กระบวนการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศของผักกาดหวาน *(Lactuca sativa* var. *longefolla)*

Vacuum cooling process of Cos Lettuce *(Lactuca sativa* var. *longefolla)*

ฐิติพงศ์ ปัญญาคำ[1,3], ดนัย บุณยเกียรติ[1,3*] และ พิชญา บุญประสม พูลลาภ[2,3]

Thitipong Panyakham[1,3], Danai Boonyakiat[1,3*] and Pichaya Boonprasoom Poonlarp[2,3]

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิผักกาดหวานในระบบสุญญากาศที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 19-21 °ซ ให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 4±1 °ซ ซึ่งทำการทดลองในห้องสุญญากาศรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีปริมาตร เท่ากับ 14.98 ลบ.ม. ในการทดลองได้กำหนดความดันสุดท้ายในห้องลดอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 0.55, 0.60 และ 0.65 กิโลปาสคาล โดยมีระยะเวลาที่ผักกาดหวานอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด 3 ระดับคือ 20, 25 และ 30 นาที จากการทดลอง พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิผักกาดหวานที่มีอุณหภูมิใจกลางผักเริ่มต้นในช่วง 20±1 °ซ ให้มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 4±1 °ซ คือ กำหนดความดันสุดท้ายภายในห้องลดอุณหภูมิ (final pressure) เท่ากับ 0.60 กิโลปาสคาล และระยะเวลาที่ผักกาดหวานอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด (holding time) เท่ากับ 25 นาที โดยใช้เวลาในการลดอุณหภูมิทั้งสิ้นเท่ากับ 39 นาที และใช้พลังงานเท่ากับ 4.17 กิโลวัตต์/ชั่วโมงในการลดอุณหภูมิผักกาดหวานทั้งหมด 200 กก. คิดเป็นค่าไฟฟ้า 0.067 บาท/กก.ของน้ำหนักสด โดยผักกาดหวานมีการสูญเสียน้ำหนัก 2.58% ในระหว่างการลดอุณหภูมิโดยใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นผลของความดันสุดท้ายที่กำหนดต่อเวลาในการลดอุณหภูมิ การสูญเสียน้ำหนัก และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผักกาดหวานได้ถูกบันทึก การสูญเสียน้ำหนักของผักกาดหวานเป็นผลโดยตรงจากการระเหยของน้ำจากผักกาดหวานในระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าการสูญเสียน้ำหนักสดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความดันสุดท้ายที่กำหนดและระยะเวลาที่ผักอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด ถ้าระยะเวลาที่ผักอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดคงที่ การกำหนดความดันสุดท้ายต่ำลงจะทำให้การสูญเสียน้ำหนักสดของผักกาดหวานเพิ่มขึ้น และเมื่อกำหนดระยะเวลาที่ผักอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเพิ่มขึ้นโดยรักษาความดันให้คงที่การสูญเสียน้ำหนักสดของผักกาดหวานจะเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การลดอุณหภูมิโดยใช้ระบบสุญญากาศ, ผักกาดหวาน, อุณหภูมิ

ABSTRACT: The research was aimed at studying the optimum vacuum cooling process of cos lettuce precooled from initial core temperature of 19-21 °C to the final core temperature of 4±1 °C. The experiment was carried out in a rectangular vacuum chamber having a volume of 14.98 m^3. In the experiment, the final pressures for vacuum-cooled cos lettuce were set at three different levels namely, 5.5, 6.0 and 6.5 millibar. The pressures were again experimented with three levels of holding time; 20, 25 and 30 minutes. The study results illustrated that the optimum operating process parameters for precooling cos lettuce to 4±1°C with initial core temperature of 19-21°C

[1] ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Department of Plant Science And Natural Resources, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University

[2] สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
School of Agro-Industry, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University 3 สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว/ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 3 Postharvest Technology Research Institute/ Postharvest Technology Innovation Center, Chiang Mai University

* Corresponding author: danai.b@cmu.ac.th

were at the final pressure of 0.60 kPa and the holding time of 25 minutes. The total cooling time was 39 minutes and the energy consumption was 4.17 kwh per 200 kilograms of cos lettuce. The electricity cost was 0.067 baht per kilogram of fresh weight. The weight loss during precooled cos lettuce with the previous optimum parameters was 2.58%. The effect of final pressure on cooling time, weight loss percentage and temperature variation of cos lettuce were also investigated. Weight loss occurs during vacuum cooling since the chamber cooling effect directly comes from water evaporation from the produce. Weight loss percentage was closely related to the holding pressure and holding time. For the same holding time, the lower pressure was used, the higher weight loss was experienced. For the same pressure, the longer holding time was used, the higher weight loss was found.
Keywords: Vacuum cooling, Cos Lettuce, Temperature

บทนำ

ผักกาดหวานเป็นชื่อที่ยอมรับโดยทั่วไปและโครงการหลวงใช้ชื่อนี้ทางการค้า ซึ่งเป็นผักที่นิยมบริโภคในรูปผักสดเพื่อประกอบอาหารหลายชนิด มีคุณค่าทางโภชนาการทั้งวิตามินและเกลือแร่ เป็นผักที่นำส่วนของใบมาบริโภคและมีการสูญเสียคุณภาพทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากหลังการเก็บเกี่ยวผักกาดหวานยังคงมีชีวิตอยู่ กระบวนการทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมียังดำเนินต่อไป ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผักกาดหวานต่อเนื่องไปถึงคุณค่าทางอาหารลดลง การลดอุณหภูมิทันทีหลังการเก็บเกี่ยวจะช่วยรักษาคุณภาพได้ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เกิดช้าลง เช่น การหายใจ การคายน้ำ และการทำงานจากจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งเป็นการลดการสูญเสียและยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น (ดนัยและนิธิยา, 2548) อุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่อคุณภาพผลิตผลหลายประการ เช่น ทำให้อัตราการหายใจสูง การแก่ การสุก และการเสื่อมสลายเร็วขึ้น นอกจากนั้นยังทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ เจริญได้อย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการลดอุณหภูมิของผักกาดหวานทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (Brosnan and Sun, 2001) ในอุตสาหกรรมทางการเกษตรได้มีการพัฒนาเทคนิคที่ช่วยลดอุณหภูมิของผลิตผลทางการเกษตรหลายวิธี เทคนิคการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศเป็นเทคนิคหนึ่งที่ช่วยในการระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็วอีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงาน (Cheng, 2006)

การลดอุณหภูมิในระบบสุญญากาศ เป็นกระบวนการลดอุณหภูมิภายใต้สภาพที่มีความดันต่ำโดยดูดอากาศออกจากห้องลดอุณหภูมิ เมื่อความดันบรรยากาศลดต่ำลงแล้วน้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งการเปลี่ยนสถานะนี้จะอาศัยพลังงานความร้อนที่อยู่ภายในผลิตผลนั้นส่งผลให้ผลิตผลมีอุณหภูมิลดต่ำลง ผลิตผลที่มีพื้นที่ผิวมากจำพวกผักบริโภคใบจะสามารถคายความร้อนออกไปได้มากและอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วด้วยวิธีนี้ ซึ่งปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตผลในกระบวนการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศจะเร็วกว่าวิธีอื่นๆ ถึง 200 เท่า ส่งผลให้ผลิตผลมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ การลดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้ผลิตผลจะสูญเสียน้ำประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 6 °ซ (ดนัยและนิธิยา, 2535) การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศเป็นการระเหยความชื้นหรือน้ำอย่างรวดเร็วจากผิวหน้าและภายในเพื่อลดความร้อน เมื่อน้ำระเหยกลายเป็นไอจะต้องใช้พลังงานแฝง ซึ่งเป็นพลังงานที่โมเลกุลสะสมเพื่อนำไปใช้ในการต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และพลังงานแฝงนี้จะส่งผลกระทบโดยตรงกับสถานะของน้ำเมื่อน้ำได้รับพลังงานแฝง จะทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ (วงกต, 2545) หลักการทำ vacuum cooling แตกต่างจาก air cooling และ hydrocooling คือ น้ำที่อยู่ในผลิตผลจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดความร้อนเมื่อนำผลิตผลใส่ในภาชนะที่ปิดมิดชิด ไม่ให้อากาศเข้าออกจากนั้นดูดอากาศออกเพื่อลดความดันให้ต่ำลงจนถึงความดันประมาณ 4.58 มิลลิเมตรปรอท น้ำจะกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 0 °ซ ความร้อนที่ติดมากับผลิตผลจะทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำภายในเวลา 3-4 นาที ซึ่งจะใช้ความร้อนประมาณ 1,073 BTU ต่อปอนด์ของน้ำ ทำให้อุณหภูมิของผลิตผลลดลงเป็น 0 °ซ ได้อย่าง

รวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการลดความร้อนโดยการระเหยน้ำออกจากผิวของผลิตผล ปริมาตรของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตผลด้วยวิธีนี้จะมากเป็น 200 เท่าของการสูญเสียโดยวิธีอื่นๆ ผลิตผลจะเย็นลงอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ การลดความร้อนโดยวิธีนี้ผลิตผลจะสูญเสียน้ำประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ต่ออุณหภูมิที่ลดลงทุกๆ 6 °ซ (ดนัยและ นิธิยา, 2548) Wang and Sun (2001) ได้ศึกษาการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศของผักกาดหอมห่อที่มีน้ำหนัก 1 ตัน พบว่า ใช้พลังงาน 0.56 วัตต์ชั่วโมง ต่อการลดอุณหภูมิลง 1 °ซ เมื่อเปรียบเทียบกับการลดอุณหภูมิแบบจุ่มแช่ในน้ำเย็นซึ่งใช้พลังงาน 3.7 กิโลวัตต์/ชั่วโมง ต่อการลดอุณหภูมิลง 1 °ซ ดังนั้นในการนำเอาเทคโนโลยีการลดอุณหภูมิโดยนำระบบสุญญากาศมาใช้ในการลดอุณหภูมิของผักกาดหวานน่าจะช่วยลดอัตราความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและยืดอายุการเก็บรักษาผักกาดหวาน วีนิลและคณะ, 2551 ได้รายงานว่าการลดอุณหภูมิผักกาดฮ่องเต้ด้วยระบบสุญญากาศภายใต้สภาวะ 3 สภาวะ คือ (1) ระบบสุญญากาศบรรจุในตะกร้าพลาสติก (2) ระบบสุญญากาศร่วมกับน้ำบรรจุในตระกร้าพลาสติก (3) ระบบสุญญากาศบรรจุในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศที่เหมาะสมสำหรับผักกาดฮ่องเต้ คือ การลดอุณหภูมิโดยใช้สุญญากาศร่วมกับน้ำ โดยมีพารามิเตอร์ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นในช่วง 15-20 °ซ คือ การกำหนดความดันสุดท้ายในห้องลดอุณหภูมิ (final Pressure) เท่ากับ 6 mbar และเวลาที่ผักกาดฮ่องเต้อยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด (holding time) เท่ากับ 15 นาที และที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 21-25 °ซ กำหนดความดันสุดท้ายในห้องลดอุณหภูมิ (final Pressure) เท่ากับ 6 mbar และเวลาที่ผักกาดฮ่องเต้อยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด (holding time) 20 นาที และกฤษติยาและคณะ, 2551 ได้รายงานว่าการลดอุณหภูมิผักกาดหอมห่อด้วยระบบสุญญากาศภายใต้สภาวะ 3 สภาวะ คือ 1) ลดอุณหภูมิโดยบรรจุถุงพลาสติก 2) ลดอุณหภูมิโดยบรรจุตะกร้าพลาสติก และ 3) ลดอุณหภูมิร่วมกับการใช้น้ำโดยบรรจุผลิตผลในตะกร้าพลาสติก จากผลการศึกษาพบว่า สภาวะการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศที่เหมาะสมสำหรับผักกาดหอมห่อ คือ การลดอุณหภูมิโดยบรรจุผลิตผลในถุงพลาสติก โดยมีพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหอมห่อที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นในช่วง 15-20 องศาเซลเซียส คือ กำหนดความดันสุดท้ายในห้องสุญญากาศเท่ากับ 6.0 มิลลิบาร์ และเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเท่ากับ 12 นาที ส่วนพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหอมห่อในช่วง 21-25 °ซ คือ กำหนดความดันสุดท้ายในห้องสุญญากาศ เท่ากับ 6.0 มิลลิบาร์ และเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเท่ากับ 20 นาที งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหวานที่บรรจุถุงโพลีเอทิลีนเจาะรูและจัดเรียงในตะกร้าพลาสติก จากนั้นนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1 °ซ

วิธีการศึกษา

นำผักกาดหวานสายพันธุ์ Tibureus จากแปลงเกษตรกรในเขตพื้นที่ของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงขุนวาง อ.แม่วาง จ.เชียงใหม่ ขนส่งมายังศูนย์ผลิตผลโครงการหลวง ตัดแต่งและบรรจุในถุงโพลีเอทิลีนขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 30 ซม. เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ซม.จำนวน 18 รู แล้วบรรจุลงในในตะกร้าพลาสติกขนาดความกว้าง 36 ซม. ยาว 56 ซม. สูง 30 ซม. โดยบรรจุตะกร้าละประมาณ 7.5 กก. จากนั้นแบ่งตะกร้าผักกาดหวานออกเป็น 2 ส่วน คือ ผักกาดหวานส่วนที่จะผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศ และส่วนที่ไม่ผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิ(ชุดควบคุม) จากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดอุณหภูมิเริ่มต้นของผักกาดหวานทั้งตะกร้าก่อนการลดอุณหภูมิ เครื่องทำความเย็นที่ใช้ในการทดลองมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสำคัญคือ ห้องสุญญากาศ ปั๊มสุญญากาศ ระบบทำความเย็น และ แผงควบคุม ดังแสดงใน **Figure 1**. ซึ่งห้องสุญญากาศมีปริมาตรเท่ากับ 14.98 ลบ.ม. สำหรับปั๊มสุญญากาศสามารถ

ลดความดันจากความดันบรรยากาศจนถึงความดันสุญญากาศต่ำสุดที่ 4 มิลลิบาร์ ได้ทดลองศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการลดอุณหภูมิของผักกาดหวาน โดยผันแปรความดันสุดท้ายในห้องลดอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ คือ 0.55, 0.60 และ 0.65 กิโลปาสคาล และกำหนดเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันในแต่ละระดับเป็น 15, 20 และ 25 นาที เพื่อให้ผักกาดหวานมีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 4±1 °ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กำหนดให้เป็นอุณหภูมิในการเก็บรักษาและขนส่งของผักกาดหวาน ในระหว่างการลดอุณหภูมิ อุณหภูมิใจกลางผักจะถูกบันทึกโดยสายเทอร์โมคัปเปิล อุณหภูมิใจกลางผักจะถูกบันทึกทุกๆ นาที เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) รุ่น 175-H2 ยี่ห้อ Testo ประเทศเยอรมัน ถูกใช้ในการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องสุญญากาศทุกๆ 1 นาที ตลอดกระบวนการลดอุณหภูมิ กระบวนการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศของผักกาดหวานแสดงดัง **Figure 2**. หลังจากปิดประตูห้องสุญญากาศ อากาศจะถูกดูดออกจากห้องลดอุณหภูมิด้วยปั๊มสุญญากาศ เมื่อความดันบรรยากาศลดลงถึงความดันสุดท้ายที่กำหนด วาล์วระบายอากาศจะถูกเปิดเพื่อควบคุมความดันสุญญากาศในห้องสุญญากาศ ในช่วงเริ่มต้นของการทำความเย็นความดันในห้องสุญญากาศลดลงอย่างรวดเร็วจากความดันบรรยากาศ ถึง 0.88 กิโลปาสคาล หลังจากนั้นระบบเริ่มควบคุมความดันสุดท้ายของห้องสุญญากาศให้เป็นไปตามที่กำหนด สำหรับอัตราการลดลงของความดันในห้องสุญญากาศสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (1)

$$P = P_i e^{-jt} \quad (1)$$

เมื่อ P คือ ความดันในห้องสุญญากาศ (Pa)
P_i คือ ความดันเริ่มต้น (Pa)
$-j$ คือ ค่าตัวแปรของกระบวนการ
t คือ เวลา (min)

สำหรับการควบคุมอัตราการลดลงของความดันสุญญากาศ ซึ่งจะได้ตัวแปรของกระบวนการคือค่า Y ของสมการที่ (1) คำนวณได้จาก

$$j = -\frac{1}{t}\ln\left[\frac{P_f}{P_i}\right] \quad (2)$$

เมื่อ t คือ เวลา (s)
P_i คือ ความดันเริ่มต้น (Pa)
P_f คือ ความดันสุดท้าย (Pa)

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดันไออิ่มตัวและอุณหภูมิของผักกาดหวานหาได้โดย

$$p_{sat} = exp\left[23.1964 - \frac{381.44}{T+227.02}\right] \quad (3)$$

เมื่อ p_{sat} คือ ความดันไออิ่มตัว (Pa)
T คือ อุณหภูมิของผักกาดหวาน (°C)

สำหรับเวลาที่ใช้ในการลดความดันในห้องสุญญากาศก่อนที่น้ำจะเริ่มมีการเดือดหรือที่เรียกว่า “Flash Point” ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง Flash Point และความเร็วปั๊มของปั๊มสุญญากาศ หาได้โดย

$$t_{fp} = \frac{1}{\eta}\frac{v_{vc}}{S}\ln\frac{P_{atm}}{P_{fp}} \quad (4)$$

t_{fp} คือ เวลาที่เริ่มเกิด Flash Point (s)
η คือ ประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศ (%)
v_{vc} คือ ปริมาตรของห้องสุญญากาศ (m^3)
S คือ ความเร็วในการปั๊ม (m^3/s)
P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)
P_{fp} คือ ความดันที่เริ่มเกิด Flash Point (Pa)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องลดอุณหภูมิระบบสุญญากาศในกระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหวานที่บรรจุถุงโพลีเอทิลีนในตะกร้าพลาสติก โดยทดลองกำหนดความดันสุดท้ายภายในห้องลดอุณหภูมิ เท่ากับ 0.55, 0.60 และ 0.65 กิโลปาสคาล และกำหนดระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเท่ากับ 15, 20 และ 25 นาที พบว่าถ้าระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดคงที่ การกำหนดความดันสุดท้าย

ต่ำลงจะทำให้การสูญเสียน้ำหนักสดของผักกาดหวานเพิ่มขึ้น และเมื่อกำหนดระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเพิ่มขึ้นโดยรักษาความดันให้คงที่การสูญเสียน้ำหนักสดของผักกาดหวานจะเพิ่มขึ้น (Table1) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ P.Boonprasom and D.Boonyakiat (2010) และ Jirapa *et al*.,2009 ได้รายงานว่า เมื่อกำหนดความดันสุดท้ายต่ำลงส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของ Bloccoli และ Red Holy Basil เพิ่มขึ้น จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องลดอุณหภูมิระบบสุญญากาศในกระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหวานที่บรรจุถุงโพลีเอทิลีนในตะกร้าพลาสติก การกำหนดความดันสุดท้ายภายในห้องลดอุณหภูมิเท่ากับ 0.60 กิโลปาสคาล และกำหนดระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนดเท่ากับ 25 นาที เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศเพราะทำให้ผักกาดหวานมีอุณหภูมิใจกลางอยู่ใน ช่วง 4±1 °ซ. มีค่าการใช้พลังงานเท่ากับ 4.19 กิโลวัตต์/ชม. และมีการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างต่ำ เท่ากับ 2.58 % และใช้ระยะเวลาทั้งหมดในกระบวนการลดอุณหภูมิ (cooling time) เท่ากับ 39 นาที สำหรับการลดอุณหภูมิผักกาดหวานจำนวน 200 กก. คิดเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 0.067 บาท/กก.ของผักกาดหวาน โดยความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจากความดันบรรยากาศถึง 0.88 กิโลปาสคาล ใช้เวลา 11 นาที ในช่วงนี้อัตราการลดลงของความดันมีค่าเท่ากับ 87.18 กิโลปาสคาล/นาที หลังจากนั้นความดันจะเริ่มคงที่ซึ่งความดันสุดท้ายที่ควบคุมคือ 0.60 กิโลปาสคาล ในระหว่างการลดอุณหภูมิด้วยระบบสุญญากาศความดันภายในห้องสุญญากาศจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงความดันไออิ่มตัวของผักกาดหวาน น้ำในผักกาดหวานจะเริ่มเดือด ช่วงนี้ใช้เวลา 6 นาที ในการทดลองทำความเย็นด้วยระบบสุญญากาศจะลดความดันบรรยากาศถึงความดันสุดท้ายที่เริ่มทำการควบคุมคือ 0.60 กิโลปาสคาล ซึ่งความดันที่ลดลงตามเวลาสามารถเขียนในรูปของสมการที่ (1) และแสดงดังกราฟใน Figure3

$$P = 95.900\, e^{-0.5098\, t}$$

เมื่อ P คือ ความดันในห้องสุญญากาศ (kPa)

t คือ เวลา (นาที)

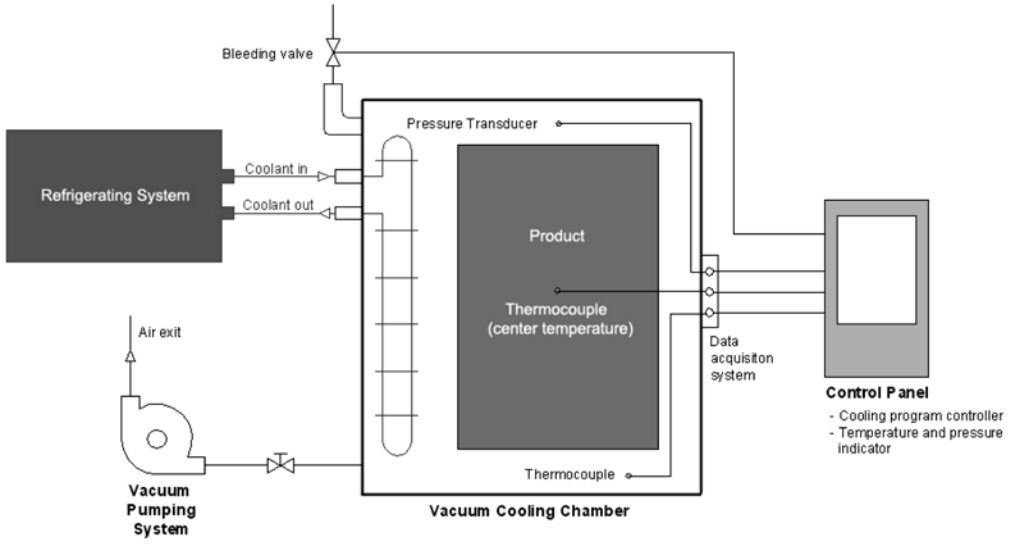


Figure 1. The schematic diagram of the research vacuum cooler (Pichaya and Danai, 2010)

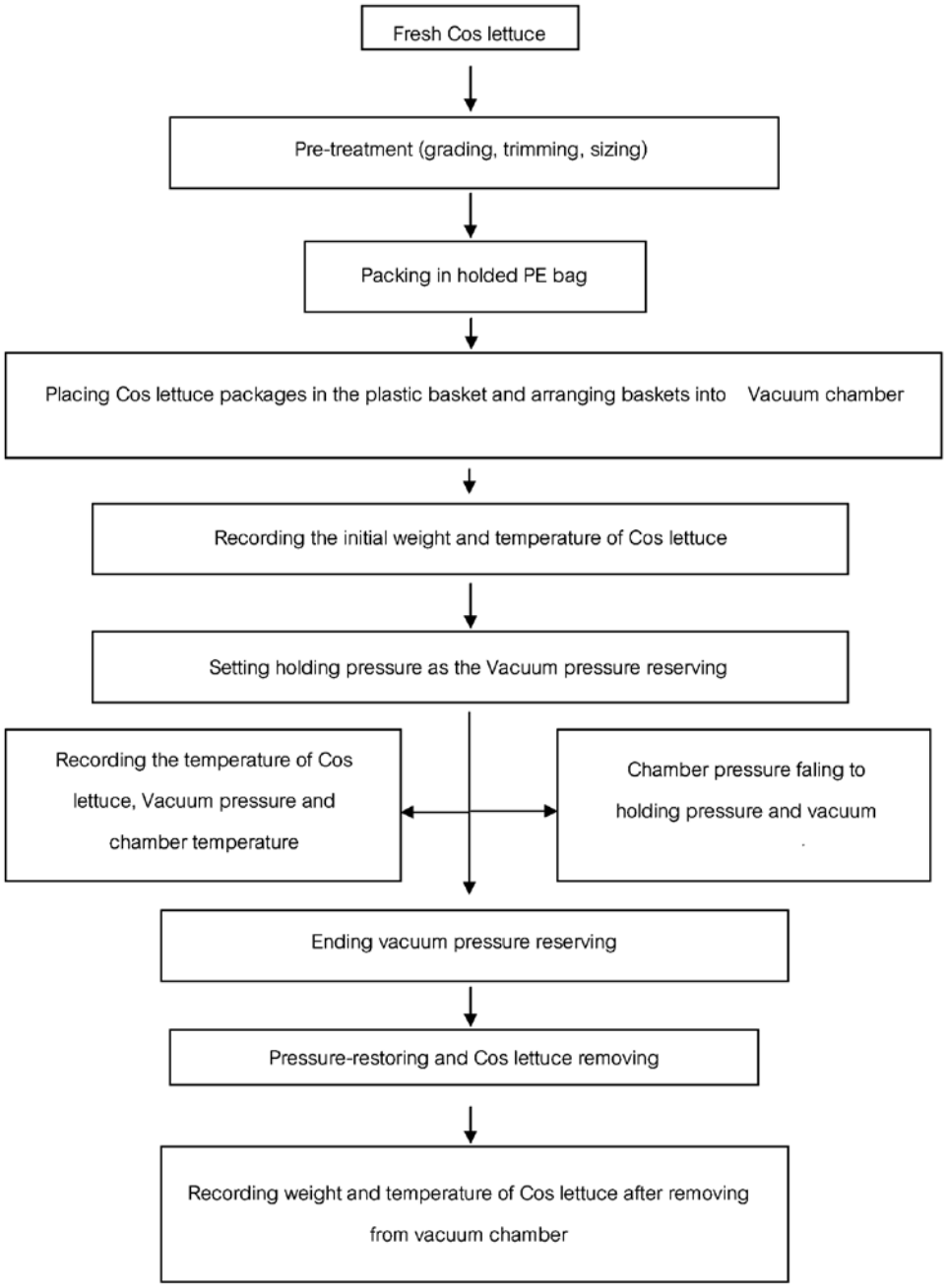


Figure 2. The flow chart of Cos lettuce under vacuum cooling process

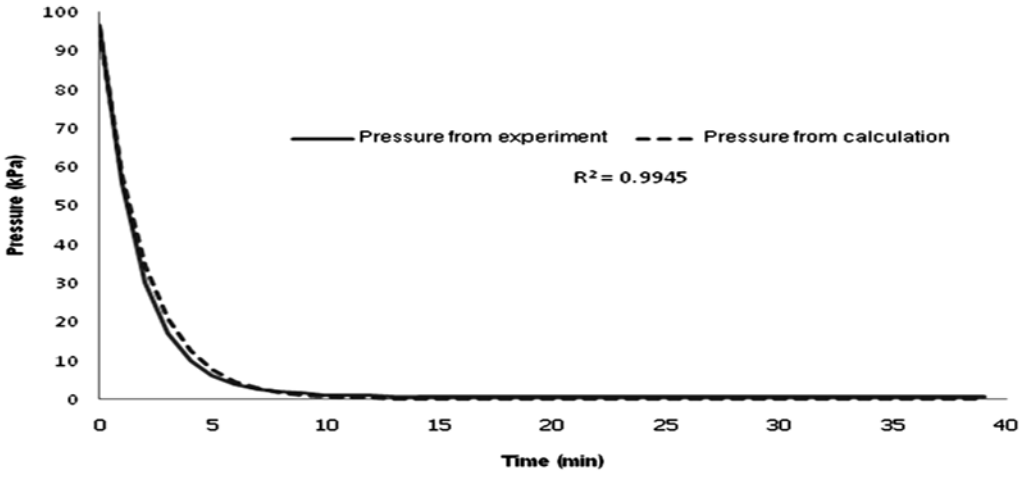


Figure 3 Chamber pressure of Cos lettuce during vacuum cooled process

จากกราฟ **(Figure 3)** จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของความดันในห้องสุญญากาศสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด มีค่าตัวแปรของกระบวนการเท่ากับ -0.5098 และมีค่า R^2 (coefficient of determination) เท่ากับ 99.45% ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิผลิตผล อุณหภูมิอากาศในห้องลดอุณหภูมิ กับเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิแสดงใน **Figure 4** จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความดันภายในห้องลดอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 0.06 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นความดันสุดท้ายที่กำหนด ภายในระยะเวลา 15 นาที ส่วนอุณหภูมิอากาศในห้องลดอุณหภูมิ จะลดลงอย่างช้าๆ สำหรับอุณหภูมิของผักกาดหวานค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งในนาทีที่ 7 เมื่อความดันภายในห้องลดอุณหภูมิลดลงจนถึง 2.48 กิโลปาสคาล อุณหภูมิผักกาดหวานจะลดลงอย่างรวดเร็วในจุดนี้เรียกว่า flash point ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการลดความดันในห้องสุญญากาศก่อนที่น้ำในผลิตผลจะเริ่มเดือดและระเหยกลายเป็นไอทำให้ผักกาดหวานมีอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจาก 19.5 °ซ เหลือ 18.1 °ซ และเมื่อความดันลดต่ำลงน้ำยังคงเดือดและระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิของผักกาดหวานลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเมื่อความดันสุดท้ายในห้องลดอุณหภูมิอยู่ที่ 0.60 กิโลปาสคาล เครื่องจะรักษาระดับความดันให้ค่อนข้างคงที่ เพื่อให้วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันตามระยะเวลาที่กำหนดเท่ากับ 25 นาที ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิของผักกาดหวานจะลดลงด้วยความชันค่อนข้างคงที่จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 4.9 °ซ ระหว่างการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศจะลดความดันในห้องจากความดันบรรยากาศที่เริ่มทำการควบคุม คือ 96.63 กิโลปาสคาล ความดัน อุณหภูมิในห้องสุญญากาศ และ อุณหภูมิใจกลางผักแสดงดัง **Figure 4**

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ **(Figure 4)** สามารถอธิบายได้ดังนี้ อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 20.4 °ซ และในระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องลดอุณหภูมิสุญญากาศออกเป็น 3 สภาวะ โดยสภาวะแรกอยู่ในช่วงนาทีที่ 1 ถึงนาทีที่ 5 อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากปั๊มสุญญากาศเริ่มทำงานหลังจากประตูห้องได้ถูกปิดลงทำให้ความดันภายในห้องลดลง จากนั้นในสภาวะที่ 2 อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 17.9 °ซ เหลือ 4.7 °ซ ในระหว่างนาทีที่ 5 ถึง 15 อุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเครื่องทำความเย็นชุดที่ 1 จะเริ่มทำงานเมื่อความดันลดลงถึง 20 กิโลปาสคาลในนาทีที่ 3 และเครื่องทำความเย็นชุดที่ 2 จะเริ่มทำงานเมื่อความดันลดลงถึง 10 กิโลปาสคาลในนาทีที่ 4 ในสภาวะที่ 2 นี้จะเป็นช่วงที่เวลาที่ใช้ในการลดความดันถึงจุด flash point ซึ่งเกิดขึ้นในนาทีที่ 7 เมื่อเวลาที่ใช้ในการลดความดันจนถึง

จุด flash point ไอน้ำจะระเหยจากผักกาดหวานออกสู่ห้องสุญญากาศเนื่องจากมีการเดือดของน้ำเกิดขึ้นในผักกาดหวานในสภาวะนี้อุณหภูมิผักกาดหวานจะลดลงอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิใจกลางผักกาดหวานดังแสดงในFigure 4 เห็นได้ว่าอุณหภูมิใจกลางผักกาดหวานลดลงอย่างรวดเร็วจาก 21.8 °ซ เหลืออุณหภูมิสุดท้ายเฉลี่ยประมาณ 4.9 °ซ สำหรับสภาวะที่ 3 ในนาทีที่ 15 ถึง 39 อัตราการลดลงของทั้งอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศและอุณหภูมิใจกลางผักกาดหวานเกิดช้าลง สังเกตได้ว่าอัตราการทำความเย็นในช่วงสภาวะแรกสูงเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนออกจากผักกาดหวานอย่างรวดเร็ว ซึ่งการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่เป็นแบบความร้อนแฝง สำหรับการถ่ายเทความร้อนนี้เกิดจากผลต่างความดันของความดันไออิ่มตัวของน้ำภายในผักกาดหวานและความดันภายในห้องสุญญากาศ ซึ่งผลต่างของความดันทั้งสองมีค่าสูงในช่วงแรกเมื่อมีการเดือดของน้ำและอัตราการระเหยเป็นไอออกจากผักกาดหวานจะเกิดขึ้นในอัตราสูง การลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิใจกลางผักกาดหวานส่งผลให้จุดเดือดของน้ำลดลงเช่นกัน ทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิในระหว่างการทำความเย็นช่วงท้ายน้อยกว่าช่วงแรก เนื่องจากผลต่างความดันไออิ่มตัวของน้ำในผักกาดหวานและความดันภายในห้องสุญญากาศลดลง แต่อุณหภูมิของผักกาดหวานยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อผ่านการลดอุณหภูมิแล้ว พบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักสดเฉลี่ย 2.58 % รวมเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิผักกาดหวาน 39 นาที (Table 2)

การลดอุณหภูมิผักกาดหวานด้วยระบบสุญญากาศได้ใช้พลังงานประมาณ 0.26 กิโลวัตต์/ชั่วโมงต่อการลดอุณหภูมิผักกาดหวาน 1 °ซ ใช้ต้นทุนค่าไฟฟ้าเท่ากับ 13.4 บาทต่อผักกาดหวาน 200 กก. หรือ 0.067 บาท/กก. ของผักกาดหวาน Wang and Sun. (2001) ได้ศึกษาการทำความเย็นแบบสุญญากาศของผักกาดหอมที่มีน้ำหนักจำนวน 1 ตัน พบว่าพลังงานที่ใช้ประมาณ 0.56 กิโลวัตต์/ชั่วโมง ต่อการลดอุณหภูมิลง 1 °ซ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำความเย็นแบบจุ่มแช่ในน้ำเย็นซึ่งใช้พลังงาน 3.7 กิโลวัตต์/ชั่วโมง ต่อการลดอุณหภูมิลง 1 °ซ ซึ่งใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิมากกว่าแบบสุญญากาศ ซึ่งจากการทดลองลดอุณหภูมิผักกาดหวาน พบว่า การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมต่อการลดอุณหภูมิของผักกาดหวาน เนื่องจากสามารถลดอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิสุดท้ายอย่างรวดเร็ว ใช้พลังงานน้อย และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสดต่ำระหว่างกระบวนการลดอุณหภูมิ นอกจากนั้นยังพบว่าผักกาดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิแล้วมีลักษณะปรากฏที่ดีคือมีความสดเหมือนกับผักกาดหวานก่อนการลดอุณหภูมิ

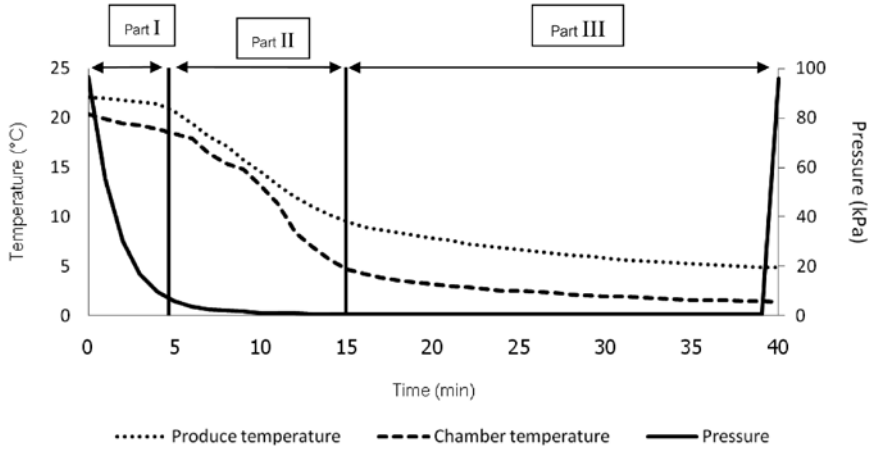


Figure 4 Temperature, pressure history in the vacuum chamber and cooling curve of Cos lettuce packed in perforated PE bags during vacuum cooling at 0.60 kPa with 25 minutes reserving time

Table 1 Final pressure, holding time, cooling time and weight loss percentage of Cos lettuce packed in PE bags during the vacuum cooling process

Final pressure (kPa)	Holding time (min)	Initial center temperature of Cos lettuce[1/] (°C)	Final center temperature of Cos lettuce[1/] (°C)	Cooling time (min)	Weight Loss[1/] (%)
0.55	15	20±1	3.5±0.5	31	2.60±0.09
	20	22±1	6.0±0.5	33	3.43±0.10
	25	19±1	2.0±0.5	42	3.53±0.05
0.60	15	20±1	6.0±0.5	29	2.31±0.10
	20	20±1	5.8±0.5	34	2.49±0.09
	25	20±1	4.5±0.5	39	2.58±0.04
0.65	15	20±1	7.5±0.5	26	1.80±0.05
	20	20±1	6.0±0.5	31	2.34±0.07
	25	21±1	6.0±0.5	36	2.50±0.09

[1/]mean of ± S.E.

Table 2 Optimum process parameters for Cos lettuce vacuum cooled in a perforated polyethylene bag and measuring indices of vacuum cooling processes

Process Parameter/ Measuring Indices	Cos lettuce Vacuum Cooled in Perforated PE bags
Final pressure (kPa)	0.60
Holding time (min)	25
Cycle time (min)	39
Initial center temperature of Cos lettuce (°C)	21.8
Final center temperature of Cos lettuce (°C)	4.9
Weight loss (%)	2.58
Energy consumption (kWh)	4.17
Electrical Expense (baht/kg)	0.067

สรุป

จากการศึกษากระบวนการลดอุณหภูมิโดยใช้ระบบสุญญากาศของผักกาดหวาน พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิโดยใช้ระบบสุญญากาศของผักกาดหวานที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นของผักกาดหวานอยู่ที่ 20±1 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 4±1 องศาเซลเซียส คือการกำหนดความดันภายในห้องลดอุณหภูมิ เท่ากับ 0.60 กิโลปาสคาล และระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายใต้ความดันที่กำหนด เท่ากับ 25 นาที ใช้ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิทั้งหมด (cycle time) เท่ากับ 39 นาที ความดันภายในห้องลดอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจากความดันบรรยากาศถึง 2.48 กิโลปาสคาลในนาทีที่ 7 จากนั้นจะมีการควบคุมความดันไว้ที่ 0.60 กิโลปาสคาล ซึ่งสามารถเขียนความดันที่ลดลงตามเวลาได้ตามสมการ $P = 95.900\, e^{-0.5098\, t}$ มี

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องลดอุณหภูมิสามารถแบ่งออกเป็น 3 สภาวะที่แตกต่างกันซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสภาวะ การระบายอากาศของวาล์วระบายจากการควบคุมความดันซึ่งอัตราการลดอุณหภูมิของผักกาดหวานของมีค่าต่ำในช่วง 6 นาทีแรก หลังจาก flash point แล้วอัตราการลดอุณหภูมิของผักกาดหวานของมีค่าสูงและจะลดลงหลังจากนาทีที่ 15 โดยระบบการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศที่ใช้สำหรับลดอุณหภูมิผักกาดหวานในงานวิจัยนี้ มีปริมาตรห้องสุญญากาศเท่ากับ 14.98 ลบ.ม. สำหรับใส่ผัก การลดอุณหภูมิผักกาดหวานด้วยระบบสุญญากาศได้ใช้พลังงานประมาณ 0.26 กิโลวัตต์/ชม. ต่อการลดอุณหภูมิผักกาดหวาน 1 °ซ. ใช้ต้นทุนค่าไฟฟ้าเท่ากับ 13.4 บาทต่อผักกาดหวาน 200 กก. หรือ 0.067 บาท/กก.ของผักกาดหวาน จากการทดลองลดอุณหภูมิผักกาดหวาน พบว่า การลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมต่อการลดอุณหภูมิของผักกาดหวาน เนื่องจากสามารถลดอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิสุดท้ายอย่างรวดเร็ว ใช้พลังงานน้อย และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสดระหว่างการลดอุณหภูมิต่ำ และผักกาดหวานที่ผ่านการลดอุณหภูมิแล้วยังมีลักษณะปรากฏที่ดีคือมีความสดเหมือนกับผักกาดหวานก่อนการลดอุณหภูมิ

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่งานคัดบรรจุ เชียงใหม่ มูลนิธิโครงการหลวง ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว/ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทุนบางส่วนในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กฤษติยา อุตรอินทร์. ดนัย บุณยเกียรติ และพิชญา บุญประสม. 2551. กระบวนการลดอุณหภูมิผักกาดหอมห่อโดยใช้ระบบสุญญากาศวิทยาศาสตร์เกษตร. 39(3) พิเศษ: 536-539.

จริงแท้ ศิริพานิช. 2538. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

ดนัย บุณยเกียรติ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2535. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ดนัย บุณยเกียรติ. 2540. สรีรวิทยาของพืช. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ดนัย บุณยเกียรติ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2548. การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

พัลลพ ศรัณยโชติ, นริส ประทินทอง และ ธนิต สวัสดิ์เสวี. 2550. กระบวนการทำความเย็นแบบสุญญากาศ ของผักกาดหอม, Vacuum Cooling Process of Lettuce. 6 น. ใน:ประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 23-25 พฤษภาคม 2550. โรงแรมใบหยกสกาย, กรุงเทพฯ.

พวงเพชร เหมรัตน์ตระกูล. 2552. ผลของการลดอุณหภูมิแบบสุญญากาศต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของปวยเหล็ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต(เกษตรศาสตร) พืชสวน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

วงกต วงศ์อภัย. 2545. อุณหพลศาสตร์: ตอนต้น (Thermodynamics). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

วีนิล ชินนาพันธ์. ดนัย บุณยเกียรติ และพิชญา บุญประสม. 2551. กระบวนการที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิผักกาดฮ่องเต้โดยใช้ระบบสุญญากาศ. วิทยาศาสตร์เกษตร. 39(3) พิเศษ: 540-543.

Brosnan, T. and D.W. Sun. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products: a review. International Journal of Refrigeration 24: 154-170.

Cheng, H.P. 2006. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots. Applied Thermal Engineering 26:2168-2175.

Jirapa Bung-ila, Danai Boonyakiat and Pichaya Boonprasoom. 2009. Effect of vacuum cooling on physico-chemical properties of holy basil (*Ocimum sanctum* Linn.) Food Innovation Asia. 469-480. Bangkok

Lee, S. K. and A. Kader. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. Postharvest Biology and Technology.

P.Boonprasom and D.Boonyakiat. 2010. Effect of Vacuum Cooling and Different Storage Temperature on Physico-Chemical Properties of Broccoli. International Postharvest Symposium Acta Hort. 877: 933-939.

Turk, R. and E. Celik. 1993. The effect of vacuum precooling on the half cooling period And quality characteristics of ice berg lettuce. Acta Horticulturae. 368: 825-329.

Wang, L.J. and Sun, D.-W., 2001, “Rapid Cooling of Porous and Foods by Using Vacuum Cooling Technology,” Trends in Food Science and Technology, Vol. 12:174-181.