การพัฒนาหม้อฆ่าเชื้อขนาดเล็กสำหรับการผลิตหน่อไม้ปี๊บปรับกรด

สุมิตร เชื่อมชัยตระกูล [1] ทิพาพร อยู่วิทยา [2] และ สุวิทย์ เตีย [3]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาหม้อต้มฆ่าเชื้อขนาดเล็กสำหรับผู้ผลิตระดับวิสาหกิจชุมชน เพื่อใช้ผลิตหน่อไม้ปรับกรดบรรจุปี๊บขนาด 24x24x34 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่สามารถรองรับการผลิตได้ 500 ปี๊บต่อวัน และกำหนดขั้นตอนของกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความปลอดภัยและถูกต้องตามหลักเกณฑ์วิธีการผลิตที่ดี (Good Manufacturing Practice, GMP) ควบคู่กับการให้ความสำคัญด้านสิ่งแวดล้อม การปฏิบัติการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบเบื้องต้นด้านการถ่ายเทความร้อนและอัตราการให้ความร้อนจากหัวเตาแก๊ส เพื่อใช้เป็นข้อมูลการออกแบบสร้างเครื่อง ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาการกระจายความร้อนในหม้อต้มฆ่าเชื้อที่สร้างขึ้น รวมทั้งศึกษาหาจุดร้อนช้าที่สุดและการแทรกผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เพื่อกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อ ผลการทดสอบเบื้องต้นสำหรับปี๊บเดี่ยวเมื่อใช้เตาแก๊สหนึ่งหัว พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้น้ำต่อพื้นที่ก้นภาชนะเท่ากับ 15.89 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยมีอัตราการให้ความร้อนจากหัวเตาแก๊ส 16.43 กิโลวัตต์ นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบและสร้างหม้อต้มฆ่าเชื้อทำจากเหล็กไร้สนิมเกรด 304 ที่มีขนาด 120x380x50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถบรรจุได้ 56 ปี๊บ และใช้เตาหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน (Burner) จำนวน 6 หัว โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางให้ความร้อน และแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, L.P.G) เป็นแหล่งเชื้อเพลิง จากผลการทดสอบพบว่าหม้อต้มมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ ส่วนของการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์พบว่าจุดร้อนช้าสุดของหน่อไม้ปี๊บอยู่ที่ตำแหน่งความสูงร้อยละ 15 จากด้านล่างของปี๊บตามแนวกึ่งกลางในแนวตั้ง จึงสามารถกำหนดขั้นตอนของกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสำหรับผลิตภัณฑ์หน่อไม้ปี๊บปรับกรดน้ำหนักเนื้อ 14 กิโลกรัม ที่มี น้ำหนักสุทธิ 20 กิโลกรัม ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและเวลาในการต้มฆ่าเชื้อ 20 นาที ที่อุณหภูมิ 97 ˚C ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่จุดร้อนช้าสุดได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ˚C เป็นเวลาอย่างต่ำ 5 นาที

คำสำคัญ : หน่อไม้ปี๊บปรับกรด / การกระจายความร้อน / หม้อต้มฆ่าเชื้อ / การแทรกผ่านของความร้อน / กระบวนการให้ความร้อน

---

[1] *นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[2] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์*

[3] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Development of Small Scale Pasteurizer for Production of Acidified Bamboo Shoot in Rectangular Package

Sumit Chaumchaitrakun [1], Tipaporn Yoovidhya [2], and Suvit Tia [3]
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This work aimed at developing a small scale pasteurizer, suitable for community industry, for acidified bamboo shoot, which is packed in a rectangular container with the dimensions of 24x24x34 cm^3, at a capacity of 500 units per day as well as at establishing the thermal process for the product. In this work, food safety, Good Manufacturing Practice (GMP) and environmental friendliness of the process were considered. The work was divided into two parts. The first part concerned with the determination of heat flux and heat input from the burner; the data obtained were then used to design and construct the pasteurizer. In the second part, a temperature distribution test was carried out to investigate the slowest heating zone in the pasteurizing equipment. The cold point of the product was determined. Heat penetration study was also conducted and the thermal process was established. From the preliminary test of a single rectangular package, it was found that the heat flux from a single burner was around 15.89 kW/m^2 and the corresponding heat input was around 16.43 kW. The pasteurizer was then constructed using stainless steel 304 having dimensions of 120x380x50 cm^3 and using 6 units of burner. The pasteurizer was designed to hold 56 bulk packages; boiling water was used as the heating medium and liquefied petroleum gas (L.P.G) was used as the energy source. The temperature distribution test showed a uniform heat distribution within the pasteurizer and the cold point of the product was located at the height equivalent to 15 percent of the total container height, measured from the bottom of the container along the central line of the vertical axis. Finally, the thermal process of acidified bamboo shoot in rectangular package of 14 kg fill weight and 20 kg net weight was established as an initial product temperature was minimized at room temperature and the process time at 97 ^{o}C was 20 minutes to obtain the product temperature at cold point of 85 ^{o}C for at least 5 min.

Keywords : Acidified Bamboo Shoot / Heat Distribution / Heat Penetration / Pasteurizer / Thermal Process

---

[1] *Graduate Student, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Associate Professor, Department of Food Engineering, Faculty of Engineering.*

[3] *Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

จากวิกฤตการณ์หน่อไม้ปี๊บเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2549 ที่อำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน ซึ่งมีผู้ป่วยอาการหนักจากการบริโภคหน่อไม้ปี๊บมากกว่า 200 ราย มีสาเหตุจากการได้รับสารพิษที่แบคทีเรีย *Clostridium botulinum* ผลิตขึ้น เนื่องจากหน่อไม้ปี๊บที่บริโภคไม่ได้รับการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนอย่างเพียงพอที่จะทำลายสปอร์ของแบคทีเรียดังกล่าว ตามร่างประกาศกระทรวงสาธารณสุขที่จะประกาศใช้ในปี พ.ศ. 2551 นี้ เรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ฉบับที่ 4) เพื่อการคุ้มครองผู้บริโภคจากสารพิษดังกล่าว จึงกำหนดให้ผู้ผลิตอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำในภาชนะบรรจุปิดสนิท (มีค่า pH มากกว่า 4.6 และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้มากกว่า 0.85) และที่บรรจุอยู่ในสภาวะปราศจากอากาศ ต้องดำเนินการตามกระบวนการผลิตอาหารอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ (1) ฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสูง (มากกว่า 100 องศาเซลเซียส) ซึ่งปฏิบัติได้ยากในระดับครัวเรือนหรือในท้องถิ่น เพราะข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีและความรู้ที่จำเป็นต่อการแปรรูป (2) ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างสมดุลของอาหารไม่ให้เกิน 4.6 ซึ่งจะทำให้อาหารที่ปรับกรดแล้วสามารถฆ่าเชื้อได้โดยการต้มที่อุณหภูมิน้ำเดือด เพราะไม่จำเป็นต้องทำลายสปอร์ที่ทนความร้อนสูง ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมกระทำได้ง่ายในระดับครัวเรือน จึงเป็นแนวทางแก้ไขปัญหาเบื้องต้น นอกจากนี้สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ได้มีมาตรการทางกฎหมายในการกำกับดูแลหน่อไม้ปี๊บโดยการติดฉลาก “หน่อไม้ปรับกรด” ให้ผู้ผลิตที่ผลิตถูกต้องตามเกณฑ์ และรณรงค์ให้เลือกซื้อหน่อไม้ปี๊บที่ติดฉลาก หน่อไม้ปรับกรดเท่านั้น

จากข้อมูลของหน่วยตรวจสอบเคลื่อนที่ กองควบคุมอาหาร สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา พบว่ามีผู้ผลิตหน่อไม้ปี๊บมากกว่า 1,000 ราย จาก 38 จังหวัดทั่วประเทศ และมีผลผลิตมากกว่า 10 ล้านปี๊บต่อปี คิดเป็นมูลค่าถึง 2,000 ล้านบาทต่อปี ทั้งนี้ อย. ได้จำแนกผู้ประกอบการหน่อไม้ปี๊บออกเป็น 3 เกรด ตามกำลังการผลิต ได้แก่ (1) ผู้ประกอบการเกรด A กำลังการผลิตมากกว่า 10,000 ปี๊บต่อปี มีร้อยละ 5 (2) ผู้ประกอบการเกรด B กำลังการผลิต 1,000 - 10,000 ปี๊บต่อปี มีร้อยละ 25 และ (3) ผู้ประกอบการเกรด C กำลังการผลิตน้อยกว่า 1,000 ปี๊บต่อปี มีร้อยละ 70 จะเห็นว่าผู้ประกอบการเกรด C ที่มีกำลังการผลิตน้อยมีจำนวนมากและเป็นกลุ่มที่ต้องการความช่วยเหลือเนื่องจากข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีและความรู้ที่จำเป็นต่อการแปรรูป และขาดแคลนเครื่องมือที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมระดับครัวเรือนที่มีขนาดเล็ก ที่ใช้วัตถุดิบและแรงงานในท้องถิ่นเป็นหลัก และอาศัยการถ่ายทอดประสบการณ์การผลิตจากบรรพบุรุษ

ดังนั้น การยกระดับการผลิตหน่อไม้บรรจุปี๊บให้มีคุณภาพและถูกต้องตามหลักเกณฑ์วิธีการผลิตที่ดี (Good Manufacturing Practice, GMP) จึงจำเป็นต้องพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตและเครื่องมือที่ใช้โดยเฉพาะการพัฒนาหม้อต้มฆ่าเชื้อ เพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์หน่อไม้ปรับกรดบรรจุปี๊บที่ปลอดภัยมีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค Chumjai [1] จึงได้พัฒนาหม้อต้มฆ่าเชื้อขนาดเล็กสำหรับต้มหน่อไม้ปี๊บได้ครั้งละ 25 ปี๊บ โดยอาศัยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ในเตาเผาที่ชาวบ้านใช้อยู่ แต่ยังประสบปัญหาเรื่องเขม่าจากการเผาไหม้ที่อาจปนเปื้อนสู่ผลิตภัณฑ์ และเรื่องแหล่งเชื้อเพลิงไม้จากการตัดไม้ทำลายป่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาหม้อต้มฆ่าเชื้อขนาดเล็กสำหรับกระบวนการให้ความร้อนหน่อไม้ปรับกรดบรรจุปี๊บขนาด 24x24x34 ซม.^{3} ด้วยกำลังการผลิตที่ 500 ปี๊บต่อวัน และกำหนดขั้นตอนของกระบวนการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การคัดเลือกเชื้อเพลิงหุงต้ม

จากการสำรวจการผลิตหน่อไม้บรรจุปี๊บ ณ หมู่บ้านตะนาวศรี อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ซึ่งเป็นชุมชนที่มีการรวมกลุ่มของแม่บ้านเป็นแหล่งผลิตใหญ่ของจังหวัดราชบุรี พบว่ามีการใช้ฟืนเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนเช่นเดียวกับหมู่บ้านอื่นๆ เพราะหาซื้อได้ง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ คิดเป็นร้อยละ 2.48 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลต้นทุนการผลิตหน่อไม้บรรจุปี๊บ ปี พ.ศ. 2548 ณ หมู่บ้านตะนาวศรี จังหวัดราชบุรี

ราคา	ต้นทุน / ปี๊บ (บาท)	ร้อยละ
วัตถุดิบ	70.00	46.28
ภาชนะบรรจุ	70.00	46.28
ค่าพลังงาน	3.75	2.48
ค่าดำเนินการ	7.50	4.96

การผลิตในหมู่บ้านซึ่งตั้งอยู่ในสภาพภูมิประเทศป่า ได้ใช้ไม้จากป่าเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการหุงต้ม ทำให้เกิดข้อขัดแย้งการตัดไม้ทำลายป่ากับหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการอนุรักษ์ป่าไม้ในท้องถิ่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาคัดเลือกเชื้อเพลิงอื่นที่มีความเหมาะสมต่อสภาพการผลิตที่เป็นอยู่ โดยพิจารณาความสำคัญด้านความปลอดภัยต่อการผลิตอาหาร ความเหมาะสมกับการใช้งานและต้นทุนการผลิต เป็นต้น พบว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสม เพราะว่ามีค่าพลังงานความร้อนที่สูง (49.29 MJ/กก.) มีประสิทธิภาพสูงในการเผาไหม้ และมีความเหมาะสมกับสภาพการผลิตในระดับครัวเรือน

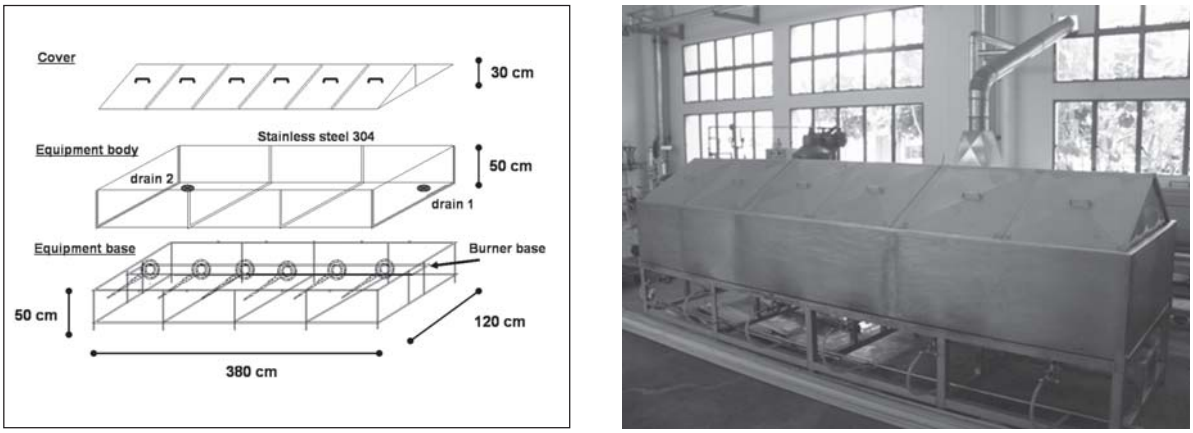
2.2 การทดสอบเบื้องต้นด้านประสิทธิภาพของหัวเตาแก๊ส

ในการออกแบบหม้อต้มฆ่าเชื้อได้เลือกใช้หัวเตาแก๊สที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปเป็นแบบ Radial flame burner รุ่น KB-10 เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน แต่เนื่องจากผู้ผลิตไม่มีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอัตราการให้ความร้อนของหัวเตาแก๊ส ดังนั้นจึงได้ศึกษาเพื่อหาอัตราการให้ความร้อนจากหัวเตาแก๊สนี้ ด้วยการทดสอบต้มน้ำให้เดือดด้วยหัวเตาแก๊สจำนวนหนึ่งหัว [2] ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้น้ำต่อพื้นที่ก้นภาชนะเท่ากับ 15.89 กิโลวัตต์/ม^2 และอัตราการให้ความร้อนจากหัวเตาแก๊สคือ 16.43 กิโลวัตต์ จึงได้นำข้อมูลนี้มาออกแบบและสร้างหม้อต้มฆ่าเชื้อต่อไป

2.3 การออกแบบและสร้างหม้อต้มฆ่าเชื้อ

หม้อต้มฆ่าเชื้อถูกออกแบบเพื่อรองรับกำลังการผลิตที่ 500 ปี๊บต่อวัน โดยคำนึงถึงมาตรฐานการออกแบบเครื่องจักรสำหรับผลิตอาหาร ได้แก่ การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การออกแบบเครื่องที่ง่ายต่อการทำความสะอาดและความสะดวกในการใช้งานของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงพิจารณาต้นทุนการสร้างเครื่อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เหล็กไร้สนิมเกรด 304 ที่มีคุณสมบัติในการทนต่อการกัดกร่อนของกรด และพื้นที่สัมผัสเรียบสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและไม่เป็นที่สะสมของเชื้อจุลินทรีย์หรือสิ่งสกปรก [3]

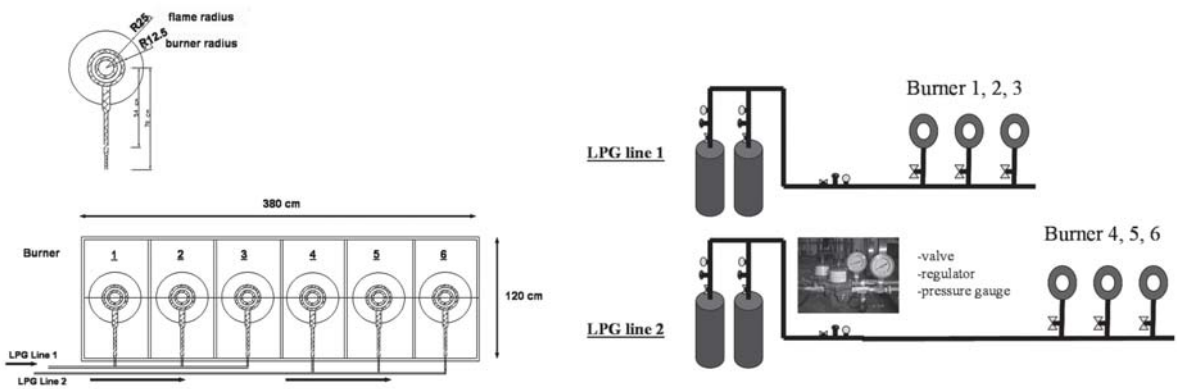
หม้อต้มฆ่าเชื้อที่ออกแบบ มีขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 120x380x50 ซม.^{3} บรรจุปี๊บขนาด 24x24x34 ซม.^{3} ได้จำนวนสูงสุด 56 ปี๊บ โดยใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางให้ความร้อน อุปกรณ์ในการให้ความร้อนใช้เตาหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน (burner) รุ่น KB-10 จำนวน 6 หัว เพื่อต้มน้ำร้อน โดยมีแก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องพร้อมอุปกรณ์รวมทั้งสิ้นประมาณ 140,000 บาทต่อเครื่อง



รูปที่ 1 โครงสร้างที่ออกแบบและภาพของหม้อต้มฆ่าเชื้อ

ตำแหน่งของหัวเตาแก๊สจัดวางตามแนวกึ่งกลางของตัวเครื่อง โดยติดตั้งหัวเตาแก๊สเป็น 2 ชุดๆ ละ 3 หัว เชื่อมต่อกับถังแก๊สจำนวน 4 ถัง เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันแก๊สให้มีความสม่ำเสมอทุกหัว ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังคาออกแบบเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมมีบานหลังคาจำนวนด้านละ 6 บาน สามารถเปิดใช้เฉพาะจุดได้ทำให้สะดวกสำหรับผู้ปฏิบัติงาน

เพื่อการกระจายความร้อนที่ดีขึ้นจึงได้ออกแบบชั้นวางปี๊บซึ่งสามารถวางได้ชั้นละ 8 ปี๊บ (จัดเรียงแบบ 2x4) ดังรูปที่ 3 เพื่อควบคุมระยะห่างในการวางปี๊บผลิตภัณฑ์ให้สม่ำเสมอและง่ายต่อการทำงาน



(ก) (ข)

รูปที่ 2 ผังการติดตั้งหัวเตาแก๊สและท่อแก๊ส

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 ชั้นวางเพื่อควบคุมระยะห่างของปี๊บผลิตภัณฑ์ในหม้อต้มฆ่าเชื้อ

2.4 วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

2.4.1 วัตถุดิบและการเตรียม

ผลิตภัณฑ์หน่อไม้บรรจุปี๊บที่ผลิต ณ หมู่บ้านตะนาวศรี ใช้หน่อไม้ไผ่รวก (Thyrsostachys siamensis Gamble) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งทำการต้มเพื่อให้ง่ายต่อการปอกเปลือก หลังปอกเปลือก น้ำหนักหน่อไม้จะเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำหนักหน่อไม้สดก่อนการปอกเปลือก บรรจุหน่อไม้ที่คัดขนาดแล้ว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 ซม. ยาว 23 ซม.) 14 กก. ในปี๊บขนาด 24x24x34 ซม. เติมสารละลายกรดซิตริก 0.65% ปริมาณ 6 กก. นำปี๊บไปต้มฆ่าเชื้อในน้ำเดือด ปิดฝาและทำให้เย็น

2.4.2 วิธีการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เป็นการศึกษาการกระจายความร้อนภายในหม้อต้มฆ่าเชื้อ เพื่อหาตำแหน่งที่ร้อนช้าที่สุดในหม้อต้มฆ่าเชื้อ ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์ด้วยความร้อนต่อไป การทดลองได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฆ่าเชื้อของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ให้แก่หม้อต้มโดยแสดงค่าเป็นอัตราการไหลของแก๊สที่ระดับ 0.14 และ 0.18 กก./นาที และจำนวนของปี๊บทดสอบที่ 48 และ 56 ปี๊บ ในการทดลองได้ควบคุมระดับความสูงของน้ำที่ท่วมปี๊บไว้ที่ประมาณ 29 ซม. และจัดวางปี๊บทดสอบในชั้นวางเพื่อควบคุมระยะห่างระหว่างปี๊บให้สม่ำเสมอ โดยได้ออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แผนการทดลอง

อัตราการไหลของแก๊ส LPG (กก./นาที)	จำนวนปี๊บทดสอบ	
	56 ปี๊บ	48 ปี๊บ
0.18	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
0.14	การทดลองที่ 3	การทดลองที่ 4

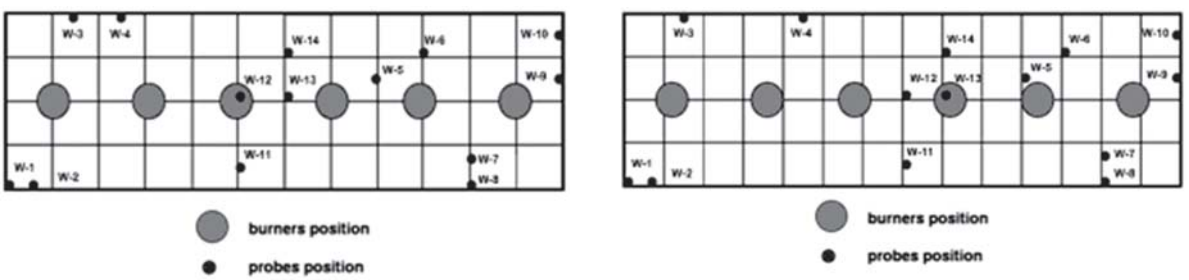
(ก) การศึกษาการกระจายความร้อนในหม้อต้มฆ่าเชื้อ

ใส่น้ำที่เป็นตัวกลางให้ความร้อน (Heating medium) ลงในหม้อต้มฆ่าเชื้อให้ระดับความสูงของน้ำอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 14 และ 17 ซม. สำหรับการทดลองที่ใช้จำนวนปี๊บทดสอบ 56 และ 48 ปี๊บ ตามลำดับ (เมื่อใส่ปี๊บลงในหม้อต้มครบตามจำนวน ระดับน้ำจะสูง 29 ซม.) จากนั้นทำการติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์กับชั้นวางปี๊บตามจุดต่างๆ ที่กำหนดไว้ (รูปที่ 4) โดยให้ปลายหัววัดสูงจากระดับพื้นหม้อต้มประมาณ 12 ซม. และทำการเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึก (Data Taker, model 605) เพื่อทำการบันทึกอุณหภูมิ การทดลองนี้ได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ช่วงแรกน้ำในหม้อต้มได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนน้ำเริ่มเดือด ช่วงที่สองใส่ปี๊บทดสอบ (dummy package) ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลง ช่วงที่สามน้ำได้รับความร้อนจนเดือดอีกครั้ง และช่วงสุดท้ายควบคุมอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มที่จุดเดือด

(ข) การศึกษาการแทรกผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

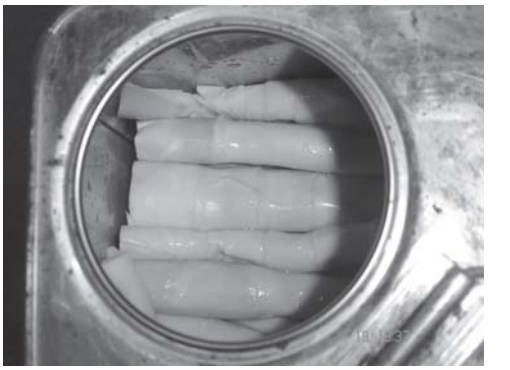
การศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ (1) หาจุดที่ร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์ โดยทำการวัดอุณหภูมิของหน่อไม้ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในปี๊บขณะให้ความร้อน โดยเจาะด้านข้างของปี๊บที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงจุดที่วัดในแนวแกนตั้งของปี๊บ 4 จุด คือ A (หนึ่งนิ้วจากด้านบนปี๊บลงมา) B (จุดกึ่งกลาง) C (1/3 จากฐานปี๊บขึ้นมา) และ D (15% ของความสูงจากฐานปี๊บขึ้นมา) เรียงหน่อไม้ลงปี๊บจนใกล้ถึงจุดที่เจาะไว้จึงทำการติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ แล้วเสียบหน่อไม้ด้านโคนเข้ากับหัววัดตามแนวแกนตามความยาวจนถึงจุดกึ่งกลาง บรรจุหน่อไม้ที่เหลือลงปี๊บจนครบ 14 กก. เนื่องจากตำแหน่งทั้ง 4 (A, B, C และ D) อยู่ใกล้กันทำให้ไม่สามารถติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ได้พร้อมกันในครั้งเดียวทั้ง 4 จุด จึงต้องแบ่งทำปี๊บละ 2 จุด คือ ตำแหน่ง A กับ C และตำแหน่ง B กับ D จากนั้นจึงนำจุดที่ร้อนช้าสุดของทั้งสองการทดลองมาเปรียบเทียบกันอีกครั้ง จนได้จุดที่ร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์ (2) ทำการศึกษาการแทรกผ่านของความร้อนไปยังจุดที่ร้อนช้าที่สุดของผลิตภัณฑ์ ณ ตำแหน่งที่ร้อนช้าสุดของหม้อต้มฆ่าเชื้อ เพื่อกำหนดกระบวนการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ โดยได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 ครั้ง



(ก) การจัดเรียงปี๊บ; 4 x 12 (48 ปี๊บ) (ข) การจัดเรียงปี๊บ; 4 x 14 (56 ปี๊บ)

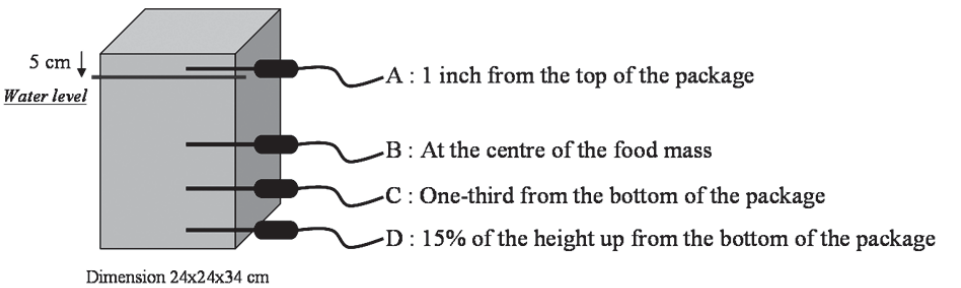
รูปที่ 4 ตำแหน่งการวางเทอร์โมคอปเปอร์ในหม้อต้มฆ่าเชื้อ

ลักษณะของหัววัด (∅ 3 มม. ยาว 120 มม.)



ลักษณะการจัดเรียงหน่อไม้ในปี๊บ

(ก) หัววัด และ การจัดเรียงหน่อไม้ในภาชนะบรรจุ



(ข) ตำแหน่งของหัววัด

รูปที่ 5 ตำแหน่งทดสอบการหาจุดร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์ตามแนวแกนตั้งของปี๊บ

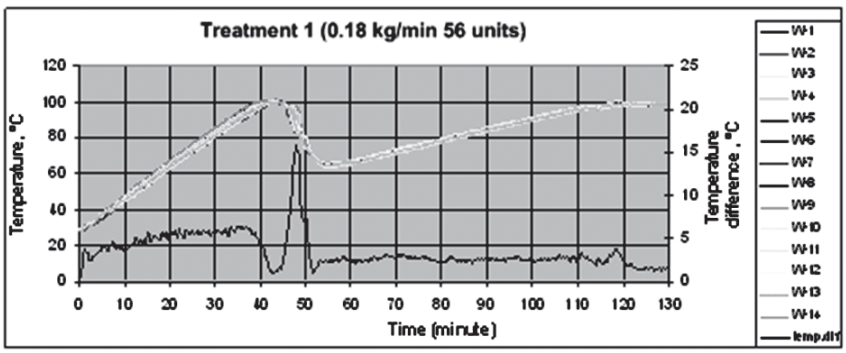
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การศึกษาการกระจายความร้อนในหม้อต้มฆ่าเชื้อ

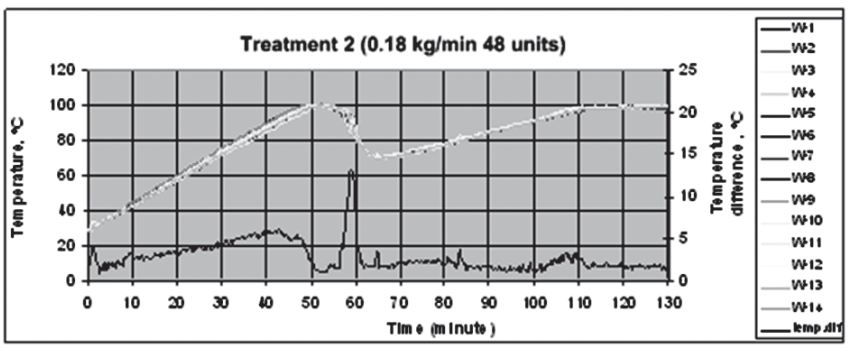
ช่วงแรกเมื่อหัวเตาแก๊สทำการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความร้อนจากเปลวไฟและแก๊สร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับตัวหม้อต้มทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นความร้อนจะถ่ายเทสู่น้ำด้วยการพาความร้อน รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในหม้อฆ่าเชื้อระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งในช่วงแรกอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น โดยที่ตำแหน่งต่างๆ มีอุณหภูมิต่างกันอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 ˚C (แสดงด้วยเส้นดำทึบ) เมื่อใส่ปี๊บตัวอย่างลงไป อุณหภูมิของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำเป็น 65 -70 ˚C เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำในหม้อต้มเข้าสู่ปี๊บตัวอย่าง หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำจะค่อยๆ สูงขึ้นจนกระทั่งน้ำเริ่มเดือดอีกครั้ง จึงรักษาระดับอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ไม่ให้เดือดรุนแรงซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานเพราะลดการสูญเสียจากการระเหยของไอน้ำ ด้วยการปรับวาวล์ลดอัตราการไหลของแก๊สลง ในช่วงนี้พบว่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 ˚C ในทุกการทดลอง

ขณะทำการต้มน้ำ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวหม้อต้มกับน้ำ โดยการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) แต่เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวของหม้อต้มสูงขึ้นจะมีการก่อตัวของฟองอากาศเล็กๆ ขึ้นบนพื้นผิวด้านล่างของตัวหม้อ ซึ่งเรียกช่วงการเกิดนี้ว่า “Nucleate boiling” ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้นบนผิวน้ำทำให้น้ำในหม้อต้มเกิดการกวนและหมุนเวียนดีขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที และเมื่อใส่ปี๊บตัวอย่างลงในหม้อต้มฆ่าเชื้อ การจัดเรียงปี๊บบนชั้นวางที่กำหนดไว้ทำให้น้ำในหม้อต้มมีการเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของน้ำ ณ ตำแหน่งทดสอบต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมาก และจากการสังเกตตลอดทุกช่วงการทดลองไม่สามารถระบุให้แน่ชัดได้ว่า จุดใดเป็นจุดที่ร้อนช้าสุดของเครื่องต้มเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะให้ความร้อน ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในหม้อต้มฆ่าเชื้อมีการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำอย่างสม่ำเสมอ

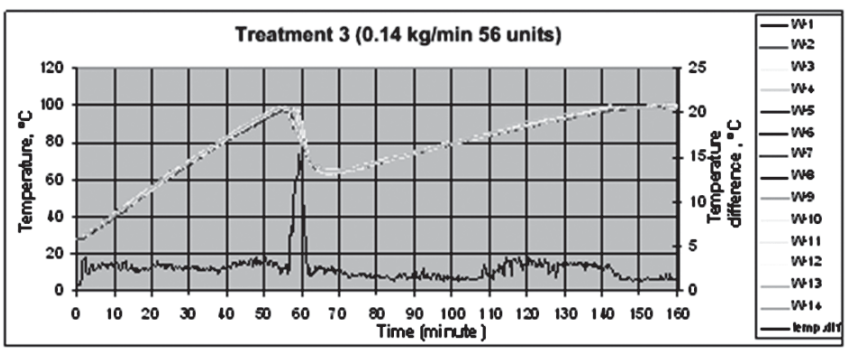
(ก) ชุดทดลองที่ 1



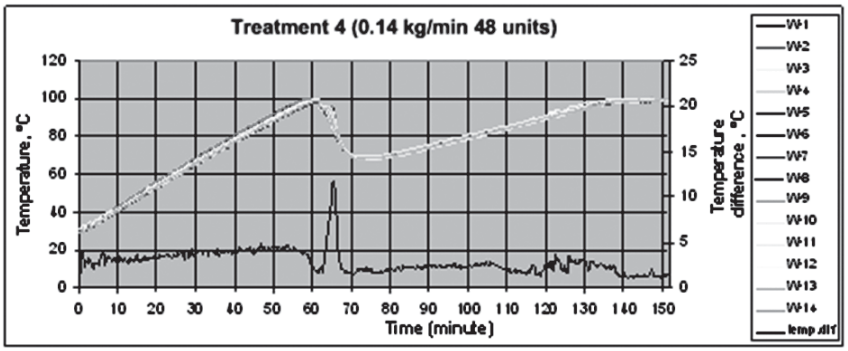
(ข) ชุดทดลองที่ 2



(ค) ชุดทดลองที่ 3



(ง) ชุดทดลองที่ 3

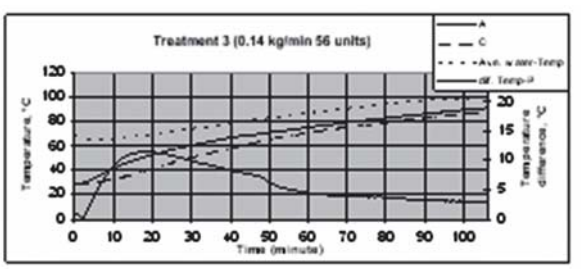


รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ (การทดลองซ้ำที่ 1)

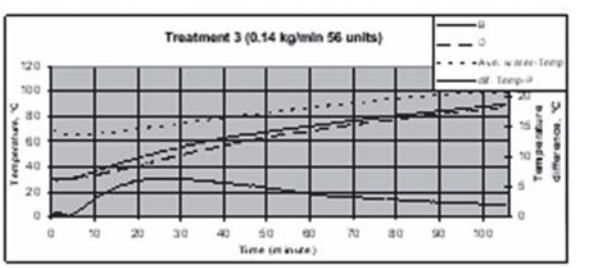
3.2 การศึกษาการแทรกผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

3.2.1 การหาจุดที่ร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์

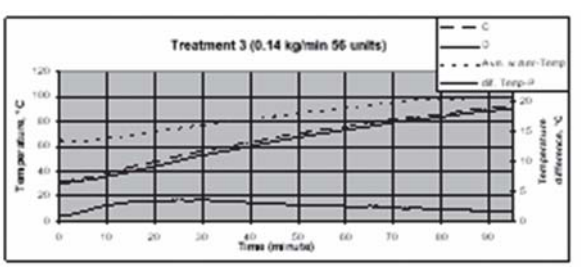
ในการหาจุดร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์จากการเปรียบเทียบระหว่างจุด A กับ C พบว่าจุด C เป็นจุดที่อุณหภูมิของหน่อไม้ร้อนช้ากว่าจุด A และระหว่าง B กับ D พบว่าจุด D เป็นจุดที่ร้อนช้ากว่า ในทุกการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างจุด C กับ D พบว่าจุด D ซึ่งอยู่ที่ความสูงร้อยละ 15 จากด้านล่างของปี๊บตามแนวกึ่งกลางในแนวตั้ง เป็นจุดที่ร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์



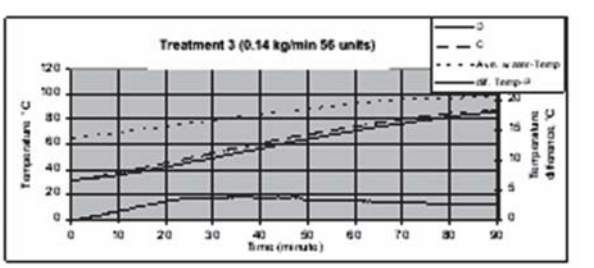
(ก) ระหว่าง จุด A และ C



(ข) ระหว่าง จุด B และ D



(ค) ระหว่าง จุด C และ D (ครั้งที่ 1)



(ง) ระหว่าง จุด C และ D (ครั้งที่ 2)

รูปที่ 7 กราฟของการหาจุดร้อนช้าสุดของหน่อไม้บรรจุปี๊บ (ชุดทดลองที่ 3)

เมื่อน้ำร้อนในหม้อต้มถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวปี๊บหน่อไม้ น้ำปรุง (Packing medium) จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วจึงถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เนื้อหน่อไม้ ลักษณะการจัดเรียงหน่อไม้ในปี๊บถูกวางไปในแนวทางเดียวกันและเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ จนกระทั่งเต็มปี๊บ ดังนั้นเมื่อน้ำปรุงได้รับความร้อนจากทั้งด้านข้างตัวปี๊บและด้านก้นปี๊บ จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีการเคลื่อนที่สู่ด้านบนปี๊บด้วยความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดขึ้น ทำให้น้ำปรุงเกิดการหมุนเวียนภายในปี๊บ แต่ลักษณะการจัดเรียงหน่อไม้จะเป็นอุปสรรคขวางกั้นการหมุนเวียนของน้ำปรุงทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวเนื้อหน่อไม้ช้าลง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานของ Chumjai [1] ที่รายงานว่าจุดร้อนช้าสุดของหน่อไม้บรรจุปี๊บอยู่ที่จุด C ซึ่งคือตำแหน่งเศษหนึ่งส่วนสามจากด้านล่างของปี๊บตามแนวกึ่งกลางในแนวตั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการจัดวางปี๊บในหม้อต้มของ Chumjai [1] ก้นปี๊บสัมผัสกับตัวหม้อต้มโดยตรง และหม้อต้มเป็นโลหะและมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำเดือด ทำให้มีอิทธิพลของการนำความร้อนจากตัวหม้อต้มสู่ตัวปี๊บ การถ่ายเทความร้อนจึงดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีนี้ที่ก้นปี๊บสัมผัสกับน้ำเดือด ดังนั้นในกรณี Chumjai [1] จุดร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์จึงอยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่า

3.2.2 การกำหนดกระบวนฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

การทดลองนี้เลือกใช้ชุดทดลองที่ 1 เป็นเงื่อนไขของการทดลองในการให้ความร้อน (เพราะจำนวนปี๊บสูงสุดและมีต้นทุนผลิตต่ำ) โดยวัดอุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าสุดของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่ง D ซึ่งวางไว้บริเวณด้านข้าง ของหม้อต้ม (กำหนดเพื่อเป็นจุดทดสอบเพราะเป็นบริเวณที่น้ำในหม้อต้มมีอุณหภูมิต่ำสุด) จนกระทั่งอุณหภูมิ ณ จุดร้อนช้าสุดไม่น้อยกว่า 85 ˚C เป็นเวลา 5 นาที [4] จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ พบว่า เวลาที่ให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์จนกระทั่งอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าสุดมีค่าไม่ต่ำกว่า 85˚C เป็นเวลา 5 นาที คือ 77, 68 และ 78 นาทีตามลำดับ ผลการคำนวณค่าพาสเจอไรซ์ (Pasteurization value, P) ด้วยสมการของ Holdsworth [5] $P_{T_{ref}}^{Z} = \int_0^t 10^{(T-T_{ref})/Z} dt$ (โดยใช้ค่า Z เท่ากับ 7 และค่า T_{ref} เท่ากับ 85˚C [1]) ได้เท่ากับ 16.69, 13.51 และ 14.99 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 จากข้อมูลที่ได้ค่า P ของการทดลองที่ 3 น่าจะสูงกว่าของการทดลองที่ 1 เพราะว่าทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิน้ำเดือดสูงกว่า รวมทั้งเวลาในการให้ความร้อนก็นานกว่า สาเหตุที่มิได้เป็นดังกล่าวเพราะไม่สามารถควบคุม ขนาด อายุ และการเรียงหน่อไม้ในปี๊บให้เหมือนกันได้ทุกปี๊บ มีผลให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่มีทั้งการพาและการนำความร้อนแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการให้ความร้อน พบว่าใช้เวลาในการทำให้น้ำในหม้อต้มฆ่าเชื้อมีอุณหภูมิถึงจุดเดือดอีกครั้งหลังจากใส่ปี๊บตัวอย่างลงไป (Come-up time) ไม่เกิน 60 นาที และเวลาในการคงอุณหภูมิของน้ำเดือดไว้จนกระทั่งอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์มีค่าไม่ต่ำกว่า 85 ˚C เป็นเวลา 5 นาที มีค่าสูงสุด 20 นาที

ดังนั้นจึงกำหนดขั้นตอนของกระบวนการฆ่าเชื้อ สำหรับผลิตภัณฑ์หน่อไม้ปรับกรดบรรจุปี๊บ น้ำหนักเนื้อ 14 กก. ที่มีน้ำหนักสุทธิ 20 กก. ได้ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตัวกลางในการให้ความร้อนคือ น้ำเดือด และเวลาในการฆ่าเชื้อคือ 20 นาที โดยเริ่มจากเมื่ออุณหภูมิน้ำในหม้อฆ่าเชื้อที่ใส่ผลิตภัณฑ์ลงไปแล้วเดือด (เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่จุดร้อนช้าสุดได้รับความร้อนที่ 85˚C เป็นเวลาอย่างต่ำ 5 นาที)

ตารางที่ 3 เวลาที่ให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์และค่าพาสเจอร์ไรซ์

ชุดทดลองที่ 1 การทดลองที่	อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (°C)	อุณหภูมิน้ำเดือด (°C)	เวลาในการให้ความร้อน (นาที)	Pasteurization Value (P) (นาที)
1	29.7	97	77	16.69
2	31.0	97	68	13.51
3	31.0	98	78	14.99

ตารางที่ 4 การคำนวณค่าใช้จ่ายของแก๊สหุงต้ม

	ชุดทดลองที่ 1	ชุดทดลองที่ 2	ชุดทดลองที่ 3	ชุดทดลองที่ 4
เวลาผลิตต่อครั้ง (นาที)*	110	100	130	115
จำนวนรอบที่ผลิตได้ในเวลา 10 ชั่วโมง (รอบ)	5.45	6.00	4.62	5.22
Adjusted value	6	6	5	5
จำนวนปี๊บที่ผลิตได้ (ปี๊บ)	336	288	280	240
ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง				
1. ช่วงการต้มน้ำให้เดือดในช่วงแรก (บาท)	144	140	180	168
2. ค่าแก๊สต่อรอบการผลิต (บาท)	286	210	358	259
รอบการผลิต	**ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง (บาท/ปี๊บ)**			
1	7.68	7.29	9.61	8.90
2	6.39	5.83	8.00	7.15
3	5.96	5.35	7.46	6.56
4	5.75	5.10	7.20	6.27
5	5.62	4.96	7.04	6.10
6	5.54	4.86	6.93	5.98

* เป็นผลรวมของเวลาที่ใช้ใน (1) การลำเรียง (Loading) ปี๊บเข้าและออกจากหม้อต้มฆ่าเชื้อ (2) Come-up time และ (3) Holding time ของ 1 ครั้ง (batch)

3.2.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายของแก๊สหุงต้ม โดยพิจารณาจากผลรวมของเวลาที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละครั้ง (Batch) ซึ่งประกอบด้วย (1) การลำเรียง (Loading) ปี๊บเข้าและออกจากหม้อต้มฆ่าเชื้อ (2) Come-up time และ (3) Holding time และช่วงของฤดูการผลิตซึ่งมีระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน จากการประมาณการณ์พบว่า Treatment 1, 2, 3 และ 4 สามารถผลิตหน่อไม้ปี๊บได้จำนวน 336, 288, 280 และ 240 ปี๊บต่อวัน ต่อเครื่อง และมีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงอยู่ที่ 5.54, 4.86, 7.04 และ 6.10 บาทต่อปี๊บ (คิดจากราคาแก๊สหุงต้มที่ 20 บาทต่อกิโลกรัม) ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกชุดทดลองที่ 1 เป็นเงื่อนไขการผลิตเนื่องจากได้จำนวนผลิตภัณฑ์ต่อวันมากที่สุด และมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ต่ำ และควรเลือกทำการต้มหน่อไม้ปี๊บด้วยหม้อต้มฆ่าเชื้อขนาดเล็กนี้จำนวน 2 เครื่อง เพื่อให้ได้กำลังการผลิตหน่อไม้ปรับกรดบรรจุปี๊บตามกำหนดไม่ต่ำกว่า 500 ปี๊บต่อวัน

4. สรุปผลการทดลอง

หม้อต้มฆ่าเชื้อที่ออกแบบและสร้างทำจากเหล็กไร้สนิม เกรด 304 มีขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 120x380x50 ซม.^{3} บรรจุปี๊บขนาด 24x24x34 ซม.^{3} ได้สูงสุด 56 ปี๊บ และใช้เตาหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน รุ่น KB-10 จำนวน 6 หัว และเลือกใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางให้ความร้อน โดยมีแก๊สแอลพีจีเป็นแหล่งเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่าหม้อต้มมีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ มีค่าอุณหภูมิต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าจุดร้อนช้าสุดของหน่อไม้ปี๊บอยู่ที่ตำแหน่งความสูงร้อยละ 15 จากด้านล่างของปี๊บ ตามแนวกึ่งกลางในแนวตั้ง จากการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนในผลิตภัณฑ์สามารถกำหนดขั้นตอนของกระบวนการฆ่าเชื้อสำหรับผลิตภัณฑ์หน่อไม้ปี๊บปรับกรด สำหรับน้ำหนักเนื้อ 14 กก. น้ำหนักสุทธิ 20 กก. ได้ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตัวกลางในการให้ความร้อนคือ น้ำเดือด เวลาในการฆ่าเชื้อ คือ 20 นาที เริ่มจากเมื่ออุณหภูมิน้ำในหม้อฆ่าเชื้อที่ใส่ผลิตภัณฑ์ลงไปแล้วเดือด (เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่จุดร้อนช้าสุดได้รับความร้อนที่ 85 ˚C เป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที) ในการผลิตควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไว้ที่ 0.18 กก. ต่อนาที และจำนวนปี๊บทดสอบที่ 56 ปี๊บ ให้จำนวนผลิตภัณฑ์ต่อวันมากที่สุด โดยมีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ 5.54 บาทต่อปี๊บ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ เครือข่ายบริหารการวิจัยภาคกลางตอนล่าง สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Chumjai, P., 2004, *Thermal Process Design for Acidified Bamboo Shoot Packed in Hermetically Sealed Bulk Package,* Master of Engineering Thesis, Food Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp. 1-111.

2. Jugjai, S., Tia, S., and Rungsimuntuchart, N., 2001, "Experimental Study on High Efficiency Heat-recirculating Gas Burners Based on the Porous Medium Technology", *Asian Journal of Energy & Environment,* Vol. 2, Issue 3-4, pp. 169-198.

3. Saravacos, G.D. and Kostaropoulos, A.E., 2002, *Handbook of Food Processing Equipment,* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 1-76.

4. Campden & Chorleywood Food Research Association-Technical Manual No. 27, 1992, *Food Pasteurization Treatments.*

5. Holdsworth, S.D., 1997, *Thermal Processing of Packaged Foods,* 1st ed., Blackie Academic & Professional, London, pp. 1- 274.