

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

Salmonella เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ ซึ่งหากได้รับเชื้อมากเกินไปในปริมาณที่มากพออาจก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ มักพบการปนเปื้อนของแบคทีเรียชนิดนี้ในอาหารต่างๆ เช่น อาหารพร้อมบริโภค วัตถุดิบที่ใช้ประกอบอาหาร เป็นต้น Francis และคณะ (1999) ได้รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวกับความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของผัก พบว่ามีการปนเปื้อน *Salmonella* spp. ในผักสดหลายชนิด อาทิเช่น ผักใบ (4%) ถั่วถั่ว (20%) ผักกาดหอม (68%) ยี่ห่วย (72%) สำหรับการสำรวจอาหารในประเทศไทย Bangtrakulnonth และคณะ (2004) รายงานว่า *Salmonella* ที่พบในคน อาหารและแหล่งต่างๆ ระหว่างปี พ.ศ. 2536-2545 คือ *S. Anatum* พบการระบาดมากเป็น 1 ใน 10 อันดับแรกและมักพบ *S. Anatum* ในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ (17%) และน้ำ (11%) สำหรับปี พ.ศ. 2546 ได้ตรวจพบ *S. Anatum* มากที่สุดในตัวอย่างประเภทอาหารพร้อมบริโภค (28.26%) และสามารถแยกซีโรวาร์นี้ได้จากผักสด เช่น ถั่วเขียว และกะหล่ำปลี เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบ *Salmonella* ในอาหารอบแห้งและอาหารที่มีค่าออกฤทธิ์แอคทีวิตีต่ำ (Waert activity; a_w) เช่น นมผง มะพร้าวแห้ง เครื่องเทศ และผักอบแห้ง (McDonough และ Hargrove, 1968; Archer และคณะ, 1998)

โดยทั่วไป *Salmonella* เป็นแบคทีเรียที่ไม่ทนความร้อน แต่พบได้ในสภาวะที่มีค่า a_w ต่ำ *Salmonella* มีค่าการต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น (Goepfert และคณะ, 1970; Mattick และคณะ, 2001) เช่น Archer และคณะ (1998) ทดลองอบแป้งสาลีที่มีค่า a_w ในช่วง 0.2-0.6 โดยใช้ลมร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 57-77 องศาเซลเซียส เพื่อทำลาย *Salmonella* Weltevreden พบว่าแป้งสาลีที่มีค่า a_w 0.2 มีค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* สูงกว่าแป้งสาลีที่มีค่า a_w 0.6 Beuchat และ Scouten (2002) ศึกษาอิทธิพลของค่า a_w ต่อการเหลือรอดของ *S. Anatum*, *S. Cubana*, *S. Infantis* และ *S. Stanley* ใน Alfalfa seed พบว่า *Salmonella* สามารถมีชีวิตรอดอยู่ใน Alfalfa seed ที่มีค่า a_w 0.21 นาน 52 สัปดาห์ ในขณะที่ Alfalfa seed ที่มีค่า a_w สูงขึ้นเป็น 0.60 พบ *Salmonella* สามารถมีชีวิตรอดได้นาน 48 สัปดาห์ แสดงให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์ที่มีค่า a_w ต่ำ *Salmonella* มักมีค่าการต้านทานความร้อนสูงขึ้นจึงยากที่จะทำลายในระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตอาหารอบแห้ง เช่น ผักและผลไม้อบแห้ง ซึ่งโดยปกติต้องอบแห้งอาหารให้มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 จึงอาจมีโอกาที่ *Salmonella* จะเหลือรอดได้หลังสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นอันตรายกับผู้บริโภค ดังนั้นกระบวนการอบแห้งจึงเป็นขั้นตอนวิกฤตสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่มดังกล่าว

นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการอบแห้งมักพบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอาหาร เช่น เกิดการหดตัว เกิดรอยร้าวบริเวณผิวอาหาร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจมีผลกระทบต่อความสามารถในการ

เกาะติดของจุลินทรีย์บนผิวของอาหาร เนื่องจากมีรายงานว่าผัก ผลไม้ที่มีผิวขรุขระหรือมีรอยหยักจะมีโอกาสในการปนเปื้อนจุลินทรีย์สูง เนื่องจากมีพื้นผิวสัมผัสมากและง่ายต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์ (Wang และคณะ 2009) และในระหว่างกระบวนการอบแห้งผัก Hawaree และคณะ (2009) พบว่า *Salmonella* มักยึดเกาะบริเวณรอยบนบนผิวกะหล่ำปลีที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งอาจปกป้อง *Salmonella* จากการได้รับความร้อนโดยตรงได้ ดังนั้นการศึกษาผลของความขรุขระต่อการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยการจะทราบค่าความขรุขระของอาหารอาจต้องมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis technique) มาช่วยเพื่อแปรความขรุขระของอาหารเป็นค่าเชิงปริมาณให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่า สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพอธิบายการเปลี่ยนแปลงอาหารมากมายเช่น ใช้อธิบายค่าความสุก สี เนื้อสัมผัส และการหัดตัวของอาหาร เป็นต้น Quevedo และ Aguilera (2004) อธิบายลักษณะความขรุขระของผิวมะเขือเทศโดยใช้หลักการสะท้อนแสง พบว่าภาพถ่ายที่ได้สามารถใช้แสดงลักษณะของความขรุขระของผิวหน้าของอาหาร และมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าของอาหารได้ นอกจากนี้ Hawaree และคณะ (2009) และ Chiewchan และคณะ (2010) ได้พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของผักในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยอธิบายลักษณะของพื้นผิวผักในรูปของแฟกเตอร์ความขรุขระ (Roughness factor, R) จากผลการศึกษาพบว่าค่า R ของกะหล่ำปลีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น และอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ซึ่งค่า R สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่าง โดยค่า R สามารถใช้เป็นดัชนีแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวผักในระหว่างการอบแห้งได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่ธรรมชาติมีลักษณะพื้นผิวขรุขระซึ่งน่าจะส่งผลโดยตรงต่อการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน เช่น การอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของลักษณะผิวหน้าผักและค่าความขรุขระต่อการเหลือรอดของ *Salmonella* ในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิจัยที่ได้ จะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการแปรรูปผักผลไม้ด้วยวิธีอบแห้งระดับอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้ทั้งคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของลักษณะของโครงสร้างและผิวหน้าของผักต่อความสามารถในการยึดเกาะและการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ในระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะของผิวหนังอาหารสดที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ โดยใช้แคโรทเป็นตัวอย่างผักที่ใช้สร้างลักษณะผิวหนังอาหารที่มีลักษณะต่างๆ กัน 3 รูปแบบ คือ แบบตัดเรียบ แบบฟันฉลาม และแบบคลื่น พร้อมกับศึกษาผลของค่าความขรุขระของอาหารวัดค่าในเทอมของความสูงของคลื่น (Wave height; x) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.8 เซนติเมตร ต่อความสามารถในการยึดเกาะของ *Salmonella*
2. ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของตัวอย่างแคโรท ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอาหารที่มีลักษณะผิวหนังอาหารต่างๆ กันในระหว่างการอบแห้งต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella*

1.4 ประโยชน์ของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น กระบวนการอบแห้ง เป็นต้น รวมถึงทราบผลของลักษณะพื้นผิวผักตามธรรมชาติที่มีความขรุขระต่างกันต่อค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ในระหว่างอบแห้ง ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิตให้สามารถทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนมากับอาหารได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

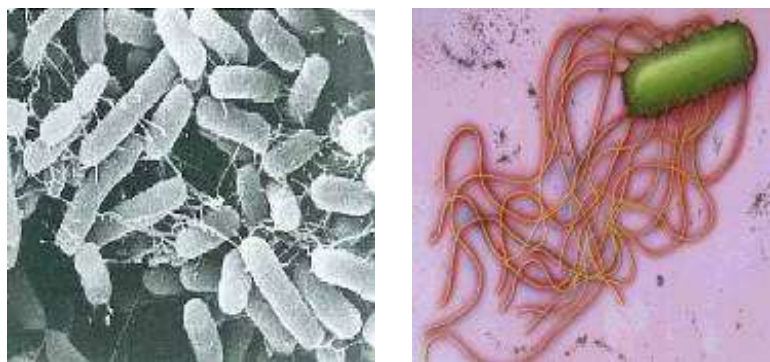
2.1 *Salmonella* spp.

Salmonella เป็นแบคทีเรียอยู่ในตระกูล Enterobacteriaceae มีรูปท่อน (รูปที่ 2.1) ติดสีแกรมลบ (Gram negative) ไม่สร้างสปอร์ มีขนาด 0.7–1.5 ไมครอน ยาว 2.0–5.0 ไมครอน สามารถเคลื่อนที่ได้โดยใช้แฟลกเจลลาที่มีอยู่รอบเซลล์ (Peritrichous flagella) เจริญได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobe) เจริญได้ในช่วงอุณหภูมิ 8-45.6 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญประมาณ 37 องศาเซลเซียส pH 4.5–9.0 ค่า วอเตอร์แอกทิวิตี้ที่เหมาะสมต่อการเจริญมีค่าประมาณ 0.94–0.99 (Bell และ Kyriakides, 2002)

Salmonella จะมีแอนติเจนหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปประกอบด้วยโอแอนติเจน และ เอชแอนติเจน ซึ่งจากความแตกต่างของแอนติเจนดังกล่าว ทำให้ *Salmonella* ทั้งหมดถูกนำมาจัดใหม่เป็น 2 สปีชีส์ คือ *S. enterica* และ *S. bongori* แต่ละสปีชีส์จำแนกออกเป็นหลายชนิดย่อย (Subspecies) *Salmonella* กว่า 2,000 ซีโรวาร์ถูกนำมาจัดอยู่ในสปีชีส์ *Salmonella enterica* ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 5 ชนิดย่อย ดังนี้

Group I	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>enterica</i>
Group II	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>salmae</i>
Group III a	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>arizona</i>
Group III b	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>diarizonae</i>
Group IV	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>houtenae</i>
Group VI	:	<i>S. enterica</i> subsp. <i>indica</i>

Salmonella กลุ่ม V ได้ถูกยกฐานะขึ้นเป็นสปีชีส์ คือ *Salmonella bongori* (Jay, 2000) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนำไปสู่พัฒนาการของวิธาน และมีวิธีการเขียนชื่อวิทยาศาสตร์สำหรับ *Salmonella* แบบใหม่คือ จากเดิมเคยเขียนว่า *Salmonella typhimurium* ต่อไปนี้จะต้องเขียนโดยใช้ชื่อจีนัสเป็นตัวเอน ส่วนชื่อสปีชีส์ย่อยใช้ตัวธรรมดาและตัวอักษรแรกให้เป็นตัวพิมพ์ใหญ่ คือ *Salmonella enterica* serovar Typhimurium หรือเขียนย่อได้ว่า *S. Typhimurium*



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ *Salmonella*

2.1.1 แหล่งและสาเหตุการปนเปื้อน *Salmonella*

Salmonella เป็นแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษและการแพร่ระบาดอย่างมากในประเทศต่างๆ ทั่วโลก มักพบการปนเปื้อนของ *Salmonella* ทั้งในอาหารสดและอาหารที่ผ่านการปรุงแล้ว เช่น อาหารประเภทไข่ นม เนื้อสัตว์ปีก สัตว์น้ำจำพวกที่มีเปลือก เช่น หอย กุ้ง ปู และผักผลไม้ เช่น ถั่วงอก มะพร้าว แคนตาลูป เป็นต้น (Bell และ Kyraikides, 2002) *Salmonella* สามารถแพร่ได้หลายทาง เนื่องจากแบคทีเรียชนิดนี้อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารของคนและสัตว์ จึงออกจากร่างกายของคนและสัตว์ทางอุจจาระ ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ ดิน โดยปกติแล้ว *Salmonella* จะแพร่จากสัตว์ไปสู่คน โดยการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อน *Salmonella* หรืออาจเป็นการแพร่จากบุคคลหนึ่งไปยังอีกบุคคลหนึ่งได้ โดยคนหรือสัตว์อาจเป็นพาหะ (Carrier) ซึ่งมีการปกติแต่มี *Salmonella* อยู่ในทางระบบทางเดินอาหาร ดังนั้น คนหรือสัตว์ที่เป็นพาหะจึงเป็นแหล่งแพร่ *Salmonella* ได้

การแพร่กระจายของ *Salmonella* เกิดขึ้นได้ตั้งแต่แหล่งเพาะปลูก ซึ่งอาจปนเปื้อนมาจากดิน น้ำ ปุ๋ย หรือระหว่างกระบวนการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังอาจเกิดการปนเปื้อนระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การคัดแต่ง บรรจุ รวมทั้งการปนเปื้อนข้าม ซึ่งในผักและผลไม้มีสารอาหารที่จำเป็นและเหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย ถ้าหากมีการปนเปื้อนจะทำให้แบคทีเรียเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นกรรมวิธีการลดจำนวนแบคทีเรียทั้งก่อนและระหว่างกระบวนการแปรรูปจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งขั้นตอนการล้างทำความสะอาด การคัดแต่ง และกระบวนการให้ความร้อน นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงชนิดและประเภทของวัตถุดิบ เนื่องจากผักและผลไม้มีลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะเหล่านี้มีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของแบคทีเรีย ทั้งยังมีส่วนในการป้องกันเซลล์แบคทีเรียจากสารเคมีที่ใช้ล้าง และความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ ส่งผลให้แบคทีเรียมีค่าการต้านทานความร้อนสูง เซลล์แบคทีเรียจึงรอดชีวิตและหลงเหลือในผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคเป็นอย่างยิ่ง

2.1.2 การปนเปื้อนของ *Salmonella* ในผักและผลไม้

Salmonella ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ ท้องร่วง และอาจมีอันตรายถึงชีวิตได้เมื่อบริโภคอาหารที่มีเซลล์ที่มีชีวิตของแบคทีเรียปนเปื้อนอยู่ แม้ปริมาณต่ำก็ตาม นอกจากจะพบการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ ไข่ และนมแล้ว ยังพบการปนเปื้อนในผัก ผลไม้สดหลายชนิดเช่น ถั่วงอก ผักกาดหอม ยี่ห่วย (Francis และคณะ, 1999; Viswanathan และ Kaur, 2001; Behrsing และคณะ, 2003; Beuchat และ Scouten, 2002)

นอกจากนี้ยังพบว่า *Salmonella* สามารถรอดชีวิตและเจริญได้ในผักผลไม้ ดังงานวิจัยของ Escartin และคณะ (1989) พบว่า *S. Typhi* และ *S. Derby* สามารถเจริญในมะละกอและแตงโมที่เก็บ ณ อุณหภูมิห้อง (25-27 องศาเซลเซียส) ภายใน 6 ชั่วโมง Golden และคณะ (1993) รายงานว่า *S. Anatum*, *S. Chester*, *S. Havana*, *S. Poona* และ *S. Senftenberg* สามารถเพิ่มจำนวนได้บนเนื้อแคนตาลูป แตงโม และแตงฮันนี่คิว ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มจำนวนจาก 5 เป็น 7 log₁₀ CFU/g ภายใน 24 ชั่วโมง และเซลล์ยังคงรอดชีวิตที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส แม้ไม่มีการเพิ่มจำนวนก็ตาม (Zhuang และคณะ, 1995) นอกจากนี้ Piagentini และคณะ (1997) รายงานว่า *S. Hadar* บนกะหล่ำปลียังสามารถเจริญและรอดชีวิต ทั้งที่ผ่านการแปรรูปขึ้นต้นคือ เก็บที่อุณหภูมิ 4, 12 และ 20 องศาเซลเซียส โดยพบว่าตัวอย่างกะหล่ำปลีที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตรวจพบ *Salmonella* ในจำนวนที่คงที่ภายใน 10 วันแรกของการเก็บรักษา แต่สามารถเพิ่มจำนวนมากขึ้นเมื่อเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 12 และ 20 องศาเซลเซียส

การสำรวจอาหารในประเทศไทย Bangtrakulnonth และคณะ (2004) รายงานว่า *Salmonella* ที่พบในคน อาหารและแหล่งต่างๆ ระหว่างปี พ.ศ. 2536-2545 คือ *S. Anatum* พบการระบาดมากเป็น 1 ใน 10 อันดับแรกและมักพบ *S. Anatum* ในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ (17%) และน้ำ (11%) และในปี พ.ศ. 2546 ตรวจพบ *S. Anatum* มากที่สุดในตัวอย่างประเภทอาหารพร้อมบริโภค (28.26%) รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ประกอบอาหาร (17.55%) นอกจากนี้ยังสามารถแยกซีโรวารีนีได้จากผักสด เช่น ถั่วงอก และกะหล่ำปลี เป็นต้น

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและการอยู่รอดของ *Salmonella*

เนื่องจาก *Salmonella* มีความสามารถในการปรับตัวได้ดีจึงสามารถรอดชีวิตในสิ่งแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลต่อการเจริญเติบโตและความอยู่รอดของ *Salmonella* เพื่อให้สามารถควบคุมหรือใช้ปัจจัยเหล่านี้ในการควบคุมการแพร่กระจาย *Salmonella* โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและการอยู่รอดของ *Salmonella* คือ

2.1.3.1 อุณหภูมิ

Salmonella เป็นแบคทีเรียที่เจริญได้ดีที่อุณหภูมิร่างกายคนหรือสัตว์ หรือ เรียกว่า mesophilic bacteria โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญ (Optimal temperatures) อยู่ระหว่าง 30-45 องศาเซลเซียส อัตราการเจริญของ *Salmonella* จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิต่ำ เช่น ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส และการเจริญจะถูกยับยั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 7 องศาเซลเซียส (Francis และคณะ, 1999) แต่มีรายงานว่า *Salmonella* บางสายพันธุ์สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ในผักหลายชนิด เช่น กะหล่ำปลี แครอท แตงกวา ผักกาดหอม เป็นต้น โดย *Salmonella* สามารถมีชีวิตอยู่ได้ที่อุณหภูมิ 2-4 องศาเซลเซียส นานถึง 28 วัน (Felsenfeld และ Young, 1954) และสำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่ *Salmonella* สามารถเจริญได้คือ อุณหภูมิ 49.5 องศาเซลเซียส

2.1.3.2 ความเป็นกรดค้าง

pH ที่ *Salmonella* เจริญได้อยู่ในช่วง 4.5-9.5 แต่ช่วงที่เจริญได้ดีคือ pH 6.5-7.5 ปัญหาการเกิดอาหารเป็นพิษในอาหารที่เป็นกรดนั้น น่าจะมาจากความสามารถของ *Salmonella* ในการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมที่ค่อยๆ เป็นกรดทีละน้อย เช่น กรดน้ำนมหมักที่ทำให้เกิดรสเปรี้ยวจากกรดแลคติก (Lactic acid) *Salmonella* Typhimurium สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะที่เป็นกรดได้ (Acid-adapted strain) คือ ในเนยแข็ง เช่น cheddar cheese, swiss cheese และ mozzarella cheese นั้น *Salmonella* สามารถมีชีวิตอยู่ได้นานอย่างน้อย 2 เดือน ที่ 5 องศาเซลเซียส การปรับตัวของ *Salmonella* ต่อสภาวะ pH ภายนอกที่ไม่เหมาะสมจะคล้ายกับการปรับตัวต่ออุณหภูมิที่สูงคือ การตอบสนองเพื่อการทนต่อกรด หรือ Acid tolerance response (ATR) ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นเมื่อ pH ภายนอกเซลล์ต่ำกว่าช่วง pH ปกติที่ *Salmonella* จะสามารถเจริญเติบโตได้ ดังงานวิจัยของ Vadlamudi (2004) ได้ศึกษาผลของคลอรีน (200 ppm เป็นเวลา 3 นาที) กรดแลคติก (2% เป็นเวลา 3 นาที) และโอโซน (30 ppm เป็นเวลา 5 นาที) ในการยับยั้ง *Salmonella* Poona ที่เปลือกแคนตาลูประหว่างกระบวนการตัดแต่ง พบว่าการล้างด้วยน้ำสะอาดที่ไหลผ่านและคลอรีนไม่สามารถลด *Salmonella* ที่ปนเปื้อนลงได้ แต่การล้างด้วยสารละลายกรดแลคติกและโอโซนสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนลงได้ 2.5 และ 2.3 log₁₀ CFU/mL ตามลำดับ

2.1.3.3 อากาศหรือออกซิเจน

Salmonella เป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตได้ไม่ว่าจะมีออกซิเจนหรือไม่ก็ตาม (Facultative anaerobic bacteria) ดังนั้นในผลิตภัณฑ์อาหารสดซึ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จึงพบ *Salmonella* สามารถเจริญได้แม้ว่าจะอยู่ในสภาวะสุญญากาศ (Vacuum packing) หรือแม้แต่ในภาวะปรับบรรยากาศ (Modified atmosphere) ก็ตาม

2.1.3.4 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity; a_w)

ความหมายของน้ำอิสระคือ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ ดังนั้นปริมาณน้ำอิสระจึงมักมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้น (Moisture) ในอาหารเสมอ เนื่องจาก น้ำในอาหารบางส่วนจุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ได้ เนื่องจากน้ำดังกล่าวอาจจะจับตัวรวมตัวอยู่กับสารอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น น้ำเกลือหรือน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นสูงๆ อาจจะมีค่าความชื้นหรือน้ำอยู่สูง แต่จะมีปริมาณน้ำอิสระต่ำ เนื่องจาก น้ำส่วนใหญ่จะไปจับรวมตัวกับโมเลกุลของเกลือหรือน้ำตาลทำให้แบคทีเรียไม่สามารถนำน้ำไปใช้ได้

Salmonella สามารถเจริญได้ดีที่ a_w สูงกว่า 0.93 ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่สามารถยับยั้งการเจริญของ *Salmonella* ได้คือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 34 อย่างไรก็ตาม *Salmonella* สามารถทนต่อความแห้งหรือสิ่งแวดล้อมที่มีค่า a_w ต่ำๆ ได้ เช่น Beuchat และ Scouten (2002) ศึกษาอิทธิพลของค่าออกเตอร์แอกติวิตีต่อการเหี่ยวโรดและการตายของ *S. Anatum*, *S. Cubana*, *S. Infantis* และ *S. Stanley* ใน Alfalfa seed พบว่า *Salmonella* สามารถรอดชีวิตใน Alfalfa seed ที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตี 0.21-0.40 ได้นาน 52 สัปดาห์ ส่วนใน Alfalfa seed ที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตี 0.40-0.60 อยู่ได้นาน 48 สัปดาห์

นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของค่าออกเตอร์แอกติวิตีต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* Juneja และ Eblen (2000) ศึกษาการต้านทานความร้อนของ *S. Typhimurium* DT 104 จำนวน 8 ซีโรวาร์ ที่อุณหภูมิ 62.5 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า D ของ *Salmonella* ในเนื้อวัวที่มีปริมาณไขมัน 7% และ 24% มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.27 นาทีเป็น 2.35 นาที มีรายงานว่า สภาวะที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตีต่ำมีผลทำให้ *Salmonella* มีค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มสูงขึ้น (Goepfert และคณะ, 1970; Mattick และคณะ, 2001) เช่นงานวิจัยของ Archer และคณะ (1998) ทดลองอบแป้งสาลีที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตีในช่วง 0.2-0.6 โดยใช้ลมร้อนในช่วงอุณหภูมิ 57-77 องศาเซลเซียส เพื่อทำลาย *Salmonella* Weltevreden พบว่าแป้งสาลีที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตีต่ำก่อนการอบแห้ง จะทำให้ค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* มีค่าสูงขึ้น

ในการพิจารณาถึงผลของปัจจัยดังกล่าวข้างต้นนั้นในทางปฏิบัติจริงๆ ปัจจัยเหล่านี้มักมีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆ กันในการกระบวนการผลิตจริง และในการตอบสนองของจุลินทรีย์ต่อปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งอาจจะมีการเสริมฤทธิ์ร่วมกับปัจจัยอื่นด้วย ดังนั้นการเข้าใจถึงพฤติกรรมของจุลินทรีย์จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการให้ความร้อนของอาหาร ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้อาหารสุก และสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้

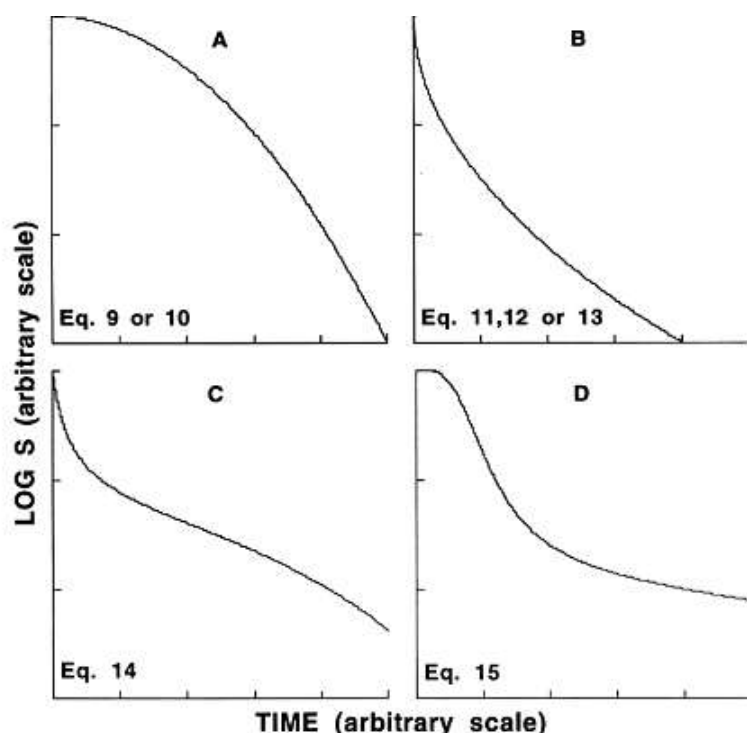
2.2 การศึกษาค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์

โดยทั่วไปความสามารถในการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์แต่ละชนิดและสายพันธุ์จะแตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการทำลายจุลินทรีย์ด้วยความร้อน จะต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมต่อการฆ่าเชื้อนั้นๆ

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการรอดชีวิตของจุลินทรีย์

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ ภายใต้สมมติฐานว่าเซลล์ทุกเซลล์มีค่าการต้านทานความร้อนได้เท่ากัน เมื่อเขียนกราฟการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ในรูป $\log S(t)$ กับเวลา (t) จะได้เส้นกราฟที่มีลักษณะการลดลงเป็นเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่า จุลินทรีย์แต่ละเซลล์มีความสามารถในการต้านทานต่อความร้อนต่างกันเมื่อเขียนกราฟการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ในรูป $\log S(t)$ กับเวลา (t) จึงมีลักษณะกราฟไม่เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2 A-D ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่แสดงค่าคงที่ของจุลินทรีย์ได้จากสมการของ Weibull (Peleg, 2000) โดยสมการดังกล่าวได้พัฒนาให้มีรูปแบบที่เหมาะสมต่อลักษณะการรอดชีวิตของเซลล์แต่ละรูป

โดยกราฟ A มีลักษณะเป็นแบบกราฟโค้งงอ (Downward concavity) ที่มีระยะ lag ในช่วงเริ่มต้น กราฟ B มีลักษณะเป็นแบบกราฟโค้งหงาย (Upward concavity) ซึ่งมีเซลล์ที่ไวต่อความร้อน จึงถูกทำลายในอัตราที่เร็วมาก กราฟ C มีลักษณะเป็นแบบกราฟรูปตัวเอส (Sigmoid curve) เซลล์ที่ไวต่อความร้อนถูกทำลายอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นและเซลล์ที่ต้านทานความร้อนสูงเหลือรอดอยู่ภายหลัง และกราฟ D มีลักษณะเป็นกราฟแบบ Sigmoid curve แต่ในช่วงแรกกราฟจะมี lag และเกิด tail เนื่องจากเซลล์ที่มีค่าการต้านทานความร้อนสูงจะถูกทำลายได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.2 กราฟการรอดชีวิตของจุลินทรีย์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Peleg, 2000)

การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการทำนาย ทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่ออธิบายการรอดชีวิตของจุลินทรีย์เมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป และสามารถนำไปใช้ในการทำนายเวลาที่ใช้ในการยับยั้งจุลินทรีย์ เมื่อทราบจำนวนประชากรจุลินทรีย์ที่ต้องการทำลาย เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้ ซึ่งกราฟ A, B, C และ D สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1), (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

$$\log S(t) = -bt^n \quad \text{เมื่อ } n > 1 \quad (1)$$

$$\log S(t) = -bt^n \quad \text{เมื่อ } n < 1 \quad (2)$$

$$\log S(t) = -\frac{c_1 t}{(1 + c_2 t)(c_3 - t)} \quad (3)$$

$$\log S(t) = -\frac{t^m}{(k_1 + k_2 t^m)} \quad \text{เมื่อ } m > 1 \quad (4)$$

$S(t)$ คือ จำนวนจุลินทรีย์ที่เวลา t หาดด้วยจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น

b คือ Scale factor หมายถึง ค่าคงที่ที่เป็นสมบัติของจุลินทรีย์แต่ละชนิด

n คือ Shape factor หมายถึง ค่าคงที่ที่แสดงรูปร่างของกราฟ ถ้า n มากกว่า 1 ลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นกราฟคว่ำ ถ้า n น้อยกว่า 1 จะได้เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งหงาย และถ้า n เท่ากับ 1 จะได้กราฟเป็นเส้นตรง

c_1, c_2, c_3, k_1, k_2 และ m คือ ค่าคงที่แสดงลักษณะของจุลินทรีย์แต่ละชนิด โดยเฉพาะการถูกทำลาย

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการต้านทานความร้อน

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าองค์ประกอบและลักษณะทางกายภาพของอาหารมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อค่าการต้านทานความร้อนของแบคทีเรีย เช่น ชนิดและจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น ระยะการเจริญของจุลินทรีย์ และลักษณะของอาหารหรือสับสเตรตที่เซลล์เจริญอยู่ในขณะให้ความร้อน ได้แก่ ปริมาณ ไขมัน ค่าพีเอช และค่าวอเตอร์แอคทิวิตี เป็นต้น

2.2.2.1 ชนิดและจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น

จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถในการต้านทานความร้อนต่างกัน ส่วนใหญ่ราและยีสต์จะถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่ายกว่าแบคทีเรีย (Adams และ Moss, 2002) สปอร์ของแบคทีเรียทนความร้อนได้ดีกว่าเซลล์ธรรมดา (Vegetative cell) และระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนขึ้นกับจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น ดังนั้นถ้าปริมาณเซลล์เริ่มต้นมากเกินไปที่กำหนด ก่อให้เกิดปัญหาอาหารผ่านการให้ความร้อนไม่เพียงพอ จึงต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการทำลายจุลินทรีย์ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้นนี้อาจส่งผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ได้

2.2.2.2 ระยะการเจริญของจุลินทรีย์

การต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามระยะการเจริญ แบคทีเรียทนต่อความร้อนได้ดีที่สุดเมื่อเจริญอยู่ในระยะ Stationary phase เซลล์ในช่วง Log phase จะทนต่อความร้อนได้น้อยที่สุด (Jay, 2000) Smith และคณะ (2001) ศึกษาการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* สายพันธุ์ต่างๆ ในเนื้อวัวดิบ (Ground beef) ที่มีไขมัน 19.1% พบว่าจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ในระยะ Stationary phase จะเป็นระยะที่จุลินทรีย์มีค่าการต้านทานความร้อนมากกว่าเมื่อเจริญอยู่ในระยะ Log phase

2.2.2.3 องค์ประกอบของอาหาร

ลักษณะของอาหารที่จุลินทรีย์เจริญขณะได้รับความร้อนนั้นมีผลทำให้ค่าการต้านทานความร้อนของ จุลินทรีย์แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกผ่านของความร้อนของอาหารแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากันจึงส่งผลต่อค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ลักษณะทางเคมีและกายภาพของอาหาร เช่น ค่าพีเอช ปริมาณไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต รวมทั้งการเติมเกลือหรือน้ำตาลหรือการเติมสารลดอสมอาหาร เหล่านี้ล้วนมีผลต่อค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ Casadei และคณะ (1998) พบว่าค่าการต้านทานความร้อนของ *Listeria monocytogenes* ในนมและเนยที่มีปริมาณไขมันต่างกันมีค่าการต้านทานความร้อนสูงกว่าใน Trypticase Soy Broth เนื่องการเพิ่มขึ้นของปริมาณไขมันที่แขวนลอยอยู่ในผลิตภัณฑ์มีผลทำให้ค่าวอเตอร์แอคทีวิตีของผลิตภัณฑ์ลดลงและยังเป็นตัวขัดขวางการส่งผ่านความร้อนไปสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ จึงมีผลให้ค่าการต้านทานความร้อนของ *Listeria monocytogenes* สูงขึ้น

2.3 ทฤษฎีอบแห้ง

การอบแห้งนับเป็นกระบวนการแปรรูปและถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่มีมาแต่โบราณ มีวัตถุประสงค์เพื่อการลดความชื้น การหยุดยั้งปฏิกิริยา เอนไซม์ และการทำลายจุลินทรีย์ในอาหาร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ (Hartel และ Heldman, 1997) และปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการอบแห้งรวมถึงสถานะที่ใช้ในการอบแห้งแบบต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของอาหาร รวมถึงคุณภาพที่ต้องการสำหรับอาหารแต่ละชนิด

โดยทั่วไปหลักการสำหรับการอบแห้ง คือ การลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวโดย Capillary force ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอ (Partial pressure of vapor) ที่แตกต่างกันระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบๆ ผิววัสดุ

เท่านั้น ความร้อนจากอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิวผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังอากาศร้อน และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุด้วยโดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ แล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศร้อน การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความร้อนจากผิวไปยังอากาศ ทำให้ อัตราการอบแห้งลดลง ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ที่จุดนี้ความดันไอของไอน้ำในวัสดุมีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ เรียก ความชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมดุล

ในระหว่างอบแห้งปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลง มีผลให้ปริมาณน้ำในอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงและถ้าการควบคุมกระบวนการอบแห้งไม่เหมาะสมแล้ว การเปลี่ยนแปลงที่ไม่พึงประสงค์กับรูปร่างหรือโครงสร้างมักเกิดขึ้น เช่น เกิดรอยแตก ผิวหน้าแข็ง การเสียโครงสร้างของโปรตีน เป็นต้น

2.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งโดยทั่วไปจะช้าหรือเร็วเพียงใด ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำในอาหาร และประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำมาที่ผิวอาหาร เพื่อระเหยออกไปจากอาหาร ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนและการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารนั้น ย่อมจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหาร ซึ่งอัตราการอบแห้งโดยทั่วไปจะหมายถึง อัตราการระเหยของน้ำหรือการลดลงของปริมาณน้ำในอาหารต่อหน่วยเวลา โดยสภาวะการอบแห้งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งอาหารมีดังนี้

2.3.1.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อระยะเวลาอบแห้ง การเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ สำหรับช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยได้มากและทำให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง จึงเป็นการเพิ่ม Driving force สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้อัตราการแพร่ของน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปมีผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของอาหารแห้ง เช่น การสูญเสียวิตามินและสารอาหารต่างๆ ในอาหาร (Suvanakuta และคณะ, 2005) การเกิดสีน้ำตาลและรสขมของอาหารเนื่องจากการไหม้เกรียมของอาหาร ทำให้อาหารมีคุณภาพไม่เหมาะสมแก่การบริโภค เป็นต้น โดยทั่วไปการอบแห้งผัก ผลไม้ จะใช้อุณหภูมิประมาณ 50-90 องศา

เซลเซียส เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ให้ได้มากที่สุด (Devahastin และคณะ, 2004; Hawaree และคณะ, 2009)

2.3.1.2 ความเร็วลมร้อน

ในขณะที่อบแห้งอาหาร ถ้าบรรยากาศโดยรอบมีลมพัดผ่าน จะช่วยให้น้ำและไอน้ำเคลื่อนมาที่ผิวอาหารนั้น ระเหยออกจากผิวอาหารได้รวดเร็วขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้น ความเร็วลมในบรรยากาศขณะอบแห้งจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง โดยความเร็วลมในห้องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้กันทั่วคือประมาณ 1-2 m/s เพื่อให้น้ำระเหยออกจากผิวอาหารได้ดี และมีอัตราการอบแห้งสูง

2.3.1.3 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเป็นตัวกลางขณะอบแห้งอาหาร เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง กล่าวคือปริมาณความชื้นในอากาศจะส่งผลต่อ Driving force สำหรับ External mass transfer เนื่องจาก Driving force สำหรับ External mass transfer หาได้จากความแตกต่างของความดันไอที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ และความดันไอในอากาศ ดังนั้นการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะทำให้ Driving force ในการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ลดลงในที่สุด

2.3.1.4 ความดัน

เนื่องจากความดันส่งผลต่อสมดุลของน้ำ ดังนั้นจึงส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง การอบแห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำซึ่งก็หมายความว่าความดันน้ำในอากาศก็ต่ำเช่นเดียวกัน จึงทำให้การอบแห้งสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว คือ ถ้าลดความดันของบรรยากาศในขณะอบแห้ง จะทำให้จุดเดือดของน้ำในอาหารนั้นลดลง ทำให้การเคลื่อนตัวและการระเหยของน้ำออกจากอาหารได้ง่ายขึ้น โดยน้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นในเครื่องอบแห้งบางประเภทจึงมีการปรับปรุงสภาวะอากาศในขณะอบแห้ง โดยมีเครื่องดูดอากาศออก ทำให้ความดันต่ำกว่า 1 บรรยากาศในขณะอบแห้ง เพื่อให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2.3.1.5 พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการอบแห้ง

อาหารที่จะนำมาอบแห้งที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน จะมีผลต่ออัตราการอบแห้งของอาหารนั้น โดยอาหารที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรอาหารมาก จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านความร้อนไปทั่วชิ้นอาหาร เพื่อระเหยนํ้าออกจากอาหารได้ดีขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการอบแห้งเร็วขึ้น นอกจากนี้อาหารที่มีขนาดเล็กพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ยังมีผลต่อระยะทางที่น้ำจะต้องเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งบอกว่าการอบแห้งจะเร็วหรือช้า ดังนั้น

การตัดผลิตภัณฑ์ให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะเป็นการลดระยะทางในการเคลื่อนที่ของน้ำในผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น น้ำจึงเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

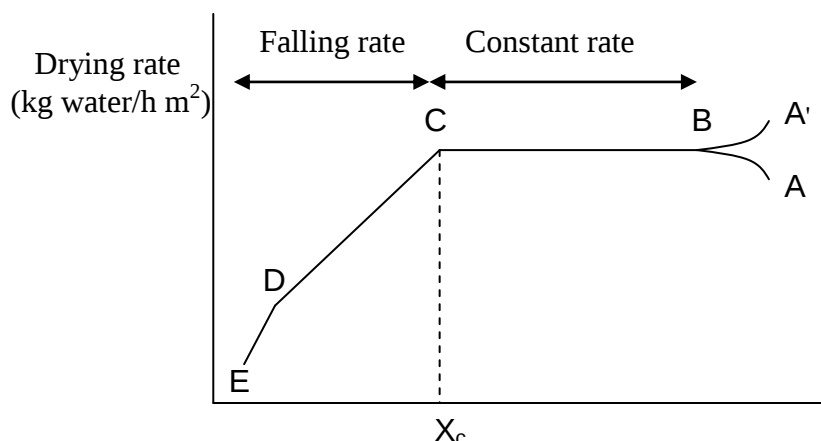
2.3.1.6 โครงสร้างของเซลล์

สภาพธรรมชาติของอาหารยกตัวอย่างเช่น ลักษณะโครงสร้างเซลล์ ปริมาณน้ำในอาหาร และองค์ประกอบทางเคมี เหล่านี้ล้วนแต่มีผลต่ออัตราการอบแห้งทั้งสิ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะอยู่ภายในเซลล์ แต่ก็ยังมีน้ำบางส่วนที่อยู่ระหว่างเซลล์ ซึ่งกำจัดได้ง่ายกว่าน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ ดังนั้นหากทำให้โครงสร้างของเซลล์แตก จะทำให้การอบแห้งทำได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการทำให้เซลล์แตก อาจมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นที่ยอมรับ

2.3.2 การอบแห้งแบบลมร้อน

การอบแห้งแบบลมร้อนเป็นวิธีที่เก่าแก่วิธีหนึ่ง ใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากระบบเพื่อระเหยน้ำและความชื้นออกจากภายในชิ้นอาหารไปสู่ผิวของอาหาร และสู่บรรยากาศต่อไป ในระหว่างการอบแห้งนั้นวัสดุถูกระเหยน้ำออกจากภายในสู่ภายนอกด้วยอัตราการอบแห้งหลัก ๆ สองขั้นตอน ได้แก่ ช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ และอัตราการอบแห้งแบบลดลง แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยตำแหน่ง A และ A' แสดงตำแหน่งของวัสดุร้อน หรือเย็น ตามลำดับ ตำแหน่ง B หมายถึงอุณหภูมิสมดุลที่ผิวของวัสดุ โดยทั่วไประยะระหว่าง A หรือ A' ถึงระยะ B มักจะสั้นมาก จึงไม่นำมาคำนวณเพื่อหาอัตราการอบแห้ง

อย่างไรก็ตามในระหว่างการอบแห้ง อาหารมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำและความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติภายนอก ได้แก่ สมบัติเชิงกายภาพหรือคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร สำหรับช่วง C หมายถึงช่วงที่มีการอบแห้งแบบคงที่เป็นช่วงที่อัตราการระเหยน้ำจากภายในขึ้นตัวอย่างผิวตัวอย่าง เท่ากับอัตราการระเหยน้ำจากผิวตัวอย่างสู่ระบบหรือสิ่งแวดล้อม ช่วงนี้ที่ผิวของตัวอย่างจะมีลักษณะเปียก สำหรับช่วงการอบแห้งแบบลดลownั้นได้แก่ช่วง C ถึง E โดยช่วง C ถึง D เป็นช่วงการอบแห้งแบบลดลงในระยะแรก ผิวตัวอย่างจะเริ่มแห้งจากนั้นช่วง D ถึง E เป็นช่วงการอบแห้งแบบลดลงในระยะที่สอง ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากตัวอย่างน้อยมากในขณะที่เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับที่น้ำไม่สามารถระเหยได้อีก เนื่องจากปริมาณน้ำและความชื้นของวัสดุอยู่ในระดับที่สมดุล (Canovas และ Mercado, 1996) วัสดุที่อบแห้งโดยใช้ความร้อนนี้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน โดยเฉพาะช่วงที่มีอัตราการอบแห้งแบบลดลง ดังนั้นตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เช่น สี คุณค่าทางอาหาร และเกิดการหดตัว เป็นต้น แต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการอบแห้งโดยวิธีอื่นมาก



รูปที่ 2.3 กราฟอัตราการอบแห้ง (Drying rate curve) (Canovas และ Mercado, 1996)

ยกตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน และขนาดของวัสดุที่นำมาทดสอบ Doymaz (2004) ศึกษาผลของอุณหภูมิ และความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง และความหนาของชั้นแครอทที่มีผลต่อกลไกการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยนำแครอทขนาด 1 และ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร อบแห้งที่ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60, 65 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.5 และ 1 เมตร/วินาที ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกระจายความร้อนดีขึ้นด้วย

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงของอาหารที่เกิดจากอิทธิพลของการอบแห้ง

การอบแห้งอาหารส่วนใหญ่จะกระทำโดยการระเหยนํ้าออกจากอาหารด้วยความร้อนนั้น จะมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบและคุณภาพของอาหารในแง่ต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ

2.3.3.1 อิทธิพลของการอบแห้งต่อจุลินทรีย์ในอาหาร

อาหารสดไม่ว่าจะเป็นผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ปลาและอื่นๆ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ซึ่งมีค่า a_w สูง ซึ่งจุลินทรีย์เจริญได้ดี ทำให้อาหารสดเน่าเสียได้ง่าย ซึ่งโดยทั่วไปการอบแห้งมักจะใช้ความร้อนในการระเหยนํ้าเพื่อลดค่า a_w ของอาหาร หลังจากการทำแห้งปริมาณน้ำในอาหารจะลดลงทำให้ค่า a_w ของอาหารอยู่ในระดับต่ำลง ซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ปนมาในอาหารสด ดังนั้นอิทธิพลของการทำแห้งจึงสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามในระหว่างการทำแห้งความปลอดภัยของอาหารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อการทำลายจุลินทรีย์ แต่การกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการ

จุลินทรีย์ ทำให้สปอร์ของแบคทีเรียมักเหลือรอดอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Frazier และ Westhoff, 1988) และพบว่าประสิทธิภาพของการทำลายจุลินทรีย์โดยใช้ความร้อนแห้งนั้นจะต่ำกว่าการใช้ความร้อนชื้น (Jay, 2000; Rahman และคณะ, 2004) เนื่องจากโปรตีนของจุลินทรีย์เสียสภาพเร็วกว่าเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นน้ำเมื่อเทียบกับสภาวะแวดล้อมที่เป็นอากาศ จึงต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษ

2.3.3.2 อิทธิพลของการอบแห้งต่อองค์ประกอบในอาหาร

หลังการอบแห้ง ปริมาณความชื้นในอาหารจะลดลง เมื่อน้ำในอาหารลดลง มีผลทำให้สารอาหารอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาหารแห้งจะให้สารอาหารต่อน้ำหนักมากกว่าอาหารสดหลายเท่า อย่างไรก็ตามการทำแห้งส่วนใหญ่มักใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกจากอาหาร ความร้อนที่ให้แก่อาหารนั้นอาจมีผลต่อการเสียสภาพของอาหาร และการเสื่อมเสียคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร เช่น วิตามิน แร่ธาตุต่างๆ ในอาหารเช่นกัน

2.3.3.3 อิทธิพลของการทำแห้งต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร

การเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร ได้แก่ ความเป็นรูปทรง การหดตัว การเปลี่ยนสีและการสูญเสียความสามารถในการดูดน้ำกลับ (Rehydration) ของอาหาร เกิดเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำและความชื้นจากภายในโครงสร้างมาสู่ผิวของอาหารและสู่บรรยากาศภายนอก ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างเซลล์ของอาหาร (Mayor และ Sereno, 2004) การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพของอาหารนั้น มักแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงด้านปริมาตร รูปร่าง และความหนาแน่น เป็นต้น โดยเปรียบเทียบระหว่างอาหารที่ผ่านการอบแห้งแล้วกับอาหารที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้ง การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพของอาหารอบแห้ง มีดังนี้

ก. การเปลี่ยนสี

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งมักมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากผลของการใช้ความร้อนที่สูงเป็นเวลานานขณะทำแห้ง ทำให้เกิดการไหม้ของน้ำตาล หรือการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่อะมิโนหรือกรดอะมิโน นอกจากนี้อาหารบางชนิดอาจเกิดการซีดจางของสีหลังทำแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการเสื่อมสลายหรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสีในอาหาร โดยเฉพาะอาหารจากพืช เช่น การเสื่อมสลาย หรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสีคลอโรฟิลล์ในพืชสีเขียว เป็นต้น

ข. การเกิดเปลือกแข็ง (Case hardening)

เป็นลักษณะที่ผิวของผลิตภัณฑ์แข็งเป็นเปลือกหุ้มส่วนที่ยังไม่แห้งเอาไว้ เกิดจากการระเหยน้ำในช่วงต้นของการอบแห้งเร็วเกินไป เนื่องจากอัตราการสูญเสียน้ำจากภายในสู่ผิวนอกน้อยกว่าอัตราการสูญเสียน้ำจากผิวของอาหารสู่บรรยากาศ ทำให้ผิวของอาหารมีลักษณะแข็ง (Szczeniak, 1983) น้ำจากด้านในเคลื่อนที่มาที่ผิวไม่ทัน ซึ่งวิธีการที่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดเปลือกแข็งของผลิตภัณฑ์คือ ไม่ใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงเกินไปและใช้อากาศที่มีความชื้นสูงในการอบแห้ง

ค. การหดตัว (Shrinkage)

ในระหว่างการอบแห้ง อาหารสูญเสียน้ำหรือความชื้นออกจากเซลล์ ส่งผลให้เซลล์มีการหดตัว โดยการหดตัวของอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาอบแห้ง และสมบัติเริ่มต้นของอาหาร (Ochoa และคณะ, 2002a) สำหรับวัสดุทางการเกษตรเมื่อนำมาอบแห้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะที่ไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างส่วนมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในรูปของปริมาตรซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นของอาหารนั้นๆ ดังรายละเอียดในงานวิจัยต่อไปนี้

Wang และ Brennan (1995) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแผ่นมันฝรั่งซึ่งมีความหนา 1 เซนติเมตร อบแห้งด้วยลมร้อนโดยภาพจากกล้องจุลทรรศน์สามารถอธิบายความแตกต่างของโครงสร้างมันฝรั่งที่อบแห้งที่เวลาต่าง ๆ กัน ผลการทดลองยังพบว่ามันฝรั่งมีการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งนานขึ้น นอกจากนี้ผนังเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงด้านความยาว (Elongate) มากกว่าด้านกว้าง

Ochoa และคณะ (2002a) ศึกษาลักษณะการหดตัวของผล Rose hip ในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65 และ 75 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 1, 2, 3 และ 5 เมตร/วินาที และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 5% และ 50% ผลการทดลองพบว่าการหดตัวของพื้นที่ผิวขึ้นกับสภาวะอบแห้งกับปริมาณความชื้นของผลไม้และลักษณะโครงสร้างของผลไม้ด้วย ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Ochoa และคณะ (2002b) และ Ratti (1994) ซึ่งอธิบายว่าการหดตัวของผิวหน้าอาหาร ขึ้นกับชนิดและลักษณะทางเรขาคณิตของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับปริมาณความชื้นของตัวอย่างแห้งที่เวลาอบแห้งใดๆ

Khraisheh และคณะ (2004) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงคุณภาพและโครงสร้างของมันฝรั่งในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน ด้วยความเร็วลม 1.5 เมตร/วินาที ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าการหดตัวเชิงปริมาตร (Volumetric shrinkage) ของอาหารมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความชื้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งมีผลต่อค่าการหดตัวของตัวอย่าง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เซลล์ของตัวอย่างและผิวของตัวอย่างมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่มาก ทำให้เกิดแรงเครียดภายในเซลล์ตัวอย่างไม่มาก ตัวอย่างจึงมีการหดตัวได้สูง ในขณะที่ตัวอย่างที่อบแห้งที่

อุณหภูมิสูงมีลักษณะของการเกิดเปลือกแข็งที่ผิวตัวอย่าง เนื่องจากน้ำระเหยออกมาจากผิวสู่บรรยากาศมากกว่าน้ำที่ระเหยจากภายในเซลล์มาสู่ผิวของอาหาร ทำให้ตัวอย่างหดตัวน้อยกว่า

นอกจากนี้การหดตัวหรือการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างผิวหน้าอาหารยังมีผลต่อความปลอดภัยของอาหาร กล่าวคือ ประสิทธิภาพของการทำลายจุลินทรีย์โดยใช้ความร้อนแห้ง เช่น ความร้อนแห้งมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ต่ำกว่าการใช้ความร้อนชื้น (Jay, 2000; Rahman และคณะ, 2004) ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Hawaree และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาผลของลักษณะการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าผักในระหว่างกรอบแห้งต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* โดยใช้กะหล่ำปลีเป็นตัวอย่างผักที่มีผิวหน้าขรุขระ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า ลักษณะพื้นผิวผักที่มีความขรุขระ บริเวณเส้นใบ และรอยหยักของผักสามารถป้องกันจุลินทรีย์จากการได้รับความร้อนโดยตรงในระหว่างกรอบแห้งได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 50-70 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีต่อการเหลือรอดของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากกะหล่ำปลีมีลักษณะบางมาก ดังนั้นอัตราการกรอบแห้งสูงทำให้ผลของความขรุขระไม่มีผลต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมีผลความสามารถในการยึดเกาะของแบคทีเรีย โดยการทราบว่าผัก ผลไม้แต่ละชนิดมีความขรุขระอย่างไร ก่อนนำมาอบแห้งจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งโดยทั่วไปไม่สามารถระบุค่าได้จากสายตา ปัจจุบันนักวิจัยพยายามใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis technique) เพื่อใช้ในการอธิบายความขรุขระของภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4 การวิเคราะห์ภาพ (Analysis of image)

สำหรับสมบัติเชิงกายภาพของอาหาร เป็นสมบัติเชิงปริมาณที่มีผลต่อการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค ในระหว่างกระบวนการอบแห้งสมบัติเชิงกายภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสูญเสีย น้ำและปริมาณความชื้นจากภายในชิ้นอาหารสู่ผิวอาหารและบรรยากาศ นักวิจัยจำนวนมากพยายามอธิบายการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพของอาหารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ได้แก่ การสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากภาพซึ่งได้จากกล้องถ่ายภาพกำลังขยายสูง ๆ เช่น Scanning electron microscope (SEM) และ confocal scanning light microscope (CLSM) (Aguilera และ Stanley, 1999) อย่างไรก็ตามภาพที่ได้นั้นไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้ในเชิงปริมาณ ดังนั้นวิธีการนำภาพถ่ายมาทำการวิเคราะห์ค่าเชิงปริมาณ (Image analysis) จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

2.4.1 การถ่ายภาพ

การถ่ายภาพเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งของการวิเคราะห์ภาพ ภาพที่ถ่ายได้ส่วนมากเป็นภาพที่ถ่ายในรูปแบบของดิจิทัล เทคนิคที่ใช้ในการจับภาพจากกล้องจุลทรรศน์มีหลายวิธี เช่น การ

แสดกน การใช้กล้องดิจิตอล และกล้องแสดกนึ่ง โดยเทคนิคแต่ละเทคนิคนี้มีความเหมาะสมและลักษณะเฉพาะในการนำไปใช้ที่ต่าง ๆ กัน นอกจากนี้ภาพที่ได้มาสามารถถูกบันทึกให้อยู่ในหลายรูปแบบหรือหลายนามสกุล (Russ, 2005)

2.4.1.1 ประเภทของภาพ (Image types)

ภาพบิตแมป (Bitmap image) เป็นภาพที่ประกอบจากจุดขนาดเล็กจำนวนมาก (Pixels) ที่ต่อเรียงกันเป็นภาพ โดยทั่วไปภาพบิตแมปสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามคุณสมบัติของสี ดังต่อไปนี้

ภาพแบบระดับสีเทา (Intensity images หรือ Gray scale image) ลักษณะของภาพชนิดนี้ในแต่ละพิกเซล (Pixel) จะมีค่าความเข้มแสงในแต่ละระดับที่แตกต่างกัน ตั้งแต่สีขาวไปยังสีดำ สามารถกำหนดระดับความเข้มแสงได้โดยใช้ค่าระดับเทา (Gray scale หรือ Gray level) ภาพแบบระดับสีเทาจะมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 8 บิต ซึ่งภาพจะมีค่าระดับความเข้มแสงของสีเทาเท่ากับศูนย์ และมีค่าระดับความเข้มแสงของสีขาวจะมีค่าเท่ากับ 255

ภาพสี (Color image) ภาพชนิดนี้ แต่ละพิกเซลของภาพจะเก็บค่าระดับความเข้มของแต่ละแถบแสงของแม่สีหลัก 3 สี ที่ซ้อนกันคือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) สีน้ำเงิน (Blue) ซึ่งในแต่ละพิกเซลนั้นๆ จะแสดงผลของค่าสีของแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบแสงนั้น

ภาพขาวดำ (Binary image) ลักษณะของภาพขาวดำคือในแต่ละพิกเซลจะแสดงด้วยค่าไบนารี (Binary) คือมี 1 บิต ซึ่งประกอบด้วยค่า 1 และ 0 โดยที่ 1 หมายถึงจุดภาพสีขาว และ 0 หมายถึงจุดภาพสีดำ

ภาพแบบดัชนี (Index image) ภาพประเภทนี้ในแต่ละพิกเซลของภาพจะเก็บค่าดัชนี (Index number) เพื่อนำค่าดัชนีดังกล่าวนี้ไปเทียบกับตารางสี (Color table) ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งค่าดัชนีนี้จะเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าภาพในตำแหน่งพิกเซลนั้นๆ มีค่าอัตราส่วนของแม่แสง 3 สี ในอัตราส่วนละเท่าไร

2.4.1.2 การจัดเก็บข้อมูลรูปภาพ

GIF (Graphics interchange format) รูปภาพชนิดนี้สามารถแสดงค่าระดับสีได้ 256 สีเท่านั้น ใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลและแสดงผล 8 บิต ทำให้การบีบอัดข้อมูลในมาตรฐานนี้เหมาะสำหรับรูปภาพที่แสดงระดับสีที่แตกต่างกันไม่มาก

JPEG (Joint photographic expert group) การบีบอัดข้อมูลที่ใช้มาตรฐานนี้อาศัยหลักการของระบบการมองเห็นของมนุษย์มีขีดจำกัด ทำให้สามารถบีบอัดข้อมูลได้ในอัตราที่สูงมาก โดยการบีบอัดแบบนี้ข้อมูลบางส่วนจะหายไปและไม่สามารถกู้กลับคืนมาได้ ซึ่งคุณภาพที่ได้จะแปรผกผันกับอัตราส่วนการบีบอัดข้อมูล (Compression ratio)

TIFF (Tagged image file format) รูปภาพที่เก็บด้วยมาตรฐานนี้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถเก็บในลักษณะของ Raw data หรือลักษณะที่ถูกบีบอัดได้ เช่น ภาพจากสแกนเนอร์ ภาพที่ออกแบบโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

BMP (Bitmap image file format) เป็นไฟล์ข้อมูลรูปภาพที่ใช้ในงานระบบ Microsoft Windows ไม่มีการบีบอัด ทำให้ไฟล์มีขนาดใหญ่ และไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารผ่านระบบคอมพิวเตอร์

2.4.2 การแปลงภาพ (Image processing)

การแปลงภาพดิจิทัลคือ กระบวนการที่กระทำอย่างใดอย่างหนึ่งกับภาพนำเข้า (Input image) เพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ (Output image) และมีลักษณะของภาพเป็นไปตามที่ต้องการ กระบวนการกระทำกับภาพที่ใช้ในการแปลงภาพดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.4.2.1 กระบวนการกระทำกับภาพที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัล

กระบวนการกระทำกับภาพเฉพาะจุด (Point processing) ค่าระดับความเข้มเทาที่แสดงในแต่ละพิกเซลของภาพผลลัพธ์จะขึ้นกับค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลในภาพนำเข้าพิกเซลต่อพิกเซล ณ ตำแหน่งที่สมนัยกัน โดยที่ค่าเปลี่ยนแปลงของพิกเซลของภาพผลลัพธ์ไม่ได้ขึ้นกับค่าพิกเซลที่อยู่บริเวณใกล้เคียงของภาพต้นแบบ การแปลงภาพแบบนี้ ได้แก่ การปรับค่าระดับความสว่างของภาพ (Brightness) การปรับค่าความแตกต่างระหว่างความสว่างกับความมืดของภาพ (Contrast) หรือการปรับค่าความเข้มของภาพด้วยการบวก ลบ คูณ และหาร ด้วยจำนวนค่าใดๆ กับภาพต้นแบบ หรือการกระทำทางตรรกศาสตร์ต่างๆ เป็นต้น

กระบวนการกระทำกับภาพเฉพาะบริเวณ (Local processing) สำหรับกระบวนการกระทำกับภาพแบบนี้ค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลแต่ละจุดในภาพผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มเทาของกลุ่มพิกเซลที่อยู่ในบริเวณข้างเคียงกัน (Neighborhood pixels) ของภาพต้นฉบับ ตัวอย่างของการแปลงภาพแบบนี้ ได้แก่ การกรองสัญญาณในสเปเชียลโดเมน (Spatial filtering) หรือที่นิยมเรียกว่า การคอนโวลูชัน (Convolution)

กระบวนการกระทำกับภาพทั้งหมด (Global processing) กระบวนการกระทำกับภาพแบบนี้ ค่าระดับความเข้มเทาแสดงในแต่ละตำแหน่งพิกเซลของภาพผลลัพธ์ (Output image) จะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลทั้งหมดของภาพต้นแบบ ลักษณะการกระทำภาพประเภทนี้ ได้แก่ การทำ Thresholding และการทำ Histogram equalization เป็นต้น

2.4.2.2 ขั้นตอนการแปลงภาพ (Image processing)

สำหรับขั้นตอนการแปลงภาพขึ้นกับภาพต้นแบบและความต้องการจากภาพนั้นๆ โดยทั่วไปการแปลงภาพเริ่มจาก การทำให้คุณภาพของภาพดีขึ้น (Filtering) การทำให้รูปเป็นรูปขาวดำ (Binarization) และการแยกรูปภาพ (Segmentation) (Aguilera และ Stanley, 1999)

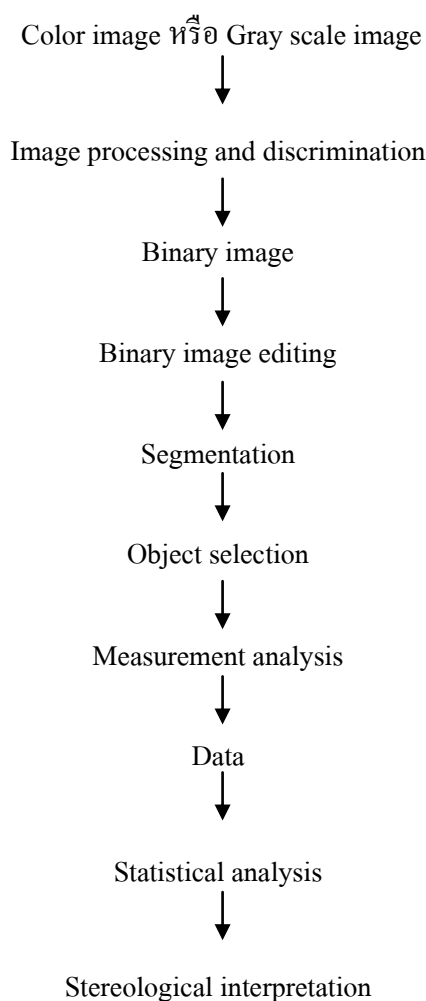
การทำให้คุณภาพของภาพดีขึ้น (Filtering) รูปภาพดิจิทัลที่ใช้งานจริง มักเป็นภาพต้นแบบที่อาจมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปนอยู่ด้วย หรือภาพต้นแบบมีลักษณะเบลอ ไม่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีวิธีการในการแปลงภาพที่จะทำให้คุณภาพของภาพต้นแบบดีขึ้น

การทำให้รูปเป็นรูปขาวดำ (Binarization) รูปขาวดำสามารถทำได้โดยการแปลงข้อมูลภาพที่มีความเข้มหลายระดับ เช่น จากภาพแบบระดับสีเทา ที่มีระดับความเข้มแสง 256 ระดับ ให้เป็นภาพที่มีระดับความเข้มเพียง 2 ระดับ คือ 0 และ 1 ซึ่ง 0 หมายถึงจุดภาพที่มีสีดำ และ 1 หมายถึงจุดภาพที่มีสีขาว

การเลือกภาพ (Segmentation) สำหรับการเลือกภาพเป็นขั้นตอนที่มีการเลือกตำแหน่งของวัตถุที่สนใจในภาพตัวอย่าง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการวิเคราะห์ภาพ หลังจากทีรูปภาพผ่านกระบวนการนี้แล้ว สามารถลดจำนวนข้อมูลในรูปภาพที่ไม่จำเป็นในการวิเคราะห์หลัง สามารถจัดระเบียบข้อมูลในรูปภาพได้ดีขึ้น และแสดงข้อมูลที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น ภาพที่ได้จะนำไปทำการวิเคราะห์ภาพต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์ภาพนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ประยุกต์ใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Aguilera, 2003; Quevedo และ Aguilera, 2004; Fernandez และคณะ, 2005) ขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ภาพประกอบด้วย การถ่ายภาพ (Image acquisition) การแปลงภาพ (Image processing) และการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis) เป็นต้น (Aguilera และ Stanley, 1999; Fernandez และคณะ, 2005) แสดงดังรูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ภาพมีวัตถุประสงค์ต่างๆ กัน ขึ้นกับชนิดของภาพ และข้อมูลที่ต้องการศึกษา ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ นำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพมาใช้ในการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาหารระหว่างกระบวนการผลิต

Nieto และคณะ (2004) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอปเปิ้ลในระหว่างกรอบแห้งด้วยวิธีออสโมติก โดยสังเกตลักษณะการหดตัว ความเป็นรูพรุน ความหนาแน่น และโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light microscope) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) จากผลการสังเกตพบว่าภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองชนิดสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวได้ แต่อย่างไรก็ตามภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ในเชิงปริมาณของอาหารจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Analysis of image) โดยงานวิจัยที่นำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพมาใช้ในการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาหารระหว่างกระบวนการผลิต มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพ (Aguilera และ Stanley, 1999)

Quevedo และ Aguilera (2004) อธิบายลักษณะความขรุขระของเปลือกมะเขือเทศโดยใช้วิธี สะท้อนแสง (Light scattering) โดยถ่ายภาพด้วย Light microscope และพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความยาวคลื่นและแอมพลิจูดคลื่นแสง พบว่าภาพถ่ายที่ได้สามารถใช้แสดงลักษณะของความขรุขระของ ผิวหน้าของอาหาร และมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าของอาหารได้

Fernandez และคณะ (2005) ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ภาพในการอธิบายการอบแห้งของแอปเปิ้ล แผ่น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ค่าการหดตัว การเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ความกลมและค่าสีของแอปเปิ้ลแผ่นโดยใช้กล้องดิจิทัลในการถ่ายภาพแอปเปิ้ลและใช้ โปรแกรม Matlab 6.5 ในการวิเคราะห์ภาพ พบว่า การอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สี และเนื้อ สัมผัส นอกจากนี้ยังพบว่า การวิเคราะห์ภาพสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าสีได้ดีกว่าการอธิบาย ค่าโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับปริมาณความชื้นของอาหารในระหว่างการอบแห้ง

Kerdpiboon และคณะ (2007) นำเทคนิคการวิเคราะห์แฟรคทัลมาใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของอาหาร (แครอท และมันฝรั่ง) ระหว่างการอบแห้งแบบต่างๆ ได้แก่ การอบแห้งแบบลมร้อน แบบไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่สภาวะความดันต่ำ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยถ่ายภาพตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์มาวิเคราะห์หาค่าแฟรคทัลด้วยเทคนิคการนับกล่อง (Box counting method) และแสดงผลการเปลี่ยนแปลงภายนอกในรูปของร้อยละการหดตัวและความสามารถในการดูดน้ำกลับของตัวอย่าง พบว่าร้อยละการหดตัวและความสามารถในการดูดกลืนน้ำกลับมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวอย่าง ซึ่งแสดงผลในรูปของอัตราค่าแฟรคทัลเปลี่ยนแปลงค่าแฟรคทัล ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งต่างชนิดกันมีการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่ต่างกัน ค่าแฟรคทัลมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผ่านการอบแห้งที่นานขึ้นทั้งแครอท และมันฝรั่ง

Hawaree และคณะ (2009) ได้พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของผักในระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยใช้กะหล่ำปลีเป็นผักตัวอย่างและทำการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเริ่มจากการถ่ายภาพลักษณะพื้นผิวผักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นแปลงภาพต้นแบบให้เป็นค่าระดับสีเทา (Gray scale) แล้วจึงแปลงให้เป็นภาพแบบขาวดำ (Binary image) ด้วยการกำหนดค่า Threshold ที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการเก็บค่าแบบขาวดำของทุกๆ Pixel บนรูปภาพ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวผักในรูปของแฟกเตอร์ความขรุขระ (Roughness factor, R) ผลการศึกษาพบว่าค่า R ของกะหล่ำปลีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นและอุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ซึ่งค่า R สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่าง โดยค่า R สามารถใช้เป็นดัชนีแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของกะหล่ำปลีในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ Chiewchan และคณะ (2010) ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis Technique) เช่นเดียวกับ Hawaree และคณะ (2009) เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าผักที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น ได้แก่ การลวก และการแช่กรดอะซิติก (0.5-1.5% โดยปริมาตร) ในระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้กะหล่ำปลีและต้นหอมเป็นผักตัวอย่าง พบว่าค่า R ที่คำนวณได้สอดคล้องกับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของผักที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นและในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งค่า R ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวผักได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาผลของลักษณะผิวหน้าผักที่สร้างขึ้นต่อความสามารถในการยึดเกาะและการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ระหว่างการอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 *Salmonella* Anatum

3.1.1 การเก็บรักษา

แบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ *Salmonella* Anatum DMST 19600 (จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ประเทศไทย) ทำการถ่ายเชื้อ *S. Anatum* ด้วยเทคนิค Streak plate ลงบนหลอดเอียงในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็น Stock culture และทำการถ่ายเชื้อเดือนละครั้งระหว่างการทดลอง

3.1.2 การเตรียม *S. Anatum*

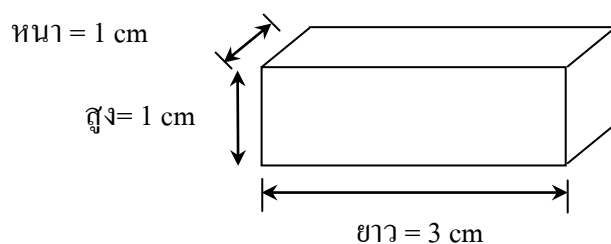
การเตรียม *S. Anatum* สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง นำหลอด Stock culture วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อ 1 ลูป (Loop) จากหลอด Stock culture ลงในอาหาร TSB 100 มิลลิลิตร ที่บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้ *Salmonella* ที่อยู่ในระยะ Stationary phase จากนั้นนำ *Salmonella* culture เจือจางด้วยสารละลายเปปโตน (0.1%) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 มิลลิลิตร ได้กล้าเชื้อที่มีจำนวน *Salmonella* ประมาณ 8 log CFU/mL

3.2 แครอท

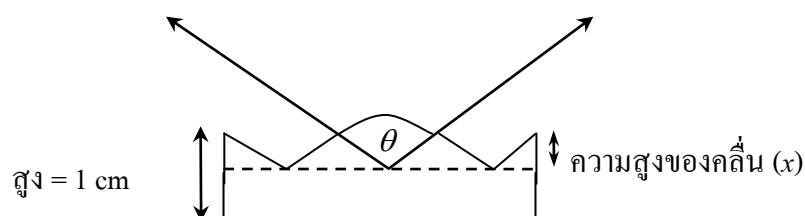
3.2.1 การเตรียมตัวอย่างผัก

ผักตัวอย่างที่ใช้คือ แครอท (*Daucus carota* var. *sativa*) นำมาปอกเปลือกแล้วหั่นเอาเฉพาะส่วนเนื้อ (Cortex) ให้แต่ละชิ้นมีขนาด 3×1×1 เซนติเมตร จากนั้นตัดแครอทด้านหนึ่งให้มีรูปแบบผิวหน้าแตกต่างกัน โดยกำหนดให้รูปแบบผิวหน้าแต่ละชนิดมีจำนวน 3 สันยอดดังรูปที่ 3.1 จากนั้นตัดแครอทแต่ละรูปแบบให้มีค่าความขรุขระต่างๆ กัน โดยวัดในเทอมของค่าความสูงของคลื่น (Wave height; x) เป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 เซนติเมตร ตามลำดับ

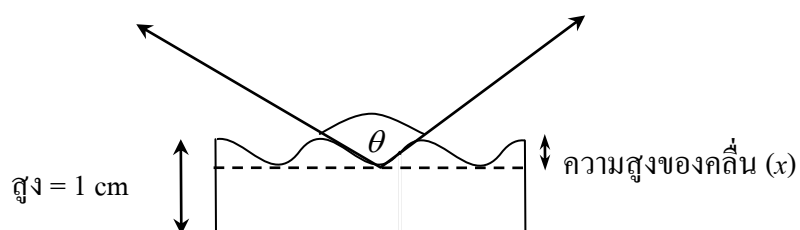
แบบเรียบ (Control)



แบบฟันฉลาม (Shark tooth cut)



แบบคลื่น (Wavy cut)



รูปที่ 3.1 ลักษณะผิวหน้าผักที่สร้างขึ้นแบบต่างๆ

3.2.2 การเตรียมการปนเปื้อนแครอท

นำตัวอย่างแครอทที่เตรียมไว้ (จากข้อ 3.2.1) มาลดจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Normal flora) ที่เกาะบนผิวตัวอย่าง ซึ่งตัดแปลงจากวิธีของ Viswannathan และ Kaur (2001) โดยนำแครอทแช่ในเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 70% (v/v) อัตราส่วนระหว่างแครอทต่อแอลกอฮอล์เท่ากับ 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) นาน 30 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 2 ครั้ง ซึ่งสามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ได้ 2 log CFU/g และไม่พบการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. เริ่มต้น จากนั้นทำการปนเปื้อนแครอทโดยแช่ในกล้าเชื้อ (จากข้อ 3.1.2) โดยให้มีอัตราส่วนผักต่อกล้าเชื้อเป็น 1 ต่อ 20 (กรัมต่อมิลลิลิตร) พร้อมทั้งเขย่าที่ 120

รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที เทกล้ำเชื้อส่วนเกินทิ้ง วางแครอทบนผ้าขาวบางและผึ่งให้แห้งในตู้ปลอดเชื้อเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแครอทใส่ถุงพลาสติกปลอดเชื้อเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ *S. Anatum* เกาะติดที่ผิวหน้าแครอท ซึ่งมีจำนวนเซลล์ประมาณ $6 \log \text{CFU/g}$

3.3 การอบแห้ง

นำตัวอย่างแครอทที่ผ่านการปนเปื้อนด้วย *Salmonella* แล้ว มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Termaks รุ่น TS8000 ประเทศนอร์เวย์ ที่ความเร็วลม 2 เมตร/วินาที โดยก่อนอบแห้งทุกครั้งต้องรอให้อุณหภูมิภายในตู้ถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างการอบแห้งจะวางแครอทน้ำหนักประมาณ 300 กรัม บนถาดที่มีขนาด 30×40 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 ถาด อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในระหว่างการอบแห้งวัดอุณหภูมิผิวหน้าผักของตัวอย่างที่เวลาต่างๆ โดยใช้เครื่องวัดเครื่องวัดอุณหภูมิแบบใช้แสงอินฟราเรด (IR thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 62 Mini ประเทศเยอรมัน เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิวผักที่เวลาต่างๆ

3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่าง

3.4.1 การศึกษาค่าการต้านทานความร้อนของ *S. Anatum* ในระหว่างการอบแห้ง

ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 กรัมใส่ถุงบดผสมปลอดเชื้อ (Stomaching bag) ที่บรรจุสารละลายเปปโตน (0.1%) 50 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องบดผสมอาหาร (Stomacher) ด้วยความเร็วระดับสูงสุด นาน 2 นาที จากนั้นเจือจางสารละลายตัวอย่างให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม ตรวจนับจำนวน *Salmonella* ที่เหลือรอดบนผิวแครอท ด้วยเทคนิค Spread plate บนอาหาร TSA แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นและบันทึกผล ทำการทดลองสภาวะละ 3 ซ้ำ จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Weibull (Peleg, 2000) มาใช้ในการทำนายการลดลงของจำนวนเซลล์แบคทีเรีย ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\log S(t) = -bt^n \quad (1)$$

โดยที่ $S(t)$ คือ จำนวนจุลินทรีย์ที่เหลือรอดในแต่ละเวลา (หรือ N / N_0)
 b คือ Scale factor หมายถึง ค่าคงที่ที่เป็นสมบัติของจุลินทรีย์
 n คือ Shape factor หมายถึง ค่าคงที่ที่แสดงรูปร่างของกราฟ ถ้า n มากกว่า 1 ลักษณะของกราฟที่ได้จะเป็นกราฟโค้งคว่ำ ถ้า n น้อยกว่า 1 จะได้เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งหงายและ ถ้า n เท่ากับ 1 จะได้กราฟเป็นเส้นตรง

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของแครอทตามวิธีของ AOAC (2000) ทำโดยชั่งน้ำหนักกระป๋องอะลูมิเนียมพร้อมฝา (Moisture can) ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และนำตัวอย่างที่เก็บที่เวลาต่างๆ กัน ใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ชั่งไว้แล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเปิดฝาระอบ จากนั้นนำออกจากตู้อบและทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและนำไปอบจนได้น้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณความชื้นจากสมการที่ 5

$$M_d = (w - d) / d \quad (5)$$

โดยที่ M_d คือ ปริมาณความชื้น (มาตรฐานแห้ง)

w คือ มวลของวัสดุ (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง ที่ไม่มีน้ำ (kg)

3.4.3 การวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี

นำตัวอย่างปริมาณ 3-5 กรัม บรรจุใน Cuveltte แล้ววัดค่าด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี ยี่ห้อ Novasina รุ่น LabMaster- a_w ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยก่อนทำการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่าง ต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีระดับต่างๆ ดังนี้ 0.99, 0.97, 0.75, 0.53 และ 0.35

3.4.4 การวัดค่าการหดตัวเชิงปริมาตร

การหดตัวแสดงในรูปของร้อยละของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างเริ่มต้น โดยการหดตัวคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\text{การหดตัวเชิงปริมาตร (\%)} = \frac{V_i - V}{V_i} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของผักที่เวลาการอบแห้งใดๆ

V_i คือ ปริมาตรของผักที่เวลาเริ่มต้น

3.4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าแครอทโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis)

นำตัวอย่างแครอทสดที่ตัดแต่งแล้วตามหัวข้อ 3.2.1 ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (ยี่ห้อ Canon รุ่น EOS 1000D ประเทศญี่ปุ่น) ซึ่งใช้เลนส์ macro ระยะ 60 มิลลิเมตร วางตัวอย่างแครอทให้ด้านที่ตัดแต่ง

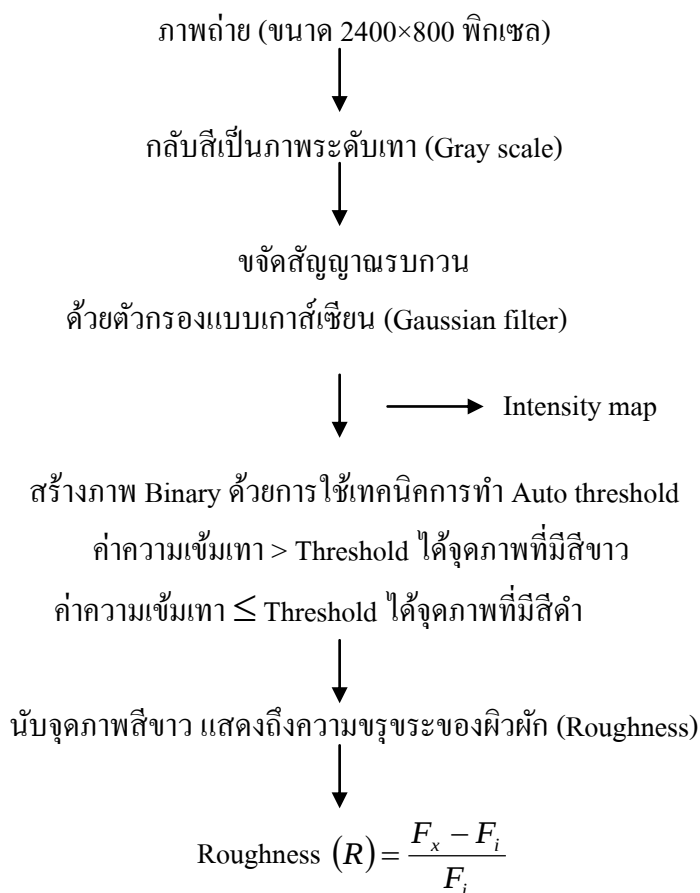
ผิวหน้ารูปแบบต่างๆ ตั้งฉากกับกล้อง เพื่อถ่ายภาพในกล้องถ่ายภาพซึ่งสามารถควบคุมแสงได้ (ยี่ห้อ MedalLight รุ่น DIB 0806 ประเทศฮ่องกง) โดยมีระยะห่างระหว่างกล้องและแคโรทกึ่งที่คือ 15 เซนติเมตร ภาพที่ได้จะถูกบันทึกเป็นไฟล์รูปภาพแบบ BMP (Bitmap image file format) ซึ่งมีความละเอียดของภาพเป็น 3888×2592 pixel จากนั้นนำภาพดังกล่าวมาวิเคราะห์ภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis technique) โดยใช้โปรแกรม Matlab™ Software version R2007b (The Math-Works ประเทศอเมริกา).

การประมวลผลภาพ (รูปที่ 3.2) คัดแปลงจากงานวิจัยของ Hawaree และคณะ (2009) และ Chiewchan และคณะ (2010) โดยนำภาพต้นแบบจากการถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล มาตัด (Crop) ภาพมีขนาด 2400×800 พิกเซล แล้วกลับสีภาพจากภาพแบบดัชนี (Index image) เป็นภาพแบบระดับสีเทา (Gray scale image) เพื่อต้องการทำให้ความเข้มของแม่สีในภาพมีระดับเดียวกัน (Intensity transformation) จะได้ภาพระดับสีเทาที่มีค่าสีตั้งแต่ 0-255 ก่อนนำมากรองสัญญาณรบกวน ด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian filter) เพื่อขจัดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความต่อเนื่องของข้อมูล จากนั้นนำภาพที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนมาทำการวิเคราะห์ต่อด้วยการสร้างภาพแบบขาวดำ (Binary image) โดยใช้เทคนิคการทำ Auto threshold ขั้นตอนนี้ทำเพื่อแยกสิ่งที่ต้องการออกจากพื้นหลังของภาพ (Background) ภาพที่ได้จะถูกปรับให้เป็นภาพที่มีระดับความเข้มเพียง 2 ระดับ คือ 0 และ 1 โดย 0 หมายถึงจุดภาพที่เป็นสีดำ และ 1 หมายถึงจุดภาพที่เป็นสีขาว ซึ่งการกำหนดค่าขาวดำดังกล่าวจะกระทำโดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับค่าระดับสีเทา (Grayscale level) ในแต่ละ Pixel เพื่อให้ภาพที่ได้เป็นภาพแบบขาวดำที่มีค่าสีเท่ากับ 1 และ 0 กล่าวคือหากค่าของ Pixel มีค่าน้อยกว่าค่า Threshold ให้ Pixel มีค่าเท่ากับ 0 และหากค่าของ Pixel มากกว่าค่า Threshold ให้ Pixel นั้นมีค่าเป็น 1 จากนั้นทำการนับจุดสีขาว (มีค่าเท่ากับ 1) ที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงถึงค่าความขรุขระของผิวหน้าแคโรท (Roughness factor) และสามารถคำนวณความขรุขระจากสมการที่ 8

$$\text{Roughness } (R) = \frac{F_x - F_i}{F_i} \quad (8)$$

โดย F_i คือ จำนวนครั้งที่พบค่า Binary เท่ากับ 1 ของตัวอย่างที่มีผิวเรียบ

F_x คือ จำนวนครั้งที่พบค่า Binary เท่ากับ 1 ของตัวอย่างที่ตัดด้วยรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการประมวลผลภาพ (Image Processing)

3.5 การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (General full factorial design) โดยมีปัจจัยคือ ความขรุขระและรูปแบบการตัด โดยที่ปริมาณความชื้น วอเตอร์แอกทีวี่ เปอร์เซ็นต์การหดตัว และค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* เป็นตัวแปรผลตอบ (Response) ใช้ MINITAB® software (version 14, State College, PA) สำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของข้อมูล ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยแสดงข้อมูลผลการทดลองในรูปค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของลักษณะผิวหน้าผักที่สร้างขึ้น ต่อความสามารถในการยึดเกาะ และการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์ระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยเลือก *Salmonella* Anatum เป็นแบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากมักพบการระบาดในประเทศไทย (Bangtrakulnonth และคณะ, 2004) ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของลักษณะผิวหน้าผักและความขรุขระต่อความสามารถในการยึดเกาะของ *Salmonella* และผลของลักษณะผิวหน้าผักและความขรุขระต่อค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ในระหว่างการอบแห้ง

4.1 ผลของลักษณะผิวหน้าผักและความขรุขระต่อความสามารถในการยึดเกาะของ *Salmonella*

ผลการทดลองพบว่าการตัดตัวอย่างแครอทให้มีค่าความขรุขระ (ความสูงของสันคลื่น; x) แตกต่างกัน ส่งผลต่อมุมของการตัด พื้นที่ผิวและปริมาตรของชิ้นแครอท ซึ่งตัวอย่างที่มีค่าความขรุขระสูงจะมีมุมระหว่างสันคลื่นแคบ พื้นที่ผิวมาก และปริมาตรของชิ้นตัวอย่างลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยตัวอย่างแครอทที่มีผิวเรียบ (ค่าความขรุขระ; $x = 0$) มีพื้นที่ผิว 14.12 ± 0.58 ตารางเซนติเมตร ซึ่งหากตัดแครอทให้มีค่าความขรุขระ (x) เพิ่มขึ้นจาก 0.2-0.8 เซนติเมตร จะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจากประมาณ 15 เป็น 18 ตารางเซนติเมตร ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะของ *Salmonella* ดังนั้นจึงตรวจพบ *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวแครอทที่มีความขรุขระสูงขึ้นจากประมาณ 0.2 ถึง 0.7 log CFU/g เมื่อเทียบกับแครอทที่มีผิวเรียบ (ตัวอย่างควบคุม) (ตารางที่ 4.2) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาผลของความขรุขระของผิวหน้าต่อการเหลือรอดของ *Escherichia coli* ที่เกาะบนผิวหน้าของผลไม้ชนิดต่างๆ พบว่า ผลไม้ที่มีพื้นที่ผิวขรุขระมาก ตรวจพบ *E. coli* บนผิวหน้าผลไม้จำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากผิวหน้าอาหารที่ขรุขระมีพื้นที่ผิวมากให้แบคทีเรียยึดเกาะ นอกจากนี้ผลการศึกษายังเกิดจากค่ามุมของการตัดอาจส่งผลต่อการยึดเกาะของ *Salmonella* กล่าวคือ มุมที่แคบลง และลึกขึ้นทำให้ในระหว่างการปั่นเปื้อนเป็นแหล่งสะสมของจำนวน *Salmonella* ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงพื้นที่ผิว และปริมาตรของแครอทที่มีลักษณะผิวหน้าที่แตกต่างกัน

รูปแบบการตัด	ค่าความขรุขระ (x; เซนติเมตร)	มุมของ การตัด	พื้นที่ผิว (cm ²)	ปริมาตร (cm ³)
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)	0	180°	14.12±0.58 ^a	3.09±0.05 ^a
พื้นฉลาม (Shark tooth cut)	0.2	114°	15.12±0.42 ^b	2.75±0.03 ^b
	0.4	95°	15.90±0.35 ^c	2.48±0.06 ^c
	0.6	60°	16.64±0.66 ^{cd}	2.36±0.09 ^c
	0.8	50°	17.99±1.04 ^d	2.10±0.11 ^d
คลื่น (Wavy cut)	0.2	113°	15.26±0.36 ^b	2.71±0.08 ^b
	0.4	93°	15.87±0.31 ^{bc}	2.52±0.10 ^c
	0.6	59°	16.59±0.58 ^c	2.33±0.13 ^{cd}
	0.8	49°	17.95±0.74 ^d	2.03±0.10 ^d

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของรูปแบบการตัดที่ต่างกัน คือ การตัดแบบพื้นฉลาม (Shark tooth cut) และการตัดแบบคลื่น (Wavy cut) พบว่ารูปแบบการตัดไม่มีผลต่อมุมของการตัด (θ) พื้นที่ผิวและปริมาตรของชิ้นแครอทอย่างมีนัยสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าความขรุขระเท่ากับ 0.2 เซนติเมตร ตัวอย่างที่ตัดแบบพื้นฉลามมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 15.12 ± 0.42 ตารางเซนติเมตร ในขณะที่ตัวอย่างที่ตัดแบบคลื่นมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 15.26 ± 0.36 ตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.1) ดังนั้นจึงตรวจพบจำนวน *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวแครอทในกรณีของการตัดแบบพื้นฉลามเท่ากับ $6.10 \pm 0.18 \log \text{CFU/g}$ และการตัดแบบคลื่นเท่ากับ $6.15 \pm 0.09 \log \text{CFU/g}$ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน (ตารางที่ 4.2)

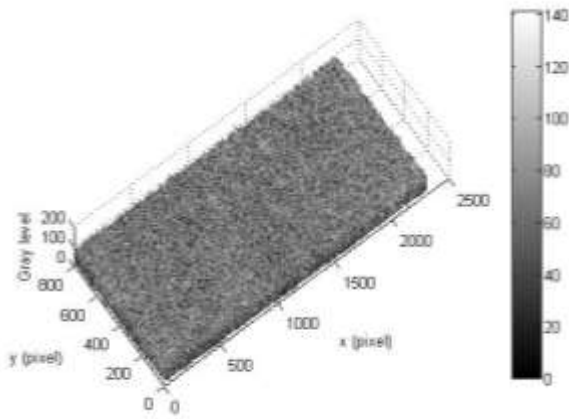
สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image analysis) เริ่มต้นจากการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลแล้วนำภาพต้นแบบที่มีขนาด $3888 \times 2592 \text{ pixel}$ มาตัดภาพเอาพื้นหลังออกให้เหลือเฉพาะชิ้นแครอทโดยภาพจะมีขนาดเท่ากันทุกภาพคือ $2400 \times 800 \text{ พิกเซล}$ นำภาพถ่ายดังกล่าวมาแปลงเป็นค่า Gray scale จะสามารถเขียนกราฟ Intensity map ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ซึ่งกราฟ Intensity map สามารถใช้เป็นตัวแทนภาพถ่ายได้เป็นอย่างดี กล่าวคือลักษณะผิวหน้าของชิ้นแครอทสด (ตัวอย่างควบคุม) มีผิวเรียบเมื่อเทียบกับลักษณะผิวหน้าแครอทที่ตัดด้วยรูปแบบพื้นฉลาม (รูปที่ 4.1) และรูปแบบคลื่น (รูปที่ 4.2) โดยแครอทที่ตัดให้มีความขรุขระสูงขึ้น (x สูง) จะมีร่องลึกขึ้น ซึ่งจากกราฟ Intensity map จะเห็นความขรุขระได้ชัดเจนขึ้น มีความแตกต่างของระดับสีที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น เมื่อแครอทมีความขรุขระเพิ่มขึ้น โดยบริเวณยอดแหลมของพื้นฉลาม

หรือสันคลื่น จะมีสีอ่อนลงหากตัวอย่างมีค่า x สูง ในทางตรงกันข้ามบริเวณร่องจะมีสีเข้มขึ้น แสดงให้เห็นความแตกต่างชัดเจนมากขึ้นหากตัวอย่างมีค่า x สูงขึ้น จากนั้นทำการแปลงภาพเป็นภาพขาว-ดำ โดยใช้เทคนิคการทำ Auto threshold ซึ่งภาพถ่ายขาว-ดำที่แสดงผิวหน้าของแคโรทสดที่มีความขรุขระแตกต่างกันของตัวอย่างรูปแบบพื้นฉลามและแบบคลื่นดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จากนั้นนับจำนวนจุดขาว ซึ่งแสดงถึงความขรุขระของผิวผัก โดยการอธิบายการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าแคโรทได้อธิบายในรูปของค่า R (Roughness factor) ซึ่งอยู่ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า R เทียบกับค่าเริ่มต้น (ตัวอย่างควบคุมที่มีพื้นผิวเรียบ) ซึ่งค่าดังกล่าวจะสูงขึ้น เมื่อแคโรทมีค่าความขรุขระสูงขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่ามุมระหว่างสันคลื่นลดลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ปริมาตรของแคโรทลดลง และจำนวน *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวแคโรทมากขึ้น โดยรูปแบบการตัดทั้งสองรูปแบบไม่มีผลต่อค่า R อย่างมีนัยสำคัญ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

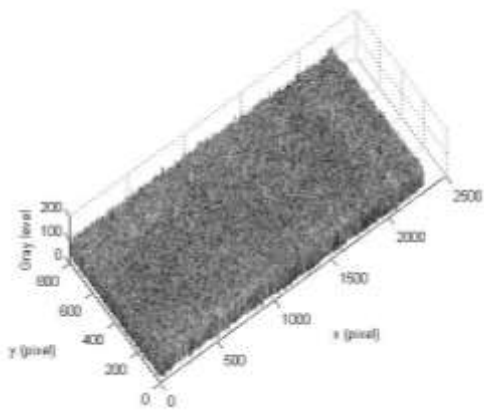
ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวน *Salmonella* บนแคโรทที่มีลักษณะผิวหน้าที่แตกต่างกัน

รูปแบบการตัด	ค่าความขรุขระ (x ; เซนติเมตร)	ค่า R (Roughness factor)	จำนวน <i>Salmonella</i> (log CFU/g)
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)	0	0.00 ± 0.00^a	5.87 ± 0.13^a
พื้นฉลาม (Shark tooth cut)	0.2	0.16 ± 0.03^b	6.10 ± 0.18^{ab}
	0.4	0.36 ± 0.11^{bc}	6.27 ± 0.79^{abc}
	0.6	0.64 ± 0.12^c	6.43 ± 0.53^{abc}
	0.8	0.94 ± 0.09^d	6.56 ± 0.11^c
คลื่น (Wavy cut)	0.2	0.15 ± 0.09^b	6.15 ± 0.09^b
	0.4	0.42 ± 0.10^{bc}	6.18 ± 0.15^b
	0.6	0.54 ± 0.09^c	6.31 ± 0.18^{bc}
	0.8	0.96 ± 0.06^d	6.44 ± 0.08^c

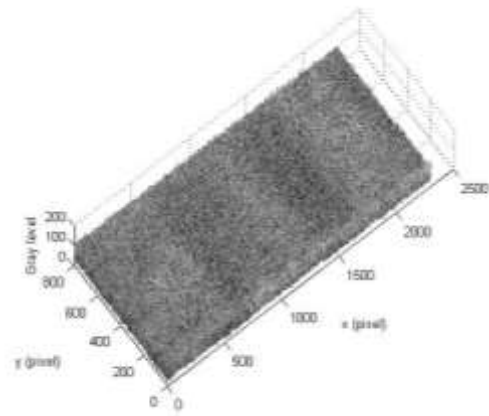
หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



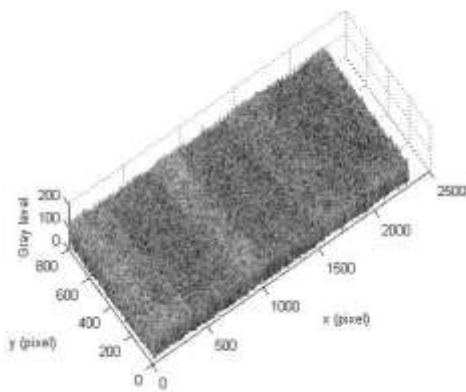
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)



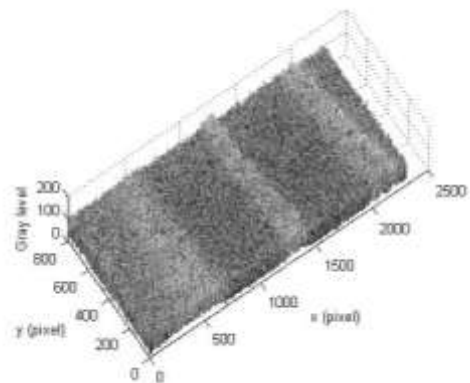
พื้นฉลอม $x = 0.2$



พื้นฉลอม $x = 0.4$

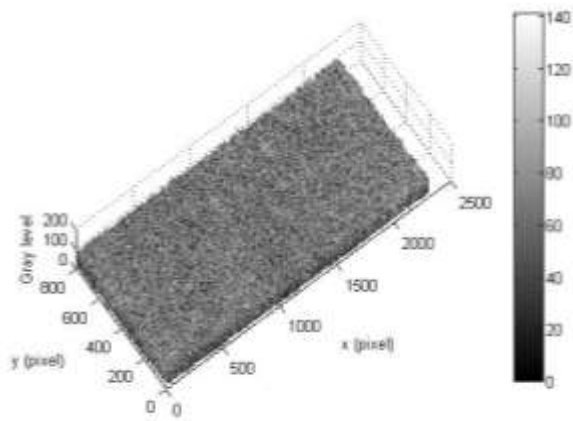


พื้นฉลอม $x = 0.6$

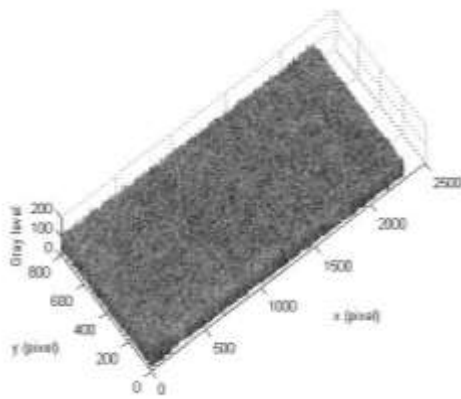


พื้นฉลอม $x = 0.8$

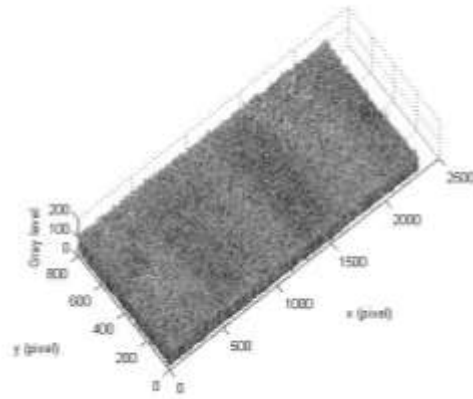
รูปที่ 4.1 Intensity map แสดงลักษณะพื้นผิวเรขาคณิตแบบพื้นฉลอมก่อนการอบแห้ง



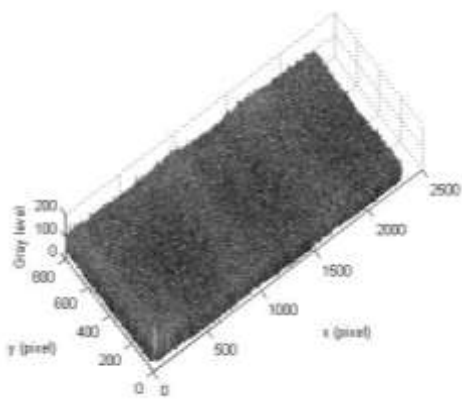
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)



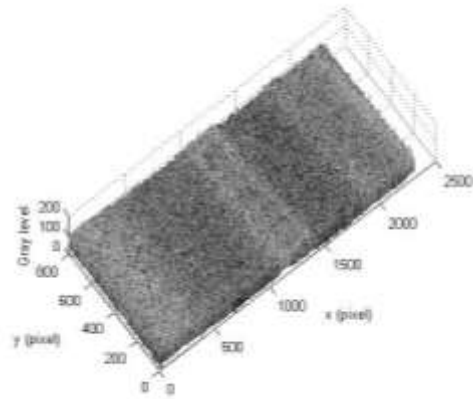
คลื่น $x = 0.2$



คลื่น $x = 0.4$



คลื่น $x = 0.6$



คลื่น $x = 0.8$

รูปที่ 4.2 Intensity map แสดงลักษณะพื้นผิวเรขาคณิตแบบคลื่นก่อนการอบแห้ง



หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม; $x = 0$)



พื้นฉลอม $x = 0.2$



พื้นฉลอม $x = 0.4$



พื้นฉลอม $x = 0.6$



พื้นฉลอม $x = 0.8$

รูปที่ 4.3 ภาพขาว-ดำ (Binary image) แสดงลักษณะพื้นผิวเรขาคณิตรูปแบบพื้นฉลอมที่ความขรุขระต่างๆ



หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม; $x = 0$)



คลื่น $x = 0.2$



คลื่น $x = 0.4$



คลื่น $x = 0.6$



คลื่น $x = 0.8$

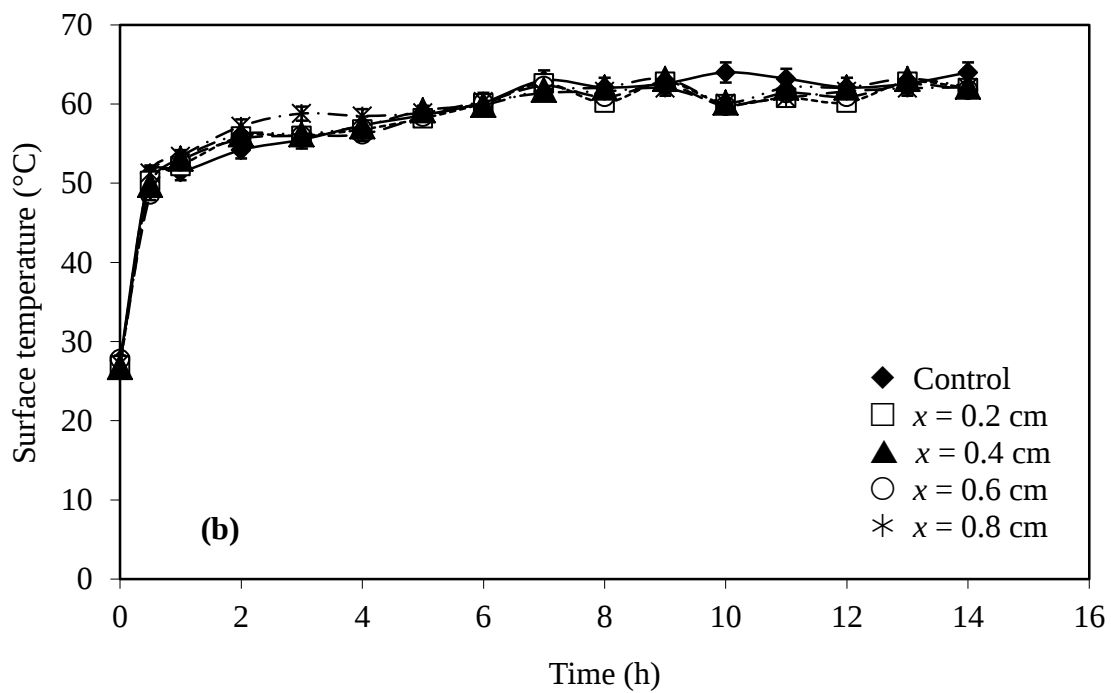
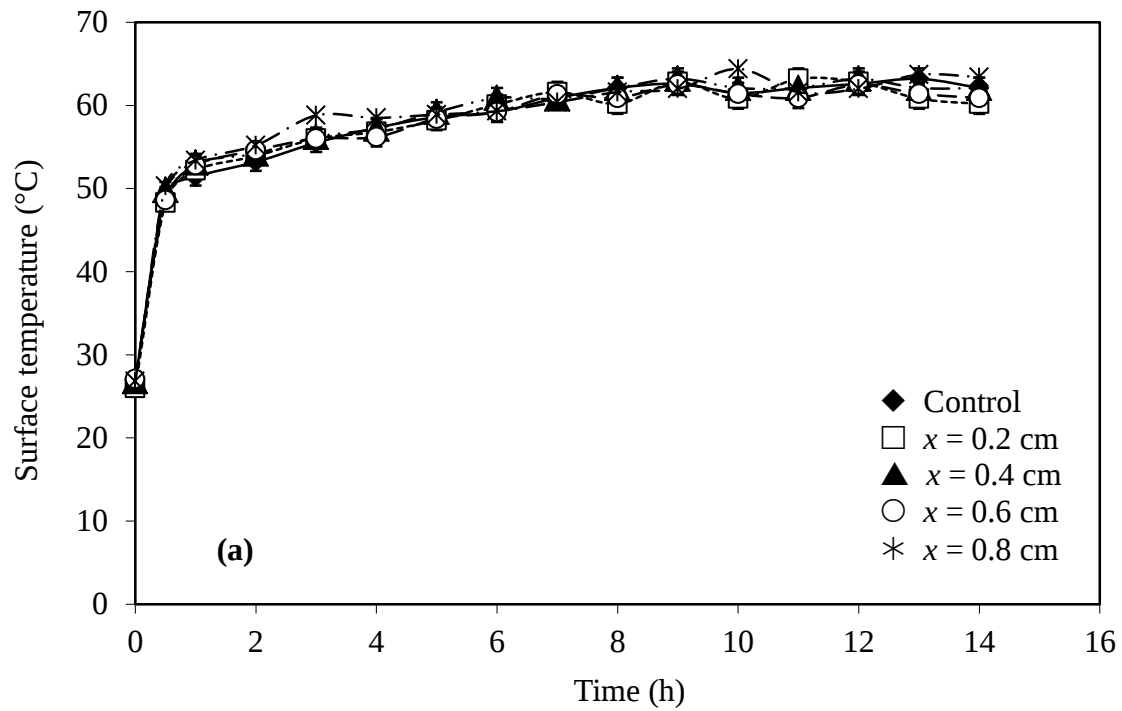
รูปที่ 4.4 ภาพขาว-ดำ (Binary image) แสดงลักษณะพื้นผิวเรขาคณิตแบบคลื่นที่ความขรุขระต่างๆ

4.2 ผลของลักษณะผิวหน้าผักและความขรุขระต่อค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ระหว่างการอบแห้ง

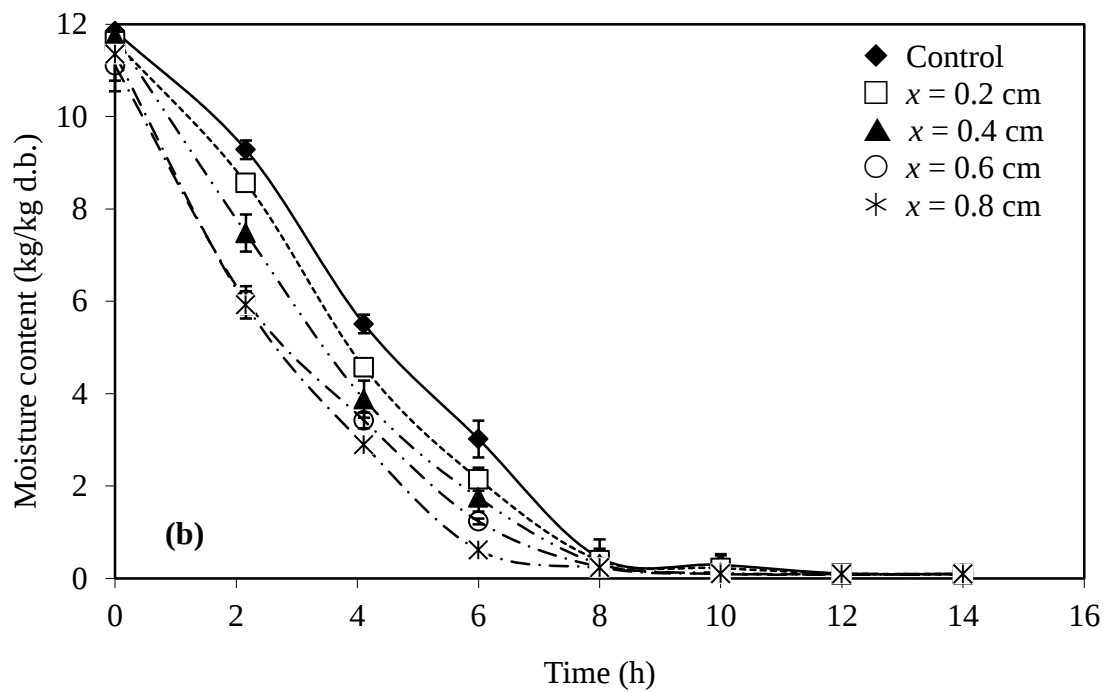
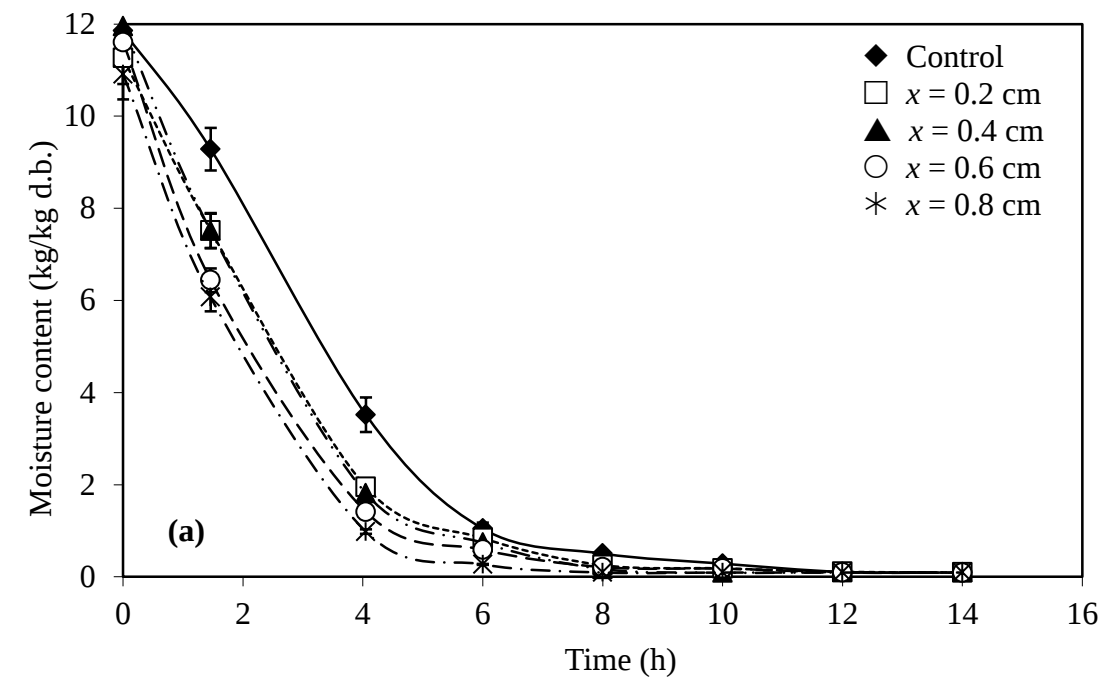
รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิที่ผิวของแครอทในระหว่างการอบแห้ง แครอทมีอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนทำการอบแห้งประมาณ 27 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของแครอทในระหว่างการอบแห้งมีรูปแบบเดียวกันทุกตัวอย่าง คืออุณหภูมิที่ผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรกของการอบแห้ง จากนั้นอุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิอบแห้ง (59-61 องศาเซลเซียส) ภายในเวลา 10 ชั่วโมง โดยผลของความขรุขระ (ค่า R) และรูปแบบการตัดที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของแครอทในระหว่างการอบแห้ง

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตีของตัวอย่างแครอทที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าแครอทสดมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 11.62 ± 0.45 กิโลกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักฐานแห้ง (หรือ 0.91 ± 0.03 กิโลกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักฐานเปียก) และมีค่าวอเตอร์แอคติวิตี เริ่มต้นประมาณ 0.98-0.99 จากการทดลองพบว่า ลักษณะการลดลงของปริมาณความชื้นของแครอทสดที่มีรูปแบบการตัดต่างกัน 3 รูปแบบ และค่าความขรุขระ 0.2-0.8 เซนติเมตร มีลักษณะการลดลงเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน คือปริมาณความชื้นของแครอทลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง จากนั้นปริมาณความชื้นลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ซึ่งเท่ากับ 0.096 ± 0.022 กิโลกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยค่าดังกล่าวสัมพันธ์กับการลดลงของค่าวอเตอร์แอคติวิตีในระหว่างการอบแห้ง กล่าวคือค่าวอเตอร์แอคติวิตีคงที่ในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่ผิวของอาหารยังมีอยู่มาก จากนั้นค่าวอเตอร์แอคติวิตีลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงท้ายของการอบแห้ง (ประมาณ 12 ชั่วโมงของการอบแห้ง) โดยทุกตัวอย่างแครอททั้งที่มีรูปแบบการตัดและความขรุขระที่แตกต่างกันเมื่อสิ้นสุดการอบแห้งมีค่าวอเตอร์แอคติวิตีประมาณ 0.37-0.40

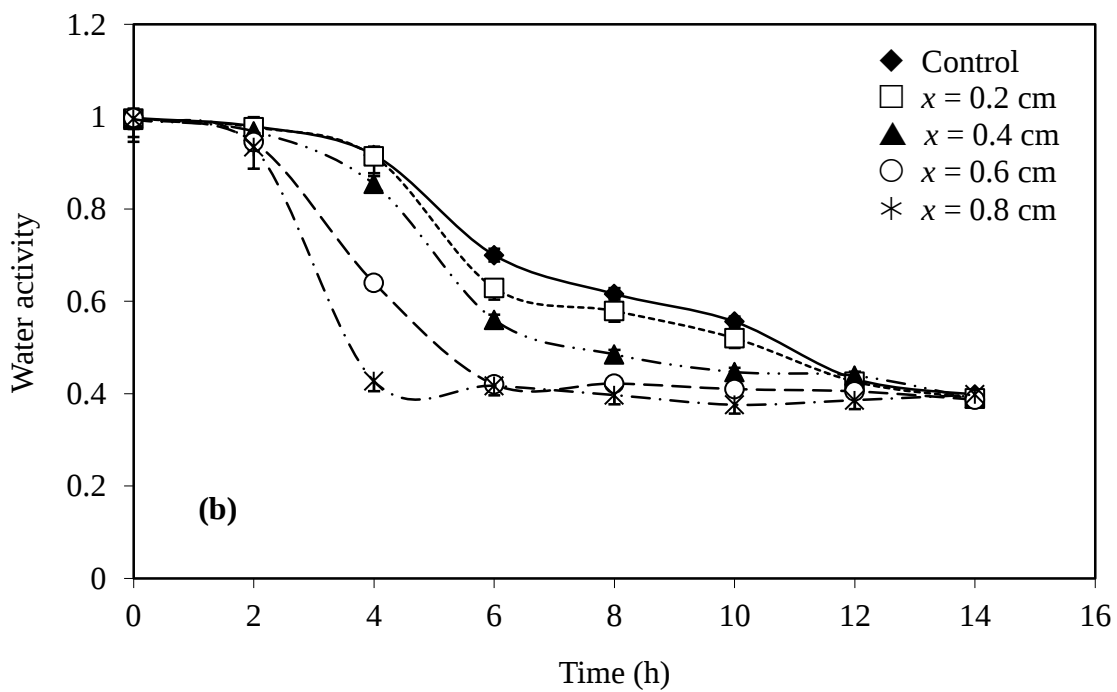
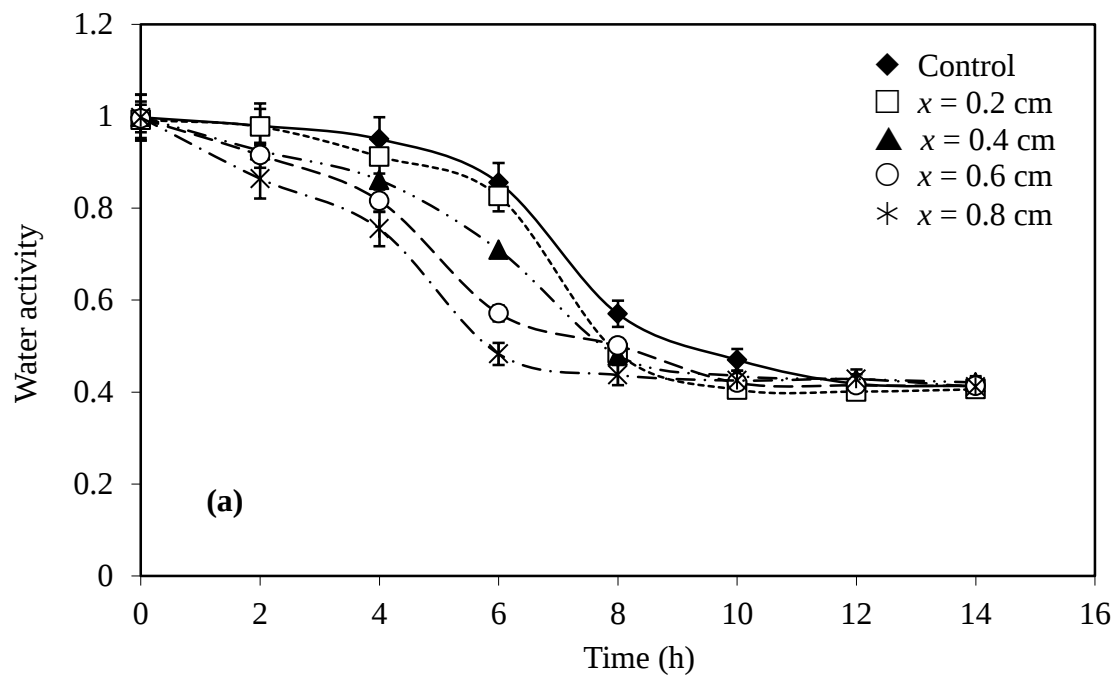
สำหรับผลของรูปแบบการตัดแครอทต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในระหว่างการอบแห้ง พบว่าที่ระดับความขรุขระเดียวกันแครอทที่มีผิวหน้าแบบพื้นลามและแบบคลื่นมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเหมือนกัน และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม่แตกต่างกัน เนื่องจากตัวอย่างทั้ง 2 รูปแบบมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสความร้อน และปริมาตรของชิ้นตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำจากชิ้นตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งไม่แตกต่างกัน สำหรับผลของค่าความขรุขระพบว่า แครอทที่มีค่าความขรุขระสูงจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น โดยผลของความขรุขระดังกล่าวจะเห็นอย่างชัดเจนในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากตัวอย่างที่มีค่าความขรุขระสูงจะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสความร้อนมาก และปริมาตรของชิ้นตัวอย่างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีค่าความขรุขระต่ำกว่า โดยผลของความขรุขระจะหมดไปเมื่อตัวอย่างเข้าสู่ปริมาณความชื้นสมดุล (หลังการอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง)



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของแครอทที่มีลักษณะผิวหน้า แบบพื้นฉลาม (a) และแบบคลื่น (b) ในระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส



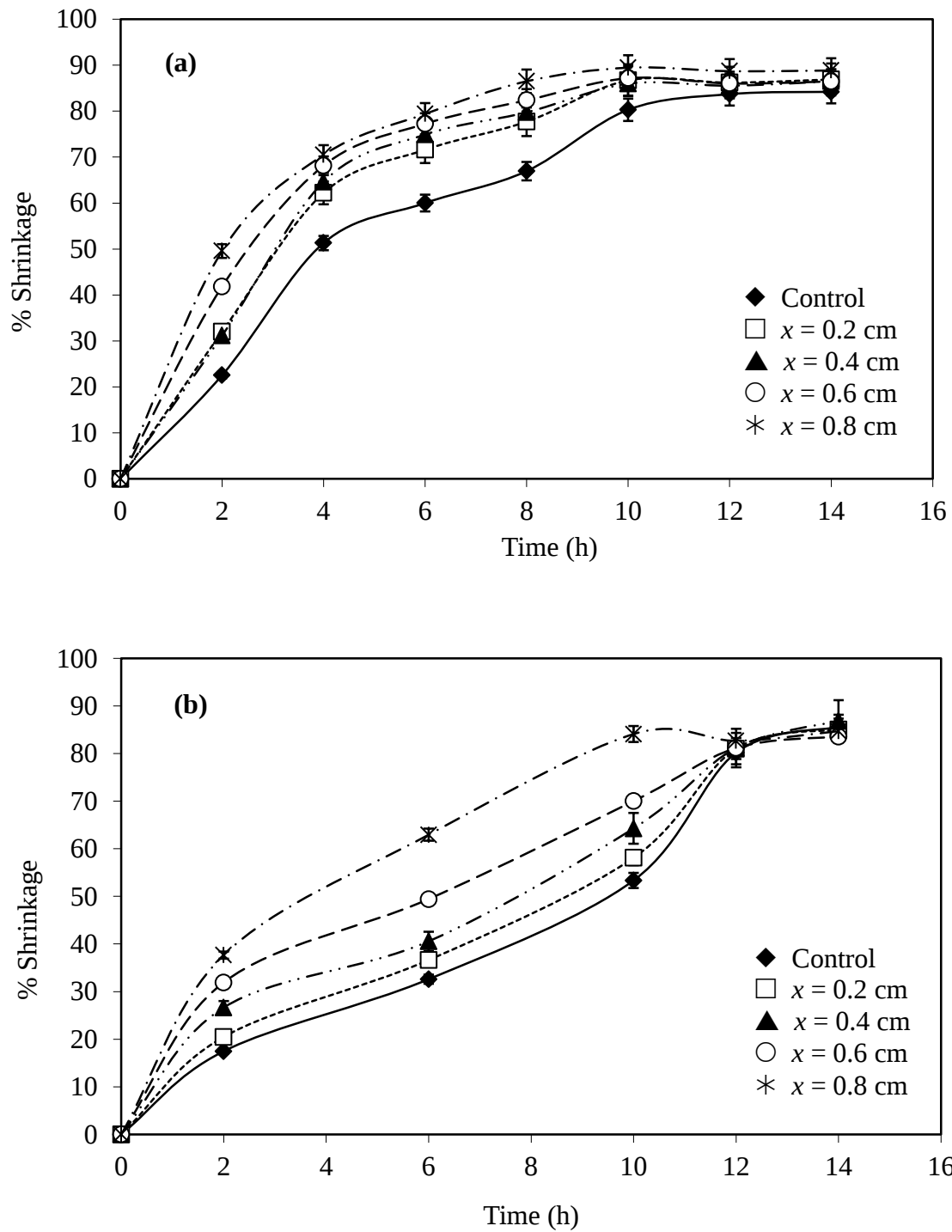
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของแครอทที่มีลักษณะผิวหน้า แบบพื้นกลม (a) และแบบคลื่น (b) ในระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของแครอทที่มีลักษณะผิวหน้า แบบพื้นฉลาม (a) และแบบคลื่น (b) ในระหว่างการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 แสดงการหดตัวของตัวอย่างแครอทที่มีลักษณะผิวหน้าแตกต่างกันในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแครอททุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น โดยในช่วงแรกของการอบแห้งแครอทเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว โดยอัตราการหดตัวลดลงเกือบคงที่ จากนั้นเปอร์เซ็นต์การหดตัวจะลดลงจนกระทั่งคงที่ในที่สุด ซึ่งสอดคล้องกันกับการลดลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่างในระหว่างอบแห้ง เมื่อพิจารณาผลของค่าความขรุขระพบว่า ตัวอย่างที่มีความขรุขระแตกต่างกันจะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง ซึ่งในช่วงดังกล่าวปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ยังมีอยู่มาก กล่าวคือเมื่อตัวอย่างมีค่าความขรุขระเพิ่มขึ้นจะมีอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากแครอทที่มีค่าความขรุขระสูงมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับความร้อนมากขึ้น และมีปริมาตรน้อยลง ทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้น (Moisture gradient) ณ จุดต่างๆ ภายในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น จึงเกิดความเค้นภายใน (Internal stress) มากขึ้น ส่งผลให้การหดตัวของตัวอย่างสูงตามไปด้วย (Kerdpi boon และคณะ, 2007) หลังจากอบแห้งเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง จนกระทั่งถึงสิ้นสุดการอบแห้ง พบว่าแครอททุกตัวอย่างไม่หดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sjöholm และ Gekas (1995) และ Mulet และคณะ (2000) ที่รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวเชิงปริมาตรของตัวอย่างที่มีรูปร่างต่างกันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างนั้น

สำหรับผลของรูปแบบการตัด (แบบพื้นฉลาม และแบบคลื่น) ต่อการหดตัวเชิงปริมาตรของตัวอย่างแครอท พบว่าตัวอย่างที่มีรูปแบบการตัดแบบคลื่นมีอัตราการหดตัวในระหว่างการอบแห้งช้ากว่าตัวอย่างที่มีรูปแบบการตัดแบบพื้นฉลาม โดยผลของค่าความขรุขระทั้งสองรูปแบบการตัดจะเด่นชัดเมื่อค่าความขรุขระสูงขึ้น ความแตกต่างดังกล่าวสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง ซึ่งเป็นช่วงที่ตัวอย่างยังมีน้ำอยู่มากและการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามหลังการอบแห้ง 10 ชั่วโมงผ่านไปรูปแบบการตัดแครอทไม่มีผลต่อการหดตัวเชิงปริมาตรของแครอทอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสิ้นสุดการอบแห้งแครอททุกอย่างมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ แครอทมีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวประมาณ 88-89% ทุกตัวอย่าง



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวของเกรอที่มีลักษณะผิวหน้า แบบพื้นฉลาม (a) และแบบคลื่น (b) ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

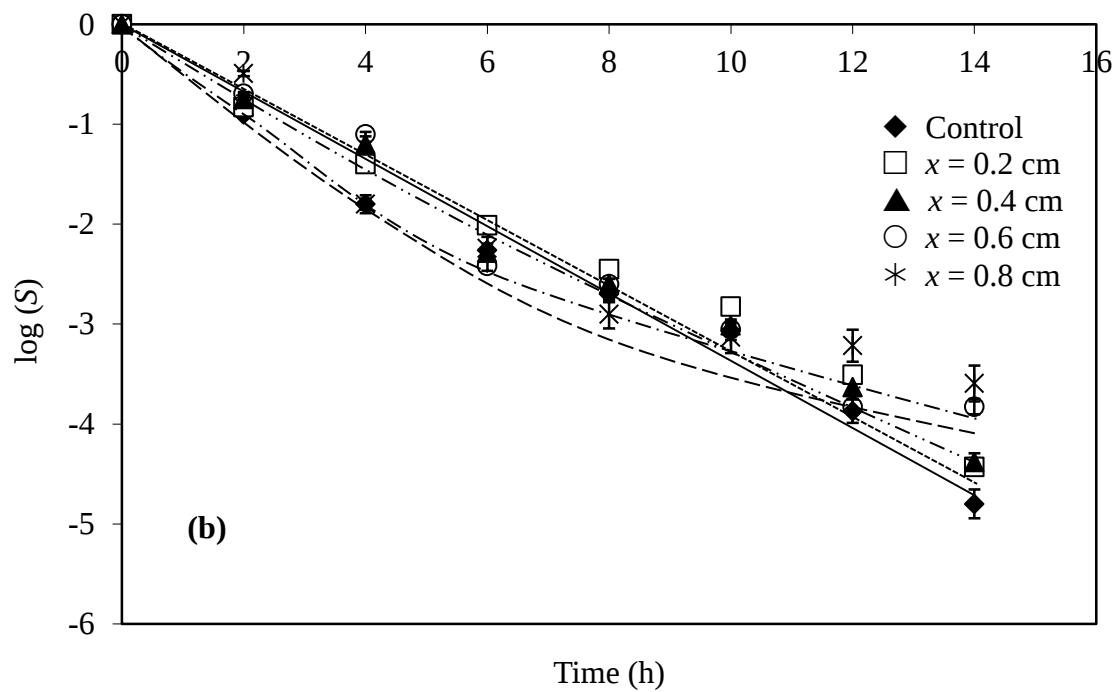
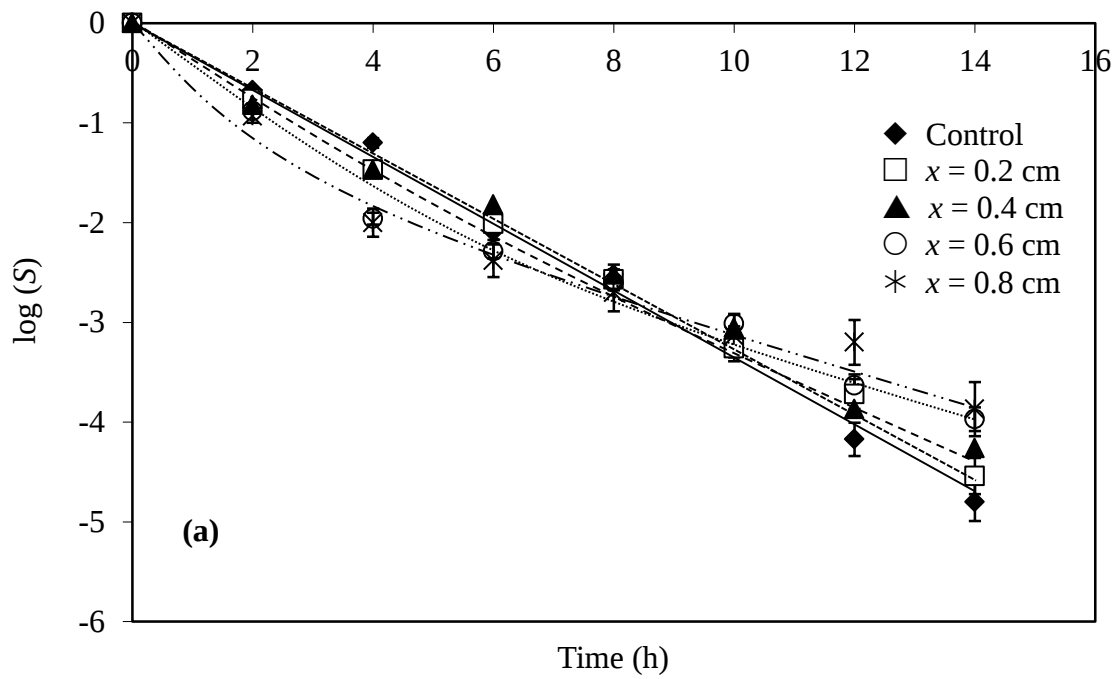
การศึกษากราฟการรอดชีวิตของ *S. Anatum* ที่ปนเปื้อนในแครอทที่มีลักษณะผิวหน้าต่างกันระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.9) พบว่าอัตราการลดลงของ *Salmonella* จะค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้น เพื่อให้ทราบการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ที่สภาวะการทดลองต่างๆ จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Weibull (Peleg, 2000) มาใช้ในการทำนายการลดลงของจำนวนเซลล์แบคทีเรียคือ *Salmonella Anatum* แสดงในสมการที่ 1

$$\log S = -bt^n \quad (1)$$

เมื่อ $\log S$ คือ $\log$ ของอัตราการรอดชีวิตที่เวลาใดๆ
 b, n คือ scale และ shape parameters

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Weibull แบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายการรอดชีวิตของ *S. Anatum* ได้ดี (R^2 0.96-0.99) เส้นกราฟการรอดชีวิตของ *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนแครอทที่มีผิวหน้าเรียบมีค่า n เท่ากับ 1.08 แสดงถึงกราฟการรอดชีวิตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ (Downward concavity) ซึ่งเกิดเนื่องจากการสะสมความเสียหายของเซลล์ที่อ่อนแอ ดังนั้นอัตราการถูกทำลายจึงขึ้นกับเวลาในการอบแห้ง (Peleg, 2000) ส่วนแครอทที่มีพื้นผิวขรุขระทั้งที่มีรูปแบบการตัดแบบฟันฉลามและแบบคลื่น มีค่า n น้อยกว่า 1 ในทุกๆ ค่าความขรุขระ กราฟการรอดชีวิตจะแสดงลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย (Upward concavity) นั่นคือค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์สูงขึ้น โดยแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์แต่ละเซลล์มีค่าการต้านทานความร้อนไม่เท่ากัน จุลินทรีย์ที่อ่อนแอกว่าถูกทำลายได้ง่ายกว่าเซลล์ที่แข็งแรง (Peleg, 1999; Avsaroglu และคณะ, 2006)

สำหรับผลของค่าความขรุขระ พบว่าเมื่อค่าความขรุขระสูงขึ้นทำให้ค่า n มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าการต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์สูงขึ้น โดยจำนวน *Salmonella* ลดลงค่อนข้างคงที่ในช่วงแรกของการอบแห้ง จากนั้นอัตราการลดลงของ *Salmonella* ช้าลงในช่วงท้ายของการอบแห้ง ซึ่งพบได้ชัดเจนขึ้นในกรณีตัวอย่างแครอทที่มีค่าความขรุขระสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะบนผิวแครอทแต่ละเซลล์มีค่าการต้านทานความร้อนไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากตัวอย่างที่มีค่าความขรุขระสูงจะมีระยะทางความลึกจากชั้นยอดมาก มุมแหลมขึ้น ดังนั้นในระหว่างการอบแห้งจึงเกิดการหดตัวสูงเนื่องจากการสูญเสียไอน้ำภายในเซลล์อาหาร ทำให้บริเวณดังกล่าวอาจสามารถป้องกันจุลินทรีย์จากการสัมผัสความร้อนโดยตรงในระหว่างการอบแห้งได้ โดยการตัดแครอทให้มีรูปแบบที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าการต้านทานความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 การเหลือรอดของ *Salmonella* บนผิวหนังแคโรทที่มีลักษณะผิวหนัง แบบพื้นฉลาม (a) และแบบคลื่น (b) ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาการประมาณค่าการต้านทานความร้อน แสดงในเทอมของเวลาที่ใช้ในการลดจำนวน *Salmonella* ลง $4 \log_{10}$ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าแครอทที่มีผิวหน้าขรุขระ จะมีค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* สูงกว่าแครอทที่มีผิวหน้าเรียบ โดยผลของค่าความขรุขระต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีค่าความขรุขระสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ค่าความขรุขระสูงตัวอย่างมีพื้นที่ผิวมาก และมีปริมาตรน้อยลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีผิวหน้าเรียบ (แสดงค่าดังตารางที่ 4.1) จึงทำให้ตัวอย่างดังกล่าวมีอัตราการอบแห้งสูง การลดลงของค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีของตัวอย่างเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อตัวอย่างมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำ *Salmonella* จึงมีค่าการต้านทานความร้อนสูง เนื่องจาก *Salmonella* สามารถปรับตัวให้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำได้ (Goepfert และคณะ, 1970; Mattick และคณะ, 2001) โดยอัตราการอบแห้งของแครอทรูปแบบการตัดแบบฟันฉลามและแบบคลื่นไม่แตกต่างกันที่ค่าความขรุขระเดียวกัน จึงมีค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะผิวหน้าผักที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* แต่การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกติวิตีในระหว่างการอบแห้งน่าจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella*

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ b , n และค่าเวลาที่ใช้ในการลดจำนวน *S. Anatum* ในแครอทที่มีผิวหน้าแตกต่างกัน $4 \log_{10}$ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ลักษณะการตัด	ค่าความ ขรุขระ (x ; เซนติเมตร)	b^*	n^*	เวลาที่ใช้ในการลดจำนวน <i>S. Anatum</i> $4 \log_{10}$ (h)	R^2
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)	0	0.27 ± 0.07^a	1.08 ± 0.08^c	11.73 ± 0.43^d	0.96
ฟันฉลาม (Shark tooth cut)	0.2	0.38 ± 0.04^b	0.95 ± 0.04^a	11.91 ± 0.15^d	0.97
	0.4	0.40 ± 0.10^{bc}	0.91 ± 0.08^a	12.56 ± 0.23^c	0.96
	0.6	0.44 ± 0.07^{bc}	0.84 ± 0.09^a	13.84 ± 0.29^a	0.96
	0.8	0.46 ± 0.14^{bc}	0.81 ± 0.15^a	13.97 ± 0.33^a	0.98
คลื่น (Wavy cut)	0.2	0.36 ± 0.07^b	0.97 ± 0.04^{ab}	11.97 ± 0.29^d	0.99
	0.4	0.42 ± 0.03^b	0.90 ± 0.09^{ab}	12.23 ± 0.11^{cd}	0.99
	0.6	0.45 ± 0.03^{bc}	0.85 ± 0.04^a	13.07 ± 0.37^b	0.98
	0.8	0.47 ± 0.06^{bc}	0.82 ± 0.06^a	13.61 ± 0.28^a	0.98

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* ตัวอักษร b และ n คือ scale และ shape parameters จากสมการของ Weibull

ตามมาตรฐานผัก ผลไม้แช่แข็ง (Chinese National Standard, 1985) ความชื้นสุดท้ายต้องน้อยกว่า 0.1 กิโลกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง หรือ 0.09 กิโลกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักเปียก และค่าออกเตอร์แอกติวิตีต้องน้อยกว่า 0.6 ในกรณีนี้ตัวอย่างแครอทที่มีความชื้นสมดุลเท่ากับ 0.096 กิโลกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าออกเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.4 หลังการอบแห้งนาน 12 ชั่วโมง (แสดงในตารางที่ 4.4) จากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่า *Salmonella* สามารถเจริญอยู่ได้ในอาหารที่มีค่าออกเตอร์แอกติวิตีประมาณ 0.4 (Archer และคณะ, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่า เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งคือ การอบแห้งแครอทนาน 12 ชั่วโมงตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 0.09 กิโลกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ยังตรวจพบ *Salmonella* เหลือรอดบนผิวของแครอท จึงสรุปได้ว่าการอบแห้งเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายไม่สามารถทำให้อาหารปลอดภัยได้หากตัวอย่างมีการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์เริ่มต้นสูง ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตที่ดีให้ถูกต้องตามหลัก GMP (Good Manufacturing Practice) เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์จะที่ปนเปื้อนกับอาหารเริ่มต้น

ตารางที่ 4.4 ค่าความชื้นสุดท้าย, a_w และค่าการลดลงของ *Salmonella* บนแครอทอบแห้งที่มีผิวหน้าแตกต่างกัน

ลักษณะการตัด	ค่าความ ขรุขระ (x ; เซนติเมตร)	ความชื้นสุดท้าย (kg/kg d.b.)	a_w	เวลาในการ อบแห้ง (h)	การลดลงของ <i>Salmonella</i> * (log CFU/g)
หน้าตัดเรียบ (ตัวอย่างควบคุม)	0	0.096±0.022 ^a	0.41±0.02 ^a	12.7±0.9 ^a	4.20±0.22 ^a
ฟันฉลาม (Shark tooth cut)	0.2	0.091±0.005 ^{ab}	0.39±0.01 ^a	12.1±0.4 ^a	4.05±0.09 ^{ab}
	0.4	0.087±0.007 ^{bc}	0.40±0.02 ^a	11.4±0.2 ^b	3.66±0.11 ^{cd}
	0.6	0.093±0.005 ^{ab}	0.41±0.02 ^a	11.0±0.2 ^{bc}	3.33±0.09 ^{def}
	0.8	0.092±0.007 ^{ab}	0.39±0.01 ^a	10.6±0.1 ^c	3.19±0.10 ^{ef}
คลื่น (Wavy cut)	0.2	0.089±0.014 ^{abc}	0.39±0.01 ^a	12.3±0.7 ^{ab}	4.11±0.13 ^{ab}
	0.4	0.094±0.007 ^{ab}	0.38±0.02 ^a	11.6±0.2 ^{ab}	3.81±0.07 ^c
	0.6	0.092±0.010 ^{abc}	0.40±0.02 ^a	11.0±0.1 ^{bc}	3.45±0.09 ^{cd}
	0.8	0.091±0.004 ^{bc}	0.38±0.01 ^a	10.7±0.3 ^c	3.28±0.08 ^{ef}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

* ค่าที่ได้สามารถคำนวณจากค่า b และ n จากตารางที่ 4.3

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของลักษณะผิวหน้าผักที่สร้างขึ้น (โดยใช้แครอทเป็นวัสดุตัวอย่าง) ต่อความสามารถในการยึดเกาะและการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* ระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างแครอทที่มีค่าความขรุขระ (x) สูงจะมีพื้นที่ผิวสำหรับให้ *Salmonella* ยึดเกาะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พบจำนวน *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวหน้าสูงกว่าผักที่มีผิวหน้าเรียบ (ค่า $x = 0$) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของแครอทที่มีความขรุขระ สามารถอธิบายค่าได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่พัฒนาขึ้น พบว่าตัวอย่างแครอทที่มีค่า Relative roughness (R) สูงจะมีพื้นที่ผิวสูง สอดคล้องกับการตรวจพบ *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวนานขึ้นสูงกว่าแครอทที่มีค่า Relative roughness ต่ำกว่า

ในระหว่างการอบแห้งแครอท พบว่าทุกตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และการหดตัวเชิงปริมาณอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง จากนั้นค่อยๆ เข้าสู่สภาวะสมดุล โดยตัวอย่างแครอทที่มีค่าความขรุขระสูงมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างรวดเร็ว แต่พบว่าตัวอย่างนั้นมีค่าการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* สูงกว่าตัวอย่างที่มีค่าความขรุขระต่ำ แสดงให้เห็นว่าผักที่มีผิวหน้าขรุขระจะมีความลึกของสันยอดมาก และมีมุมที่แหลมขึ้นจึงเกิดการหดตัวสูงในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งอาจสามารถป้องกัน *Salmonella* จากการได้รับความร้อนโดยตรงได้ และเมื่อพิจารณาค่าความขรุขระเดียวกัน พบว่าลักษณะผิวหน้าตัวอย่างแครอทที่ต่างกัน (แบบพื้นฉลาม และแบบคลื่น) ไม่มีผลต่อการต้านทานความร้อนของ *Salmonella* อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการอบแห้งตัวอย่างที่มีผิวหน้าขรุขระยากต่อการทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมา ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ 9%) พบว่า การอบแห้งแครอทที่มีลักษณะผิวหน้าต่างๆ ไม่สามารถทำลาย *Salmonella* ที่ยึดเกาะบนผิวดังกล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งอาหารที่มีผิวขรุขระเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้บริโภคจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและควบคุมการผลิตเป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพ และการเหลือรอดของจุลินทรีย์บนผิวหน้าตัวอย่างอาหารในระหว่างการอบแห้งนับเป็นงานที่น่าสนใจ และมีประโยชน์ในการนำไปใช้เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการนำตัวอย่างที่มีความแตกต่างกัน เช่น โหระพา สะระแหน่ มาเป็นวัตถุดิบในการศึกษา จะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2537, กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร (Food Processing), โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 9, 244-260.
- มลญรัตน์ นาน่วม, 2548, ผลของกรดอะซิติกร่วมกับอุณหภูมิต่อการยับยั้งการเจริญของ *Salmonella* Anatum และปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากเอนไซม์ในกะหล่ำปลีตัดแต่งพร้อมบริโภค, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 77 หน้า.
- Adams, M.R. and Moss, M.O., 2002, Food Microbiology, 2nd ed., The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 479 p.
- Aguilera, J.M. and Stanley, D.W., 1999, Microstructural Principles of Food Processing and Engineering, Aspen Publishers, Gaithersburg, Maryland, pp. 1-70.
- Aguilera, J.M., 2003, Drying and Dried Products under the Microscope, Food Science and Technology International, Vol. 9, pp. 137-143.
- AOAC., 2000, Official methods of analysis. 15th ed. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Archer, J., Jervis, E.T., Bird, J., and Gaze J.E., 1998, Heat Resistance of *Salmonella* Weltevreden in Low-Moisture Environments, Journal of Food Protection, Vol. 61, pp. 969-973.
- Avsaroglu, M.D., Buzrul, S., Alpas, H., Akcelik, M. and Bozoglu, F., 2006, Use of the Weibull Model for *Lactococcal Bacteriophage* Inactivation by High Hydrostatic Pressure, International Journal of Food Microbiology, Vol. 108, pp. 78-83.
- Bangtrakulnonth, A., Pornreongwong, S., Pulsrikarn, C., Sawanpanyalert, P., Hendriksen, R.S., Lo Fo Wong, D.M.A. and Aararestrup, F.M., 2004, *Salmonella* Serovars from Humans and other Sources in Thailand, 1993-2002. Emerging Infectious Diseases, Vol. 10, pp. 131-136.
- Behrsing, J., Jaeger, J., Horlock, F., Kita, N., Franz, P. and Premier, R., 2003, Survival of *Listeria innocua*, *Salmonella* Salford and *Escherichia coli* on the Surface of Fruit with Inedible Skins. Postharvest Biology and Technology, Vol. 29, pp. 249-256.
- Bell, C. and Kyriakides, A., 2002, *Salmonella*: a Practical Approach to the Organism and Its Control in Food, Blackwell Science Ltd., Malden, 330 p.

- Beuchat, L.R. and Scouten, A.J., 2002, Combination Effects of Water Activity, Temperature and Chemical Treatments on the Survival of *Salmonella* and *Escherichia coli* O157:H7 on Alfafa Seeds, *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 92, pp. 382-395.
- Canovas, G.V.B. and Mercado, H.V., 1996, *Dehydration of Foods*, Chapman and Hall, New York, USA, pp. 229-263.
- Casadei, M.A., De Matos, R.E., Harrison, S.T. and Gaze, J.E., 1998, Heat Resistance of *Listeria monocytogenes* in Dairy Products as Affected by the Growth Medium, *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 84, pp. 234-239.
- Chiewchan, N., Pakdee, W. and Devahastin, S., 2007, Effect of Water Activity on Thermal Resistance of *Salmonella* Krefeld in Liquid Medium and on Rawhide Surface, *International Journal of Food Microbiology*, Vol. 114, pp. 43-49.
- Chiewchan, N., Prapthraiphetch, C. and Devahastin, S., 2010, Effect of Pretreatment on Surface Topographical Features of Vegetables during Drying, *Journal of Food Engineering*, Vol. 101, pp. 41-48.
- Chinese National Standard, 1985, *Dehydrated Fruits and Vegetables*. General No. 1345. Data base of National Food Institute, Bangkok, Thailand.
- Dalen, G.V., 2004, Determination of the Size Distribution and Percentage of Broken Kernels of Rice using Flatbed Scanning and Image Analysis, *Food Research International*, Vol. 37, pp. 51-58.
- Derrickson-Tharringtona, E., Kendalla, P.A. and Sofosb, J.N., 2005, Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 during Storage or Drying of Apple Slices Pretreated with Acidic Solutions, *International Journal of Food Microbiology*, Vol. 99, pp. 79-89.
- Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S. and Mujumdar, A.S., 2004, A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material, *Drying Technology*, Vol. 22, pp. 1845-1867.
- Doyle, M.E. and Mazzotta, A.S., 2000, Review of Studies on the Thermal Resistance of *Salmonella*, *Journal of Food Protection*, Vol. 63, pp. 779-795.
- Doymaz I., 2004, Convective Air Drying Characteristics of Thin Layer Carrots, *Journal of Food Engineering*, Vol. 61, pp. 359-364.
- Escartin, E.F., Ayala, A.C. and Lozano, J.S., 1989, Survival and Growth of *Salmonella* and *Shigella* on Sliced Fresh Fruit, *Journal of Food Protection*, Vol. 52, pp. 471-483.

- Felsenfeld, O. and Young, V.M., 1945, The Viability of *Salmonella* on Artificially Contaminated Vegetables, p. 224. Cited by ICMSF. Microorganism in Foods : Microbiological Specification of Food. Chapman & Hall, London. Vol. 5, 513 p.
- Francis, G.A., Thomas, C. and O'Beirne, D., 1999, The Microbiological Safety of Minimally Processed Vegetables, International Journal of Food Microbiology, Vol. 34, pp. 1-22.
- Francis, G.A. and O'Beirne, D., 2002, Effects of Vegetable Type and Antimicrobial Dipping on Survival and Growth of *Listeria innocua* and *E. coli*, International Journal of Food Science and Technology, Vol. 37, pp. 711-718.
- Frazier, W.C and Westhoff, D.C., 1988, Food Microbiology, 4th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 85-130.
- Fernandez, L., Castellero, C. and Aguilera, J.M., 2005, Application of Image Analysis to Dehydration of Apple Discs, Journal of Food Engineering, Vol. 67, pp. 185-193.
- Goepfert, J.M. and Biggie, R.A., 1968, Heat Resistance of *Salmonella* Typhimurium and *Salmonella* Senftenberg 775W in Milk Chocolate, Applied Microbiology, Vol. 16, pp. 1939-1940.
- Goepfert, J.M., Iskander, I.K. and Amundson, C.H., 1970, Relation of the Heat Resistance of *Salmonella* to the Water Activity of the Environment, Applied microbiology, Vol. 19, pp. 429-433.
- Golden, D.A., Rhodehamel, E.J. and Kautter, D.A., 1993, Growth of *Salmonella* spp. in Cantalope, Watermelon and Melon, Journal of Food Protection, Vol. 56, pp. 194-196.
- Hartel, R.W. and Heldman, D.R., 1997, Principles of Food Processing, Chapman & Hall Publishing, Connecticut, New York, USA, pp. 118-119.
- Hatamipour, M.S. and Mowla, D., 2002, Shrinkage of Carrots during Drying in an Inert Medium Fluidized Bed, Journal of Food Engineering, Vol. 55, pp. 247-252.
- Hawaree, N., Chiewchan, N. and Devahastin, S., 2009, Effects of Drying Temperature and Surface Characteristics of Vegetable on the Survival of *Salmonella*, Journal of Food Science, Vol. 74, pp. E16-E22.
- Hourner, K.J. and Anagnostopoulos, G.D., 1997, Effect of Water Activity on Heat Survival of *Staphyococcus aureus*, *Salmonella* Typhimurium and *Salmonella* Seftenberg, Journal of Applied Bacteriology, Vol. 38, pp. 9-17.

- Jay, J.M., 2000, High-Temperature Food Preservation and Characteristic of Thermophilic Specifications of Food Pathogens, Modern Food Microbiology, 6th ed., Aspen Publication, Gaithersburg, pp. 341-356.
- Juneja, V.K. and Eblen, B.S., 2000, Heat Inactivation of *Salmonella* Typhimurium DT104 in Beef as Affected by Fat Content, Letters in Applied Microbiology, Vol. 68, pp. 241-246.
- Jung, Y.S. and Beuchat, L.R., 1999, Survival of Multidrug-Resistant *Salmonella* Typhimurium DT104 in Egg Powders as Affected by Water Activity and Temperature, International Journal of Food Microbiology, Vol. 49, pp. 1-8.
- Juven, B.J., Cox, N.A. and Bailey, J.S., 1984, Survival of *Salmonella* in Dry Food and Feed, Journal of Food Protection, Vol. 47, pp. 445-448.
- Khraisheh, M.A.M., McMinn, W.A.M. and Magee, T.R.A., 2004, Quality and Structural Changes in Starchy Foods during Microwave and Convective Drying, Food Research International, Vol. 37, pp. 497-503.
- Kerdpiroon, S., Devahastin, S. and Kerr, W.L., 2007, Comparative Fractal Characterization of Physical Changes of Different Food Products during Drying, Journal of Food Engineering, Vol. 83, pp. 570-580.
- Mattick, K.L., Jorgensen, F., Wang, P., Pound, J., Vandeven, M.H., Ward, L.R., Legan, J.D., Lappin-Scott, H.M. and Humphrey, T.J., 2001, Effect of Challenge Temperature and Solute Type on Heat Tolerance of *Salmonella* serovars at Low Water Activity, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 67, pp. 4128-4136.
- Mayor, L. and Sereno, A.M., 2004, Modelling Shrinkage during Convective Drying of Food Materials: A Review, Journal of Food Engineering, Vol. 61, pp. 373-386.
- McDonough, F.E. and Hargrove, R.E., 1968, Heat Resistance of *Salmonella* in Dried Milk, Journal of Dairy Science, Vol. 10, pp. 587-591.
- McKellar, R.C. and Lu, X., 2004, Modeling Microbial Responses in Food, CRC Press, Washington, D.C., 343 p.
- Micheli, F., 2001, Pectin Methylesterase: Cell Wall Enzymes with Important Roles in Plant Physiology, Trends in Plant Science, Vol. 6, pp. 414-419.
- Moats, W.A., Dabbah, R. and Edwards, V.M., 1971, Survival of *Salmonella* Anatum Heated in Various Media, Applied Microbiology, Vol. 21, pp. 476-481.

- Mulet, A., Garcia-Reverter, J., Bon, J. and Berna, A., 2000, Effect of Shape on Potato and Cauliflower Shrinkage during Drying, *Drying Technology*, Vol. 18, pp. 1201-1219.
- Murphy, W.A., Duncan, L.K., Johnson, E.R., Davis, M.D. and Marcy, J.A., 2002, Thermal Inactivation of *Salmonella* Senftenberg and *Listeria innocua* in Beef/Turkey Blended Patties Cooked via Fryer and/or Air Convection Oven, *Journal of Food Science*, Vol. 67, pp. 1879-1885.
- Nieto, A.B., Salvatori, D.M., Castro, M.A. and Alzamora, S.M., 2004, Structural Changes in Apples Tissue during Glucose and Sucrose Osmotic Dehydration: Shrinkage, Porosity, Density and Microscopic Features, *Journal of Food Engineering*, Vol. 61, pp. 269-278.
- Ochoa, M.R., Kessler, A.G., Pirone, B.N., Marquez, C.A. and DeMichelis, A., 2002a, Volume and Areas Shrinkage during Dehydration of Whole Sour Cherry Fruits (*Prunus cerasus* L.), *Drying Technology*, Vol. 20, pp. 147-156.
- Ochoa, M.R., Kessler, A.G., Pirone, B.N., Marquez, C.A. and DeMichelis, A., 2002b, Shrinkage during Convective Drying of Whole Rose Hip (*Rosa Rubiginosa* L.) Fruits, *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, Vol. 35, pp. 400-406.
- Oliveira, K., Oliveira, T., Teixeira, P., Azeredo, J., Henriques, M. and Oliveira, R., 2006, Comparison of the Adhesion Ability of Different *Salmonella* Enteritidis Serotypes to Materials Used in Kitchens, *Journal of Food Protection*, Vol. 69, pp. 2352-2356.
- Panyawong, S. and Devahastin, S., 2007, Determination of Deformation of a Food Product Undergoing Different Drying Methods and Conditions via Evolution of a Shape Factor, *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, pp. 151-161.
- Peleg, M., 1999, On Calculating Sterility in Thermal and Non-thermal Preservation Methods, *Food Research International*, Vol. 32, pp. 271-278.
- Peleg, M., 2000, Microbial Survival Curve: The Reality of Flat Shoulders and Absolute Thermal Death Times, *Food Research International*, Vol. 33, pp. 531-538.
- Peleg, M. and Normand, M.D., 1985, Characterization of the Ruggedness of Instant Coffee Particle Shape by Natural Fractals, *Journal of Food Science*, Vol. 50, pp. 829-831.
- Piagentini, A.M., Pirovani, M.E., Guemes, D.R., Di Pentima, J.H. and Tessi, M.A., 1997, Survival and Growth of *Salmonella* Hadar on Minimally Processed Cabbage as Influenced by Storage Abuse Conditions, *Journal of Food Science*, Vol. 62, pp. 616-631.
- Quevedo, R. and Aguilera, J.M., 2004, Characterization of Food Surface Roughness Using the Glistening Points Method, *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp. 1-7.

- Rahman, M.S., 2002, Microbial Survival Curves-the Reality of the Flat Shoulders and Absolute Thermal Death Times, *Food Research International*, Vol. 33, pp. 531-538.
- Rahman, M.S., Guizanib, N. and Al-Ruzeikib, M.H., 2004, *D*- and *z*-values of Microflora in Tuna Mince during Moist- and Dry-heating, *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie*, Vol. 37, pp. 93-98.
- Ratti, C., 1994, Shrinkage during Drying of Foodstuffs, *Journal of Food Engineering*, Vol. 23, pp. 91-105.
- Ramos, I.N., Brandao, T.R.S. and Silva, C.L.M., 2003, Structural Changes during Air Drying of Fruits and Vegetables, *Food Science Technology International*, Vol. 9, pp. 201-206.
- Russ, J.C., 2005, *Image Analysis of Food Structure*, CRC Press, Florida, USA, pp. 1-359.
- Sjoholm, I. and Gekas, V., 1995, Apple Shrinkage upon Drying, *Journal of Food Engineering*, Vol. 25, pp. 123-130.
- Suvarnakuta, P., Devahastin, S., and Mujumdar, A.S., 2005, Drying Kinetics and β -Carotene Degradation in Carrot Undergoing Different Drying Processes, *Journal of Food Science*, Vol. 70, pp. 520-526.
- Szczesniak, A.S., 1983, Physical Properties of Foods: What They Are and Their Relation to Other Food Properties, In *Physical Properties of Foods*, Peleg, M. and Bagley, E.W., (eds.), Avi Publishing Company, Westport, Connecticut, USA, pp. 1-41.
- Thunberg, R.L., Tran, T.T., Bennett, R.W., Matthews, R.N. and Belay, N., 2002, Microbial Evaluation of Selected Fresh Produce Obtained at Retail Markets, *Journal of Food Protection*, Vol. 65, pp. 677-682.
- Wang, N. and Brennan, J.G., 1995, Changes in Structure, Density and Porosity of Potato during Dehydration, *Journal of Food Engineering*, Vol. 24, pp. 61-76.
- Wang, H., Feng, H., Liang, W., Luo, Y. and Malyarchuk, V., 2009, Effect of Surface Roughness on Retention and Removal of *Escherichia coli* O157:H7 on Surfaces of Selected Fruits, *Journal of Food Science*, Vol. 74, pp. E8-E15.
- Vadlamudi, S., 2004, Effect of Sanitizer Treatments on *Salmonella enterica* Serotype Poona on the Surface of Cantaloupe and Cell Transfer to the Internal Tissue during Cutting Practices, Master of Science Thesis, Food Science and Technology, Faculty of Science, Texas A&M University, pp. 1-98.

- Vijayakumar, C. and Wolf-Hall, C.E., 2002a, Minimum Bacteriostatic and Bactericidal Concentrations of Household Sanitizers for *Escherichia coli* Strains in Tryptic Soy Broth, Food Microbiology, Vol. 19, pp. 383-388.
- Vijayakumar, C. and Wolf-Hall, C.E., 2002b, Research Note: Evaluation of Household sanitizers for reducing levels of *Escherichia coli* on iceberg lettuce, Journal of Food protection, Vol. 65, pp. 1646-1650.
- Viswanathan, P. and Kaur, R., 2001, Prevalence and Growth of Pathogens on Salad Vegetables, Fruit and Sprouts, International Journal of Hygiene and Environmental Health, Vol. 203, pp. 205-213.
- Yoon, Y., Stopforth, J.D., Kendall, P.A. and Sofos, J.N., 2004, Inactivation of *Salmonella* during Drying and Storage of Roma Tomatoes Exposed to Predrying Treatments including Peeling, Blanching, and Dipping in Organic Acid Solutions, Journal of Food Protection, Vol. 67, pp. 1344-1352.
- Yousef, E.A. and Juneja, V.K., 2000, Microbial Stress Adaptation and Food Safety, CRC Press, pp. 1-25.
- Yu, K., Newman, M.C., Archbold, D.D. and Hamilton-Kemp, T.R., 2001, Survival of *Escherichia coli* O157:H7 on Strawberry Fruit and Reduction of the Pathogen Population by Chemical Agents, Journal of Food Protection, Vol. 64, pp. 1334-1340.
- Zhuang, R.Y., Beuchat, L.R. and Angulo, F.J., 1995, Fate of *Salmonella* Montevideo on and in Raw Tomatoes as Affected by Temperature and Treatment with Chlorine, Applied Environmental Microbiology, Vol. 61, pp. 2127-2131.