0787
3	0.9954	0.9884	0.9912	0.9961	0.9947	0.9923	0.0257	0.0562	0.0313	0.0448	0.0540	0.0803	0.0313	0.0448	0.0540	0.0803	0.0313	0.0448	0.0540	0.0803
4	0.9977	0.9933	0.9909	0.9916	0.9971	0.9947	0.0351	0.0743	0.0508	0.0451	0.0362	0.0811	0.0508	0.0451	0.0362	0.0811	0.0508	0.0451	0.0362	0.0811
5	0.9970	0.9959	0.9902	0.9956	0.9987	0.9946	0.0325	0.0680	0.0543	0.0518	0.0375	0.0627	0.0543	0.0518	0.0375	0.0627	0.0543	0.0518	0.0375	0.0627
6	0.9967	0.9970	0.9922	0.9932	0.9975	0.9920	0.0108	0.0501	0.0523	0.1177	0.0422	0.0771	0.0523	0.1177	0.0422	0.0771	0.0523	0.1177	0.0422	0.0771

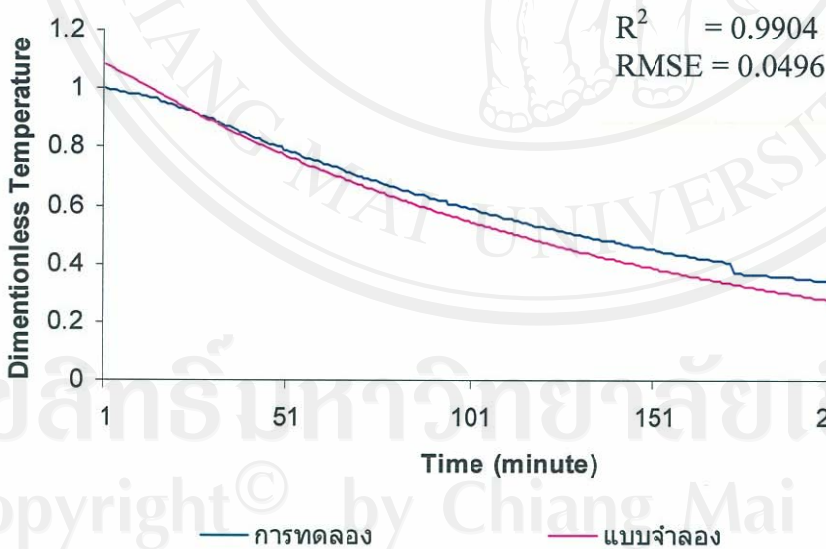
$T_0$  = วิธีการลดอุณหภูมิที่ใช้ปัจจุบัน (control)

$T_1$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดของผ้าใบ (treatment 1)

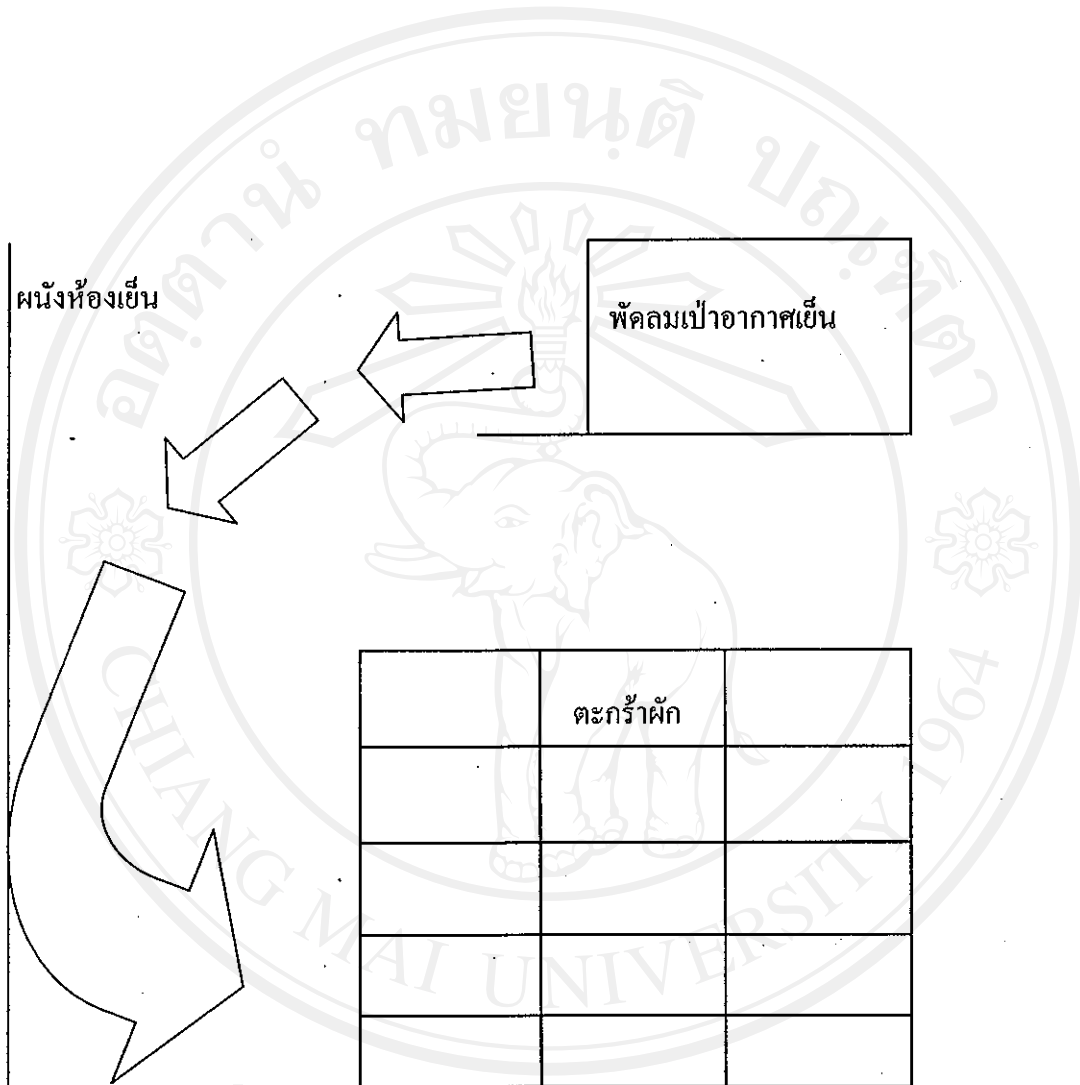
$T_2$  = วิธีการลดอุณหภูมิโดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนพื้นที่เปิดต่อพื้นที่ปิดของตะกร้า (treatment 2)



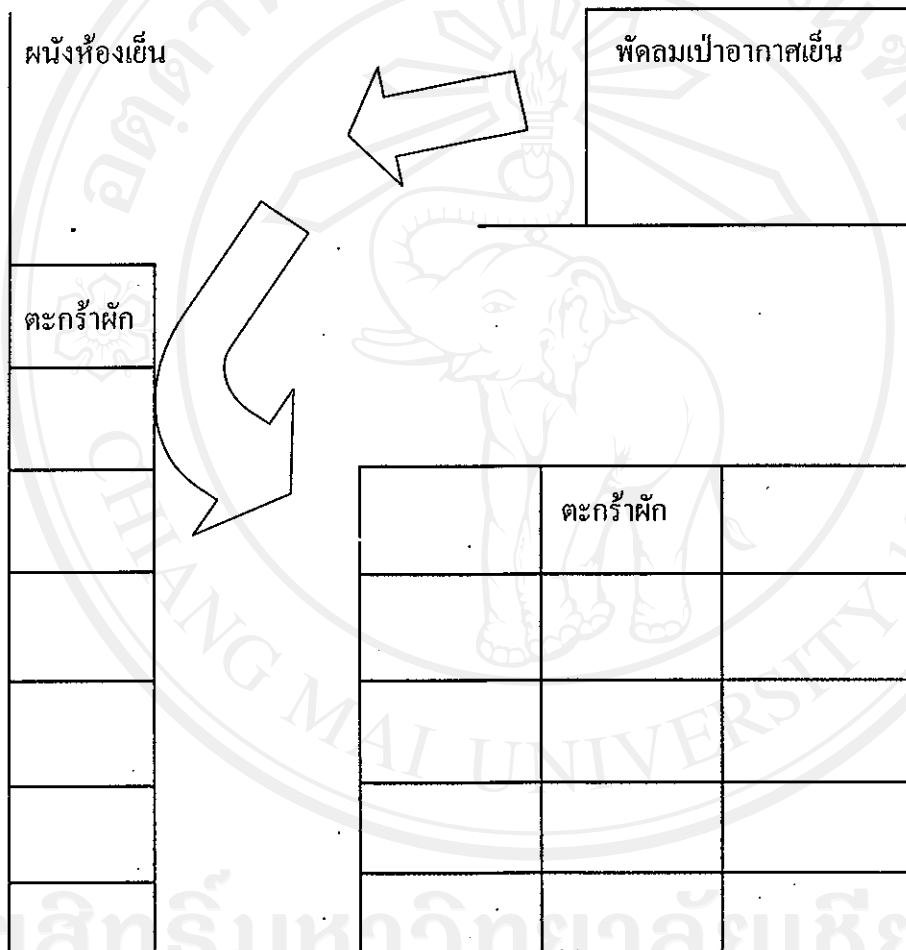
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกะหล่ำปลี ในการลดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบัน จากหัววัดที่ 3 ในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง dimentionless temperature จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการทดลองของฝักกะหล่ำปลี ในการลดอุณหภูมิโดยการลดขนาดความกว้างของผ้าใบ จากหัววัดที่ 1 ในการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 4.26 การไหลเวียนของอากาศภายในห้องเย็นในสภาวะปกติ

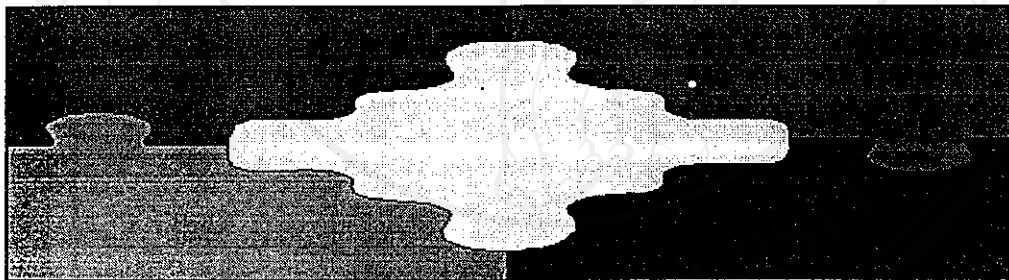


รูปที่ 4.27 การไหลของอากาศภายในห้องเย็นในสถานะที่มีตะกร้าไฟมากกว่าปกติ

อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เบื้องต้นสูง ผลิตภัณฑ์จะมีความร้อนสะสมมากทำให้ผักมีเมแทบอลิซึมสูงส่งผลให้ผักมีการคายน้ำออกมามากผักจึงมีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น นอกจากนั้นถ้าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเย็นมีค่าต่ำลงจะส่งผลให้ผักมีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น และถ้าอุณหภูมิภายในห้องเย็นมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้ผักมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นได้เช่นกัน

#### 4.5 การเขียนโปรแกรมเพื่อประยุกต์ใช้ในการคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิ

โปรแกรมคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิผักขั้นต้น ได้ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อใช้ในการคำนวณเวลาในการลดอุณหภูมิขั้นต้นของผักกาดขาวปลี ผักกาดทางหยง ผักกาดหอมห่อ และผักกะหล่ำปลี และได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำในการทำงานของโปรแกรม โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม Microsoft Excel โปรแกรมคำนวณเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิผัก ถูกออกแบบให้เป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่ายและสะดวกในการติดตั้งเนื่องจากทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์



## Forced-Air Tunnel Cooling 1.0

by teerapong janjam

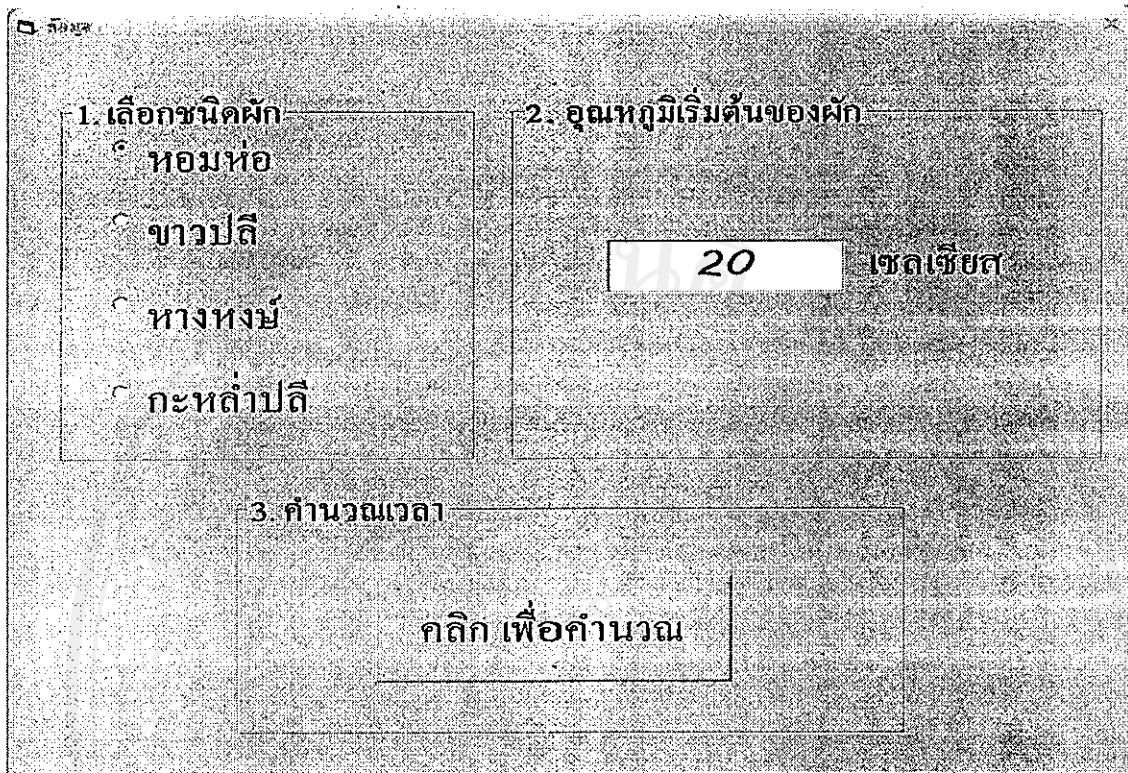
เริ่มต้นใช้โปรแกรม

วิธีใช้โปรแกรม

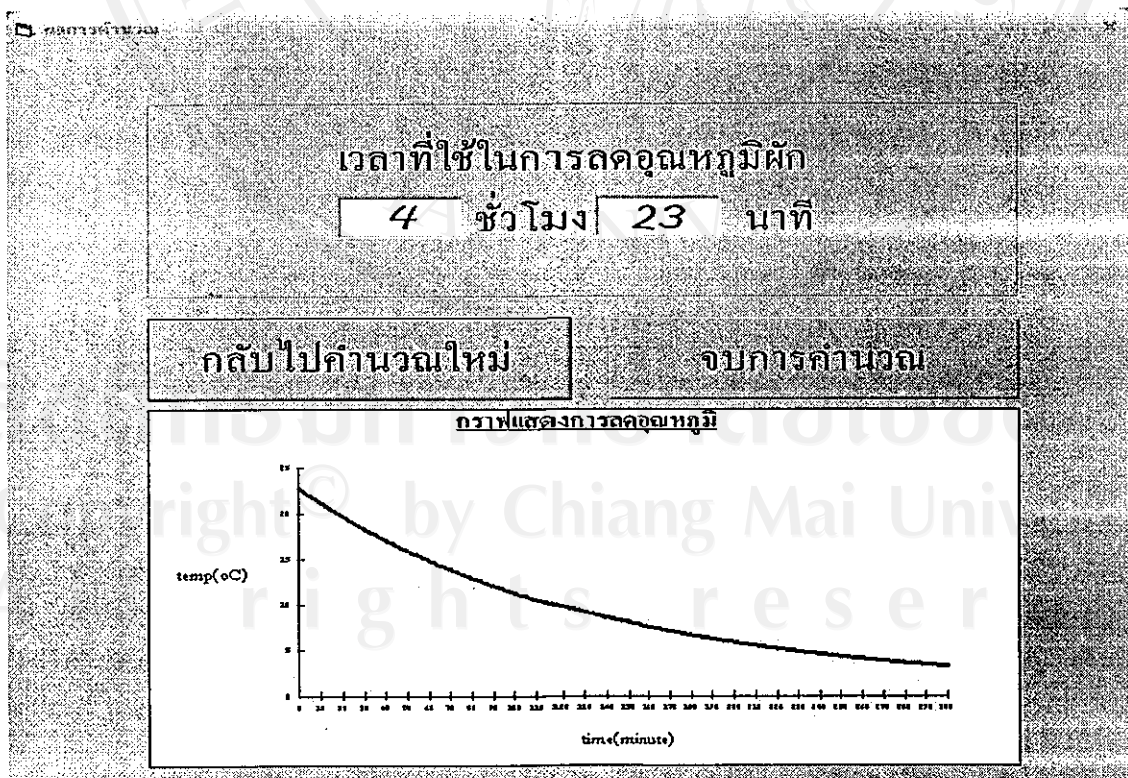
ขอขอบคุณ

รูปที่ 4.28 แสดงหน้าแรกของโปรแกรมสำเร็จรูป Forced-Air Tunnel Cooling 1.0





รูปที่ 4.29 แสดงหน้ากรอกข้อมูลของโปรแกรมสำเร็จรูป Forced-Air Tunnel Cooling 1.0



รูปที่ 4.30 แสดงหน้าผลลัพธ์ของโปรแกรมสำเร็จรูป Forced-Air Tunnel Cooling 1.0