

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่ของงานวิจัย

แครอท (*Daucus carota* L.) เป็นพืชที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ แครอทเป็นพืชที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็ง และอุดมด้วยคุณค่าทางอาหาร โดยเป็นแหล่งของเบตาแคโรทีน ซึ่งร่างกายสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ได้ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยวิตามินชนิดอื่น เช่นวิตามิน บี ซี และ อี และแร่ธาตุต่างๆ มากมาย แครอทสามารถนำมารับประทานทั้งในลักษณะดิบ เช่น สลัดผัก และผ่านการปรุงสุก เช่น ซุป หรือใส่ในอาหารต่างๆ

ปัจจุบันมีรายงานว่า การบริโภคแครอทที่ผ่านการให้ความร้อนมีประโยชน์มากกว่าแครอทดิบ การบริโภคแครอทดิบหรือไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ร่างกายสามารถเปลี่ยนเบตาแคโรทีนเป็นวิตามินเอ ได้น้อยกว่าร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับแครอทที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งการนำแครอทไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนเช่นการต้มก่อนรับประทานสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับเบตาแคโรทีนได้มากกว่าร้อยละ 50 (<http://website.lineone.net>) นอกจากนี้ Talcott และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ของแครอทบรรจุกระป๋อง พบว่าแครอทบรรจุกระป๋องที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จะมีสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 34 เมื่อเปรียบเทียบกับแครอทดิบ

เนื่องจากแครอทที่ผ่านความร้อนเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางอาหารสูง จึงได้มีแนวคิดที่นำแครอทมาแปรรูปเป็นอาหารเหลวสำหรับผู้ป่วยหรืออาหารสำหรับเด็กอ่อน ในขั้นตอนการให้ความร้อนสถานะในการให้ความร้อนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในกระบวนการผลิตโดยทั่วไป ผู้ผลิตจะทำการให้ความร้อนแก่แครอทเป็นระยะเวลานาน เพื่อให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มและง่ายต่อการย่อยภายในร่างกาย ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจทำให้เกิดผลเสีย เช่นสิ้นเปลืองพลังงาน และผลิตภัณฑ์ได้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร ดังนั้นการปรับปรุงเทคโนโลยีของสถานะการต้มระหว่างการให้ความร้อนจึงมีความสำคัญ ความเข้าใจในตัวแปรต่างๆ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนมีความสำคัญต่อการออกแบบและปรับปรุงสถานะการให้ความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปรเกี่ยวกับอุณหภูมิและความดันในระหว่างการให้ความร้อนจะสามารถช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของแครอทที่เกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในกระบวนการให้ความร้อนแครอทกับความแข็งแรงเนื้อสัมผัสของแครอท พบว่าเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของแครอทมีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นโค้ง (Bourne, 1987; Vu และคณะ, 2004; Smout และคณะ, 2005) นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทพบว่า การให้ความร้อนแครอทที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ ความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสลดลงด้วยอัตราที่เร็วกว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ Ramesh และคณะ (1998) และ Bourne (1987) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส พบว่าจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทภายใต้การให้ความร้อนที่สภาวะดังกล่าว มีลักษณะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง 2 ช่วง โดยที่ช่วงแรกความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสจะลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมาค่าความแข็งแรงมีการลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงที่สอง

จากการศึกษาอิทธิพลของการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทพบว่า การเปลี่ยนแปลงสีของแครอทมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคโรทีนอยด์ (Simon, 1985) นอกจากนี้ระยะเวลาและอุณหภูมิของกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทบรรจุกระป๋อง (Abbanemacro และ Ramaswamy, 1994) Howard และคณะ (1996) พบว่าการให้ความร้อนแครอทที่อุณหภูมิสูงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์โดยผลิตภัณฑ์เปลี่ยนเป็นสีคล้ำ (ค่าความสว่างลดลง) ค่าสีแดงลดลง และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ในคุณสมบัติด้านอื่นนั้น Rehman และคณะ (2003) ศึกษาผลของกระบวนการให้ความร้อนที่มีต่อเส้นใยของแครอท โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟเปรียบเทียบกับ กระบวนการให้ความร้อนโดยทั่วไปและการใช้หม้อแรงดัน โดยต้มแครอทเป็นเวลา 10 นาที พบว่าการให้ความร้อนแครอทโดยใช้หม้อความดันส่งผลให้แครอทมีปริมาณเส้นใยลดลงเมื่อเทียบกับกระบวนการให้ความร้อนโดยทั่วไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแครอทอุณหภูมิ ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ การศึกษาคุณสมบัติของแครอทที่ต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ (อุณหภูมิระหว่างกระบวนการต้มเกิน 100 องศาเซลเซียส) จึงเป็นอีกแนวทางการศึกษาหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการปรับปรุงเทคโนโลยีการให้ความร้อน เนื่องจากการต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง แต่ใช้เวลาในการต้มไม่นาน (High Temperature Short Time) คาดว่าส่งผลให้รักษาคุณภาพต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับศึกษาคุณสมบัติของอาหารที่สภาวะการต้มเหนือจุดเดือดปกติ อีกทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพของ

แครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถอธิบายผลของความดันและอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านเคมีและกายภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลง เนื้อสัมผัส สีของแครอท เส้นใยอาหาร และคุณค่าทางโภชนาการ เช่น แคโรทีน ในระหว่างการผลิตอาหารเหลวและยังสามารถใช้ในการปรับปรุง กระบวนการแปรรูปแครอทเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แปลกใหม่และตรงต่อความต้องการของผู้ผลิต และผู้บริโภค ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ ระบบควบคุมและประมวลผล เพื่อใช้ในการศึกษาคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของแครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ
2. เพื่อศึกษาและอธิบายผลของความดันและอุณหภูมิ ที่มีต่อคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของแครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของแครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ
2. พัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมและติดตามผลโดยใช้โปรแกรม Lab VIEW 7.1
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้น ความแข็งเนื้อสัมผัส โครงสร้าง สี และแคโรทีนของแครอทที่ถูกต้มภายใต้อุณหภูมิในการต้ม 80, 100, 120, 140 องศาเซลเซียส และความดันภายในหม้อต้ม 0, 2, 4, 6 บาร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของแครอท และสามารถอธิบายผลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของแครอท ที่ถูกต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือด
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงเทคโนโลยีการแปรรูปแครอท เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงต่อความต้องการของผู้ผลิต และผู้บริโภค

บทที่ 2 ทฤษฎีและสำรวจเอกสาร

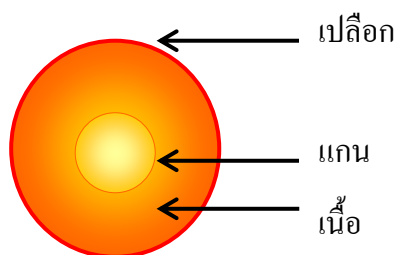
2.1 แครอท (Carrot)

แครอท (*Daucus carota* L.) เป็นพืชกินหัวที่ได้รับความนิยมในการปลูกและบริโภคเป็นอย่างมากทั้งภายในประเทศไทยเองและต่างประเทศ เนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตและแรงงานต่ำ หาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก แครอทมีถิ่นกำเนิดอยู่แถบเอเชียกลางจนถึงทางตะวันออก จากนั้นจะเผยแพร่เข้าไปในยุโรปและประเทศจีน แครอทที่ปลูกในระยะแรก ๆ จะมีหัวสีแดง ปัจจุบันนิยมหัวสีเหลือง-ส้ม พันธุ์แครอทป่าที่เจริญอยู่ทั่วไปในอาฟกานิสถานอาจจะมีสีหัวสีม่วง สีขาว หรือเหลืองขึ้นอยู่กับการนิยมของตลาดในแต่ละท้องถิ่น ในศตวรรษที่ 16 ได้เริ่มทำการปรับปรุงพันธุ์ โดยคัดเลือกสี ขนาด และลักษณะของหัว ในระยะแรกแครอทถูกนำมาใช้เป็นพืชสมุนไพร เริ่มนำมาประกอบอาหารในศตวรรษที่ 20

แครอทประกอบด้วย ส่วนประกอบของหัวอย่างเด่นชัดสองส่วน (นิพนธ์ ไชยมงคล, 2545) ดังรูปที่ 2.1 คือ

1. ส่วนของเนื้อ (Outer Core) ประกอบด้วยเปลือกบาง (Periderm)

เนื้อ (Cortex) ซึ่งประกอบด้วย ท่ออาหาร ส่วนนี้เป็นแหล่งเก็บอาหารซึ่งอยู่ในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนประกอบ หัวมีลักษณะเป็นเนื้อสีขาว เหลือง ส้ม แดง ม่วงและดำขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์



รูปที่ 2.1 ลักษณะหัวผ่าตามขวาง

2. ส่วนของแกน (Inner core) ประกอบด้วย ท่อน้ำ (Xylem) และแกน (Pith)

แครอทอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหารมากมาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แครอทเป็นแหล่งของเบตาแคโรทีนที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งป้องกันการเกิดมะเร็ง โดยร่างกายสามารถเปลี่ยนเบต้าแคโรทีนให้อยู่ในรูปของวิตามินเอ ได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณค่าทางอาหารและองค์ประกอบต่างๆในแครอท 100 กรัม

(ที่มา : นิพนธ์ ไชยมงคล ,2545)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	หน่วย
น้ำ	88	กรัม
พลังงาน	42	กิโลแคลอรี
โปรตีน	1.1	กรัม
ไขมัน	0.2	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	9.7	กรัม
แคลเซียม	37	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	36	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.7	มิลลิกรัม
โซเดียม	47	มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	341	มิลลิกรัม

แครอทสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายอย่าง เช่น รับประทานสดในสลัด ส้มตำ คัมจัด คัม ชูบ ผัดกับเนื้อสัตว์ หรือคกแต่งอาหารหรือขนมให้สวยงาม ที่ผ่านมารับประทานแครอทนิยมรับประทานในลักษณะดิบ เนื่องจากเชื่อว่าการปรุงสุกหรือการผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะทำให้แครอทสูญเสียคุณค่าทางอาหาร แต่จากผลการศึกษาในปัจจุบันพบว่าการรับประทานแครอทให้ได้คุณค่านั้นควรนำไปปรุงให้สุกเสียก่อน ความร้อนจะช่วยทำลายผนังเซลล์ของแครอท ทำให้ร่างกายนำเบต้าแคโรทีนไปใช้ในการต่อต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้น

2.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแครอทเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อน

การปรุงสุกหมายถึงเทคนิคกระบวนการให้ความร้อนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงอาหารให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การปรุงสุกอาหารสามารถทำได้ด้วยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ มากมาย เช่น การต้ม การอบ การย่าง การทอด การเคี้ยว ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เป็นวิธีการที่ใช้ความร้อนทั้งสิ้น การปรุงสุกเป็นเหตุก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านต่างๆ ของอาหารตามมา เช่น การปรับปรุงความสามารถในการย่อย ให้ร่างกายสามารถย่อยได้ง่ายขึ้น การเปลี่ยนแปลงทางด้านเนื้อสัมผัส กลิ่น สี รสชาติและคุณค่าทางอาหาร เป็นต้น

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท

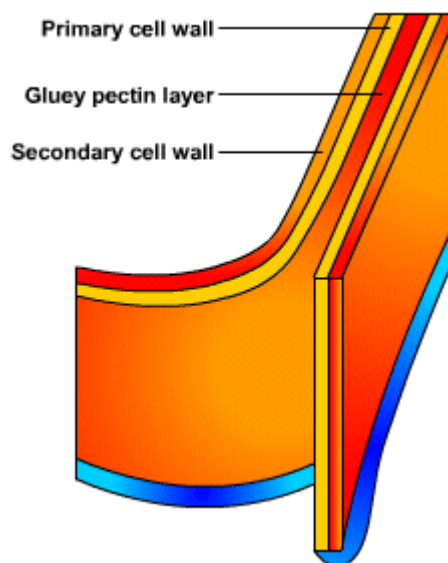
เนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของผักและผลไม้ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผักและผลไม้ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ลักษณะเนื้อสัมผัสสามารถนิยามได้ว่า เป็นกลุ่มของคุณลักษณะทางกายภาพซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางโครงสร้างของอาหารที่สามารถรับรู้โดยความรู้สึกสัมผัส มีความสัมพันธ์กับการเสีรูปทรงและการแตกตัว (Bourne, 1982; Vu และคณะ, 2004)

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของอาหารที่ผู้บริโภคจะยอมรับหรือปฏิเสธผลิตภัณฑ์ในผักและผลไม้ ความแข็งของเนื้อสัมผัสจะขึ้นกับโครงสร้างผนังเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกตินและ ลิกนิน ระหว่างกระบวนการต้มผักและผลไม้ การนุ่มขึ้นของเนื้อสัมผัสเกิดจากผลของการที่เซลลูโลส แป้ง และเพกตินดูดซึมน้ำ เซลลูโลสจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งต่างกับแป้งและเพกติน ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแป้งจะเกิดการพองตัวและสุกก่อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสจากแข็งเป็นนุ่ม ในระหว่างนั้นเพกติกซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์จะถูกย่อยโดยน้ำร้อนส่งผลให้เกิดการอ่อนนุ่มขึ้นของเนื้อสัมผัสและเซลล์เกิดการแตกตัวง่ายขึ้น (Gordon และคณะ, 1986)

2.2.1.1 สารประกอบเพกติน (Pectin Substances)

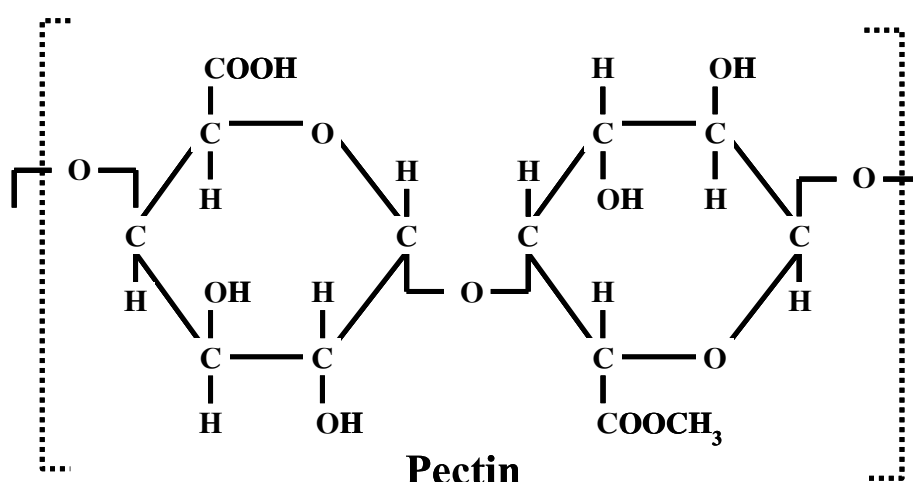
จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าแครอทมีปริมาณแป้งเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นการอ่อนตัวของแครอทเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อน จึงเกิดเนื่องจากการสลายตัวของเพกตินซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของแครอทมีเพกตินเป็นเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 7 ถึง 10 (นิธิยา รัตนานนท์, 2545)

สารประกอบเพกตินเป็นกลุ่มโพลีแซคไรด์ที่พบอยู่ใน Middle lamellae ของผนังเซลล์พืช โดยรวมอยู่กับกลุ่มเซลลูโลส ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์ เมื่อเพกตินเกิดการสลายตัว ผนังเซลล์จึงหลุดแยกออกจากกันส่งผลให้เซลล์เกิดการสลายตัวทำให้แครอทเกิดการอ่อนนุ่ม (ดังรูปที่ 2.2) สารประกอบเพกตินที่ถูกสร้างขึ้นในพืชคือ โปรโตเพกติน (Protopectin) ซึ่งพบมากในผักและผลไม้ สารประกอบเพกตินเป็นโพลีเมอร์สายยาวของกรดกาแลคทูโรนิก (D-galacturonic Acid) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β -(1 $\rightarrow$ 4) โดยหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ในโมเลกุลของกรดกาแลคทูโรนิก บางส่วนจะถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยหมู่เมทิล ได้เป็นเมทอกซิลเอสเทอร์ และยังมีบางส่วนเป็นหมู่คาร์บอกซิลอิสระ (นิธิยา รัตนานนท์, 2545) ดังรูปที่ 2.3 ใน 1 หน่วยโมเลกุลของสารประกอบเพกติน มีกรดกาแลคทูโรนิกอยู่ประมาณ 300 ถึง 800 หน่วย



รูปที่ 2.2 การแยกจากกันของผนังเซลล์เมื่อเกิดการสลายตัวของเพกติน

ที่มา: Thinkquest, 2005



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเพกติน

ที่มา: Charley, 1982

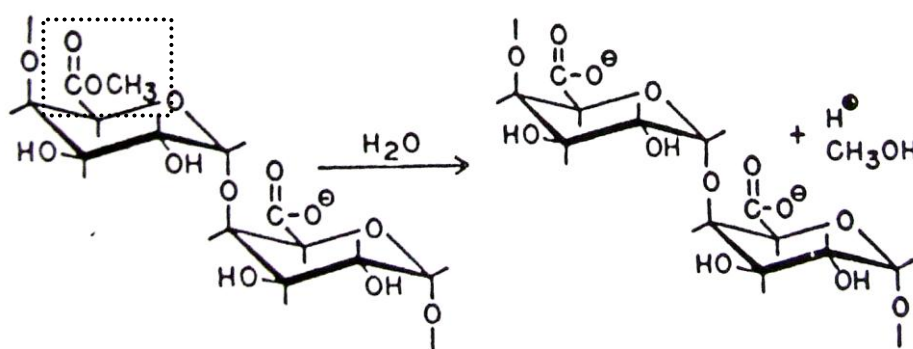
2.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกติน

จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท ที่ผ่านการให้ความร้อนมากมาย แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนมากไม่ได้ศึกษาผลของสถานะการให้ความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทโดยตรง ซึ่งงานวิจัยของ Bourne (1987) เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิของการลวกแครอทก่อนผ่านการให้ความร้อนต่อค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสของแครอท ซึ่งจากการศึกษาพบว่า แครอทที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 74 องศา

เซลเซียส ก่อนแล้วผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสมากกว่าแครอทที่ผ่านการลวกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วผ่านความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสของแครอทเมื่อเวลาผ่านไปมีลักษณะการลดลงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสองช่วง

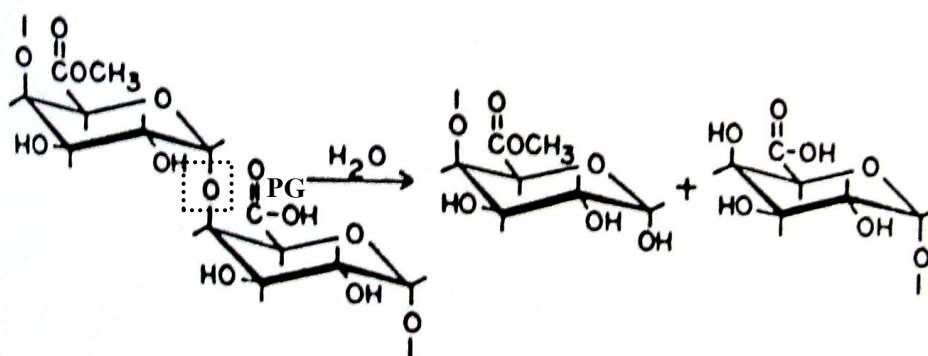
นอกจากนี้ Ramesh และคณะ (1998) ได้ใช้แบบจำลอง Biphasic model อธิบายค่าความแข็งเนื้อสัมผัสที่ลดลงของผักที่ผ่านการต้ม โดยทำการต้มถั่วลันเตาสีเขียว แครอท หัวผักกาด และ Knol-knol ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสของถั่วลันเตาสีเขียว แครอท หัวผักกาด มีการลดลงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสองช่วง โดยจุดโค้งของค่าความแข็งเป็นจุดที่ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสองปฏิกิริยาตัดกัน อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของหัวผักกาดเป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเพียงช่วงเดียวตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของผักเนื่องจากการกระบวนการให้ความร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารสองชนิดซึ่งเป็นโครงสร้างของผัก

Vu และคณะ (2004) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผักและผลไม้ในกระบวนการให้ความร้อนมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเอนไซม์และการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องใช้เอนไซม์ของเพกติน เพกตินจะถูกย่อย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเพกติน เพกตินที่ผนังเซลล์ของผักจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ Pectinase ชนิดต่างๆ เช่น Pectinmethylesterase (PME) และ Polygalacturonase (PG) (Van Buren, 1979; Adam, 1991) การเสื่อมสภาพของเพกตินเนื่องจากเอนไซม์ PME และ PG เกิดขึ้นโดย ขั้นตอนแรกเป็นการ Demethylated เพกตินโดยเอนไซม์ PME เมื่อผักได้รับความร้อน เพกตินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพโดยมีเอนไซม์ PME เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ PME จะเข้าไปสลายพันธะหมู่เมทิลของเพกติน จากนั้นหมู่เมทิลจะไปจับกับน้ำแทน ก่อให้เกิดเมทานอล และเพกติน ซึ่งมี Degree of Methylation ที่ลดน้อยลง หรือ Polygalacturonic Acid (ดังรูปที่ 2.4) ขั้นตอนต่อมาเป็นการลดความยาวของโพลีเมอร์ของเพกติน โดยปกติแล้วเพกตินจะต่อกันเป็นสายโพลีเมอร์ขนาดยาว เพกตินจะถูก Depolymerised โดยเอนไซม์ PG จะไปสลายพันธะระหว่างโมเลกุลของเพกติน ซึ่งสุดท้ายจะได้สาย Demethylated Pectin ที่มีสายสั้น (ดังรูปที่ 2.5) และผลของการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสที่ตามมาคือเนื้อเยื่อจะนุ่มและแยกออกจากกัน (Vu และคณะ, 2004)



รูปที่ 2.4 การสลายพันธะหมู่เมทิลของเพกตินด้วยเอนไซม์ Pectinmethylesterase (PME)

ที่มา : Fennema, 1996



รูปที่ 2.5 การสลายพันธะระหว่างเพกตินด้วยเอนไซม์ Polygalacturonase (PG)

ที่มา : Fennema, 1996

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงสีของแครอท

สีของอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นคุณสมบัติทางกายภาพประการหนึ่ง ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น คุณสมบัติทางเรขาคณิต คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากสีเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการรับรู้สัญญาณในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบตามนุษย์ และส่งสัญญาณผ่านประสาทตาไปยังสมองและแปลงค่าเป็นคำสีต่างๆ ตามที่แต่ละบุคคลมีอยู่ในระบบความทรงจำ (ขวัญหญิง เวียงนาค, 2546)

สีของอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับและไม่ยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตภัณฑ์เกษตรผิดปกติไป ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ โดยอาจไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่น เช่นรสชาติ หรือเนื้อสัมผัสเลย สีธรรมชาติที่พบในผักและผลไม้คือ คลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ เป็นสีธรรมชาติที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในไขมัน แคโรที

น้อยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทั้งนี้ เพราะโมเลกุลของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่มาก วัตถุประสงค์การเกษตรเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การให้ความร้อน ความเย็น สารเคมี การสกัด ทำให้สีเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงบางอย่างก็เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค เช่นการลวกทำให้ผลไม้บางชนิดมีสีสดใสขึ้น การเกิดสีน้ำตาลไหม้ (Caramel) ของขนมอบ (ขวัญหญิง เวียงนาค, 2546)

สีของอาหารมีอิทธิพลต่อความรู้สึกต่อกลิ่นรส และความเข้มข้นของกลิ่นรสอาหาร สีของอาหารที่เปลี่ยนไปทำให้ผู้บริโภคสังเกตเห็นและไม่กล้าบริโภค เพราะไม่มั่นใจคุณภาพ ทั้งนี้เนื่องจากความคุ้นเคยและนิสัยการบริโภคที่ได้รับการฝึกฝนมา จึงเห็นได้ว่าเราสามารถนำสีเป็นปัจจัยในการควบคุมคุณภาพอาหารและผลิตผลทางการเกษตรตั้งแต่การคัดเลือกพันธุ์ การเก็บเกี่ยว การตัดคุณภาพ การแปรรูป จนกระทั่งถึงมือผู้บริโภค (ขวัญหญิง เวียงนาค, 2546)

การเปลี่ยนแปลงสีของแคโรทีนระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น การเสื่อมสภาพและเปลี่ยนโครงสร้างของรงควัตถุที่ให้สีในแคโรทีน และการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

ก.) การเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่พบมากในธรรมชาติและมีมากในแคโรทีน ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงสีเหลือง แสด และแดงของแคโรทีน (Hutchings, 1994) แคโรทีนอยด์สามารถละลายได้ในน้ำมันและสารละลายอินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วแคโรทีนอยด์เป็นสารที่ทนต่อความร้อนปานกลางและเกิดการเปลี่ยนสีจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ความร้อน กรด และแสง

สีของแคโรทีนอยด์จะแปรผันตามจำนวนพันธะคู่ (Conjugated Double Bond) ในโมเลกุล ถ้ามีจำนวนพันธะคู่มากก็จะให้สีแดงเข้ม ซึ่งพันธะคู่อาจอยู่ในรูป Cis หรือ Trans แคโรทีนอยด์ที่มีโครงสร้างอยู่ในรูป Trans จะมีสีแดงเข้ม ถ้ามีจำนวนพันธะคู่ที่อยู่ในรูปของ Cis เพิ่มมากขึ้นสีจะจางลง (นิธิยา รัตนานนท์, 2545) โดยทั่วไปผลของอุณหภูมิของการให้ความร้อนที่มีต่อการเสื่อมสภาพและเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ในผักสีเหลือง แสด และแดง ขึ้นกับชนิดของผัก องค์ประกอบของแคโรทีนอยด์ วิธีการให้ความร้อน และสถานะในการให้ความร้อนได้แก่ เวลา อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจน (MacDougall, 2002)

การเปลี่ยนแปลงสีของแคโรทีนอยด์เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนเกิดจากหลายสาเหตุเช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเปลี่ยนโครงสร้างของพันธะคู่จาก Trans เป็น Cis เนื่องจาก

ความร้อน ดังกล่าวมาข้างต้นแล้วว่าแคโรทีนอยด์ประกอบด้วยพันธะคู่จำนวนมาก การเปลี่ยนโครงสร้างของพันธะคู่จาก Trans ซึ่งมีสีแดงเป็น Cis ซึ่งมีสีเหลืองจะเกิดขึ้นที่บริเวณพันธะคู่ โดยทั่วไปอัตราการเกิดโครงสร้างแบบ Cis จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ในกระบวนการให้ความร้อนแก่มะเขือที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างแบบ Trans ของเบต้าแคโรทีน เป็นโครงสร้างแบบ Cis (Fennema, 1996)

ข.) การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล

การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมี 2 แบบ คือ แบบที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Browning Reaction) และแบบที่ไม่เร่งด้วยเอนไซม์ (Nonenzymatic Browning Reaction) แบบที่เร่งด้วยเอนไซม์เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมโนเมอร์และออร์โทไดฟีนอล ให้วงแหวนควิโนน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และคอนเดนเซชัน ได้เป็นสารสีน้ำตาล เรียกว่า เมลานิน (Melanins) ปฏิกิริยาเหล่านี้จะถูกร่งด้วยเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส

สำหรับการเกิดปฏิกิริยา Maillard Browning เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่เร่งด้วยเอนไซม์ ที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่เอมิโนกับคาร์บอนิลทำให้เกิดพอลิเมอร์ของสารสีน้ำตาลที่ไม่ละลายน้ำ เรียกว่า Melanoidins ปฏิกิริยานี้บางครั้งก็เป็นประโยชน์ แต่ส่วนมากไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์อาหาร เพราะอาจทำให้เกิดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และยังทำให้สูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากการสูญเสียกรดอะมิโนไลซีน และคุณค่าทางโภชนาการของโปรตีน ปัจจุบันที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยานี้คือ น้ำตาล เอมีน ฟิเอช อุณหภูมิ และ Water Activity (ขวัญหญิง เวียงนาค, 2546)

2.3 กระบวนการต้มที่สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ

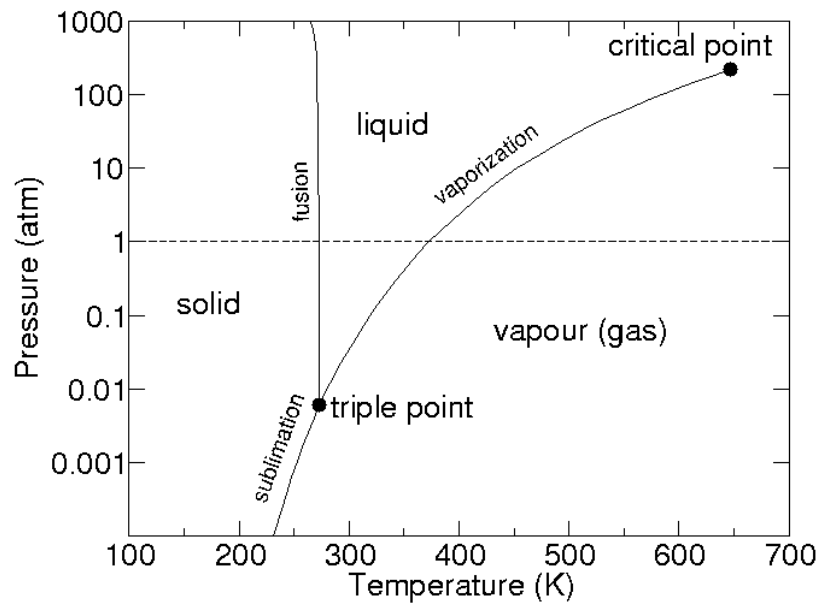
กระบวนการปรุงสุกหมายถึงการให้ความร้อนแก่อาหารเพื่อปรับปรุงลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และรสชาติ ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคและง่ายต่อการย่อยภายในร่างกาย กระบวนการให้ความร้อนแก่อาหารมีหลายรูปแบบ เช่น การให้ความร้อนแบบแห้งเช่น อบ ย่าง การให้ความร้อนแบบชื้น เช่น การต้ม เคี้ยว ใช้ไอน้ำ และใช้หม้อแรงดันรวมทั้งการให้ความร้อนโดยใช้ไขมัน เช่นการทอด (Gordon และคณะ, 1986)

สภาวะในการต้มเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ สภาวะที่ใช้ในการต้มในปัจจุบันโดยทั่วไปจะทำการต้มวัสดุอาหารภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ที่สภาวะบรรยากาศ ซึ่งมีข้อเสียคือ (Gordon และคณะ, 1986)

- อุณหภูมิในการต้มต่ำ จึงต้องใช้ระยะเวลาในการต้มนาน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารขณะต้ม
- คุณค่าทางโภชนาการที่ละลายน้ำได้จะแพร่ออกจากอาหารสู่น้ำที่ใช้ในการต้ม ซึ่งเป็นการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินและแร่ธาตุ
- เกิดการสูญเสียคุณค่าทางอาหารที่ไวต่อความร้อน

อย่างไรก็ตามยังมีสภาวะการต้มที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการต้มโดยให้อุณหภูมิของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางให้ความร้อนแก่อาหาร โดยเพิ่มความดันภายในระบบหรือหม้อต้มเพื่อรักษาสถานะของน้ำให้อยู่ในสถานะของเหลว (ดังรูปที่ 2.6) การต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ภายใต้ระยะเวลาน้อยกว่าการต้มโดยทั่วไป เนื่องจากการต้มวัสดุอาหารที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียสจะเกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำและวัสดุอาหารสูงกว่าการต้มทั่วไป ความร้อนจึงเกิดการถ่ายเทเข้าไปในอาหารได้เร็วกว่าการต้มที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส

เครื่องต้มความดันเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการต้มวัสดุอาหารที่สภาวะเหนือจุดเดือดปกติ เนื่องจากการต้มที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส จำเป็นต้องเพิ่มความดันภายในหม้อต้มให้สูงกว่าความดันบรรยากาศเพื่อรักษาสถานะของน้ำที่ใช้ในการต้มให้อยู่ในสถานะของเหลว นอกจากนี้แล้วในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอาหารที่ต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือดนั้น การควบคุมสภาวะการทดลองให้ถูกต้องและคงที่เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากสภาวะในการทดลองจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของวัสดุอาหารที่ได้ ดังนั้นเครื่องต้มความดันที่ใช้ต้องใช้งานได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และต้องมีระบบควบคุมที่มีความถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 2.6 แผนภาพวัฏภาคของน้ำ ที่อุณหภูมิ และความดันต่างๆ

ที่มา : General Chemistry, 2002

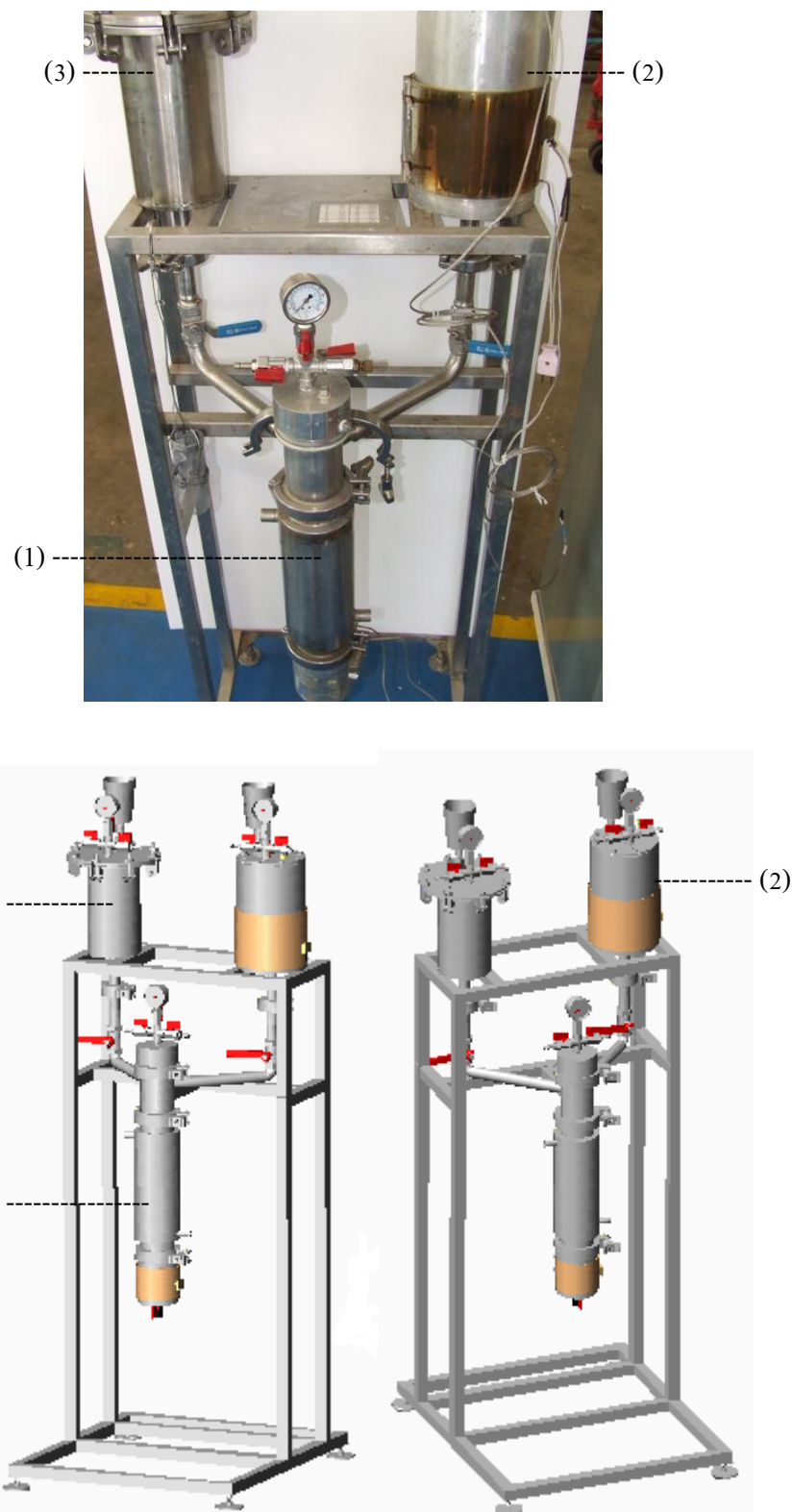
จะเห็นได้ว่าในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแตรอทภายใต้สภาวะกระบวนการผลิตเหนือจุดเดือดสำหรับการผลิตอาหารเหลว จำเป็นต้องมีทั้งในส่วนการพัฒนาเครื่องต้มความดันพร้อมระบบควบคุม และส่วนการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแตรอทที่ต้มภายใต้สภาวะเหนือจุดเดือด เพื่อให้งานวิจัยสามารถดำเนินได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้วางแผนวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งมีรายละเอียดดังที่จะกล่าวต่อไป

บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องต้มความดันแบบระดับห้องปฏิบัติการ พร้อมระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์

เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความดันในกระบวนการต้ม ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอาหารภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน ทางผู้วิจัยทำการออกแบบเครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในงานวิจัยส่วนแรกได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้มความดันแบบ และส่วนที่สองคือการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ การพัฒนาเครื่องต้มความดันแบบระดับห้องปฏิบัติการพร้อมระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้พัฒนามาจากเครื่องมือต้นแบบสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารที่อุณหภูมิเหนือจุดเดือดปกติซึ่งพัฒนาโดย พงษ์ธร ลีลายุทธสุนทร (2547) โดยทำการดัดแปลงเครื่องต้มความดันเพื่อให้ใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและควบคุมทำให้ควบคุมสภาวะการต้มได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

3.1 เครื่องต้มความดันแบบระดับห้องปฏิบัติการสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหาร

ในกระบวนการต้มวัสดุอาหารโดยทั่วไป วัสดุอาหารจะถูกต้มภายใต้สภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิจุดเดือดประมาณ 100 องศาเซลเซียส แต่สำหรับการต้มเหนือจุดเดือดปกติหรือการต้มที่สภาวะอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส ต้องเพิ่มความดันภายในหม้อต้มให้สูงกว่าความดันบรรยากาศเพื่อรักษาสถานะของน้ำที่ใช้ในการต้มให้อยู่ในสถานะของเหลว เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารที่อุณหภูมิเหนือจุดเดือดปกติ เครื่องต้มความดันแบบระดับห้องปฏิบัติการสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารจึงต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับสภาวะในการต้มซึ่งได้แก่เครื่องต้มความดัน อุปกรณ์ให้ความร้อน (แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด) และอุปกรณ์เพิ่มความดัน (ปั๊มลม) ดังแสดงรูปที่ 3.1 โดยเครื่องต้มความดันที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร (1) หม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ (2) และหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร (3) ซึ่งหม้อทั้ง 3 ใบมีลักษณะและการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้



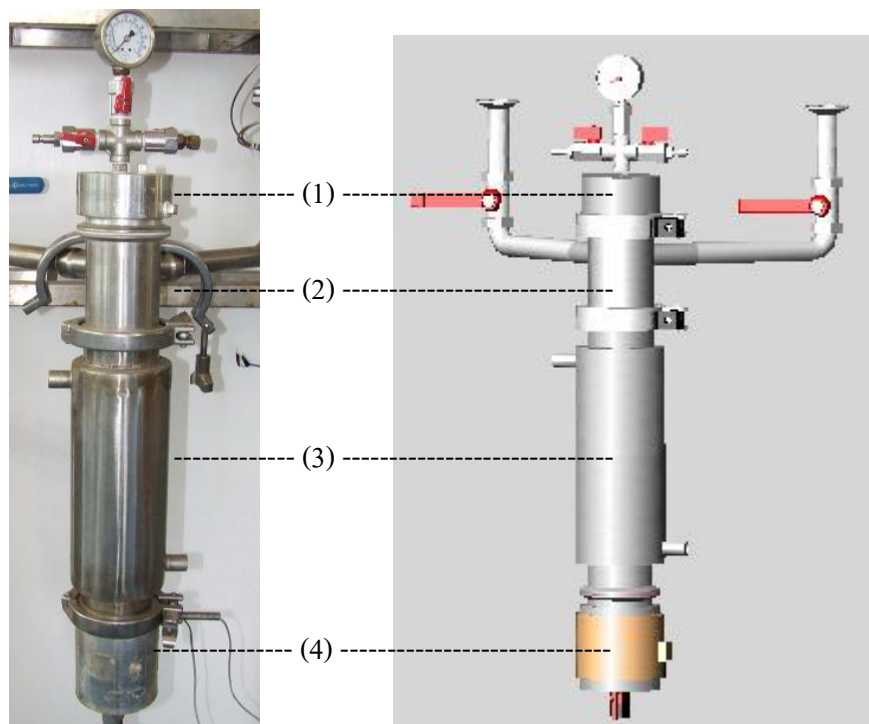
รูปที่ 3.1 แบบจำลองเบื้องต้นของเครื่องมือต้นแบบสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหาร

- (1) หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร
- (2) หม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ

(3) หม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการใช้ในการลดอุณหภูมิหม้อต้ม

3.1.1 หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร

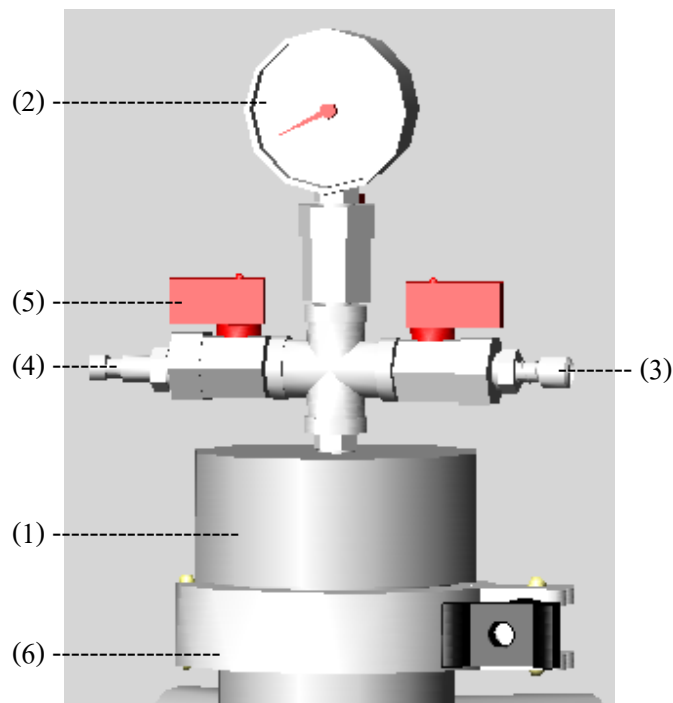
หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร (รูปที่ 3.2) เป็นอุปกรณ์สำหรับต้มวัสดุอาหาร เพื่อศึกษาผลของการต้มที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ หม้อต้มอัดความดันทำจากสแตนเลส และอลูมิเนียม ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนย่อยได้แก่ ส่วนฝาบน (1) ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำร้อนและหม้อน้ำเย็น (2) ส่วนกลางของหม้อต้ม (3) และส่วนล่างของหม้อต้มอัดความดัน (4)



รูปที่ 3.2 หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร

- (1) ส่วนฝาบนของหม้อต้ม
- (2) ส่วนเชื่อมต่อหม้อเตรียมน้ำร้อนและหม้อเตรียมน้ำเย็น
- (3) ส่วนกลางของหม้อต้ม
- (4) ส่วนล่างของหม้อต้มอัดความดัน

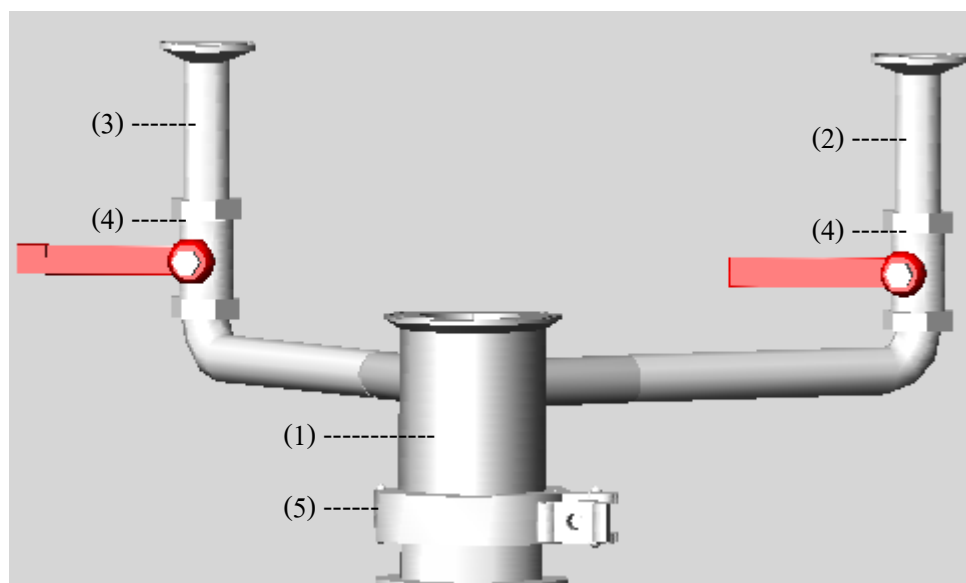
1. ส่วนฝาบนของหม้อต้ม (รูปที่ 3.3) ใช้สำหรับเปิด-ปิดหม้อต้มอัดความดันเพื่อนำวัสดุอาหารที่ต้องการศึกษาเข้า-ออก ฝาบนทำจากอลูมิเนียมรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 90 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร ภายนอกสูง 50 มิลลิเมตร ภายใน 28 มิลลิเมตร ด้านบนมีอุปกรณ์ต่างๆซึ่งประกอบด้วย เกจวัดความดันขนาด 0-10 บาร์ (2) ตัวเชื่อมหางปลาตัวผู้ (4) สำหรับต่อกับอุปกรณ์ควบคุมความดันที่ติดอยู่กับปั๊มลมซึ่งใช้ในการปรับความดันในหม้อต้ม ความดันระหว่างกระบวนการต้ม และวาล์วปล่อยความดัน (3) ใช้สำหรับลดความดันภายในเครื่อง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการต้ม โดยอุปกรณ์ต่างๆ สามารถเปิด-ปิดผ่านทางบอลวาล์ว (5) ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ด้านล่างมีสายรัดสแตนเลส (6) สำหรับเชื่อมระหว่างส่วนฝาบนของหม้อต้ม และส่วนเชื่อมต่อหม้อเตรียมน้ำร้อนและหม้อเตรียมน้ำเย็น



รูปที่ 3.3 ส่วนฝาบนหม้ออัดความดัน

- (1) ฝาบนของหม้อต้ม
- (2) เกจวัดความดันขนาด 0-10 บาร์
- (3) วาล์วปล่อยความดัน
- (4) ตัวเชื่อมหางปลาตัวผู้
- (5) บอลวาล์ว ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- (6) สายรัดสแตนเลส

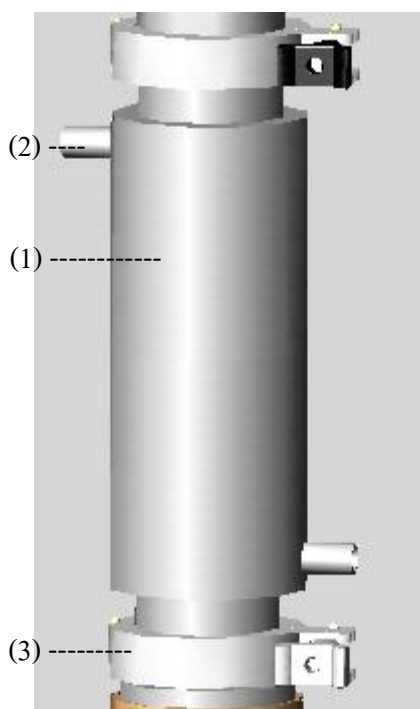
2. ส่วนเชื่อมต่อหม้อเตรียมน้ำร้อนและหม้อเตรียมน้ำเย็น (รูปที่ 3.4) อยู่ถัดจากส่วนฝาบนหม้ออัดความดัน ทำจากสแตนเลสทรงกระบอก สูง 100 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 74 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร มีท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร 2 ท่อ ท่อด้านขวาติดต่อกับหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ (2) และท่อด้านซ้ายติดต่อกับหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร (3) ท่อทั้ง 2 สามารถเปิด-ปิดผ่านทางบอลวาล์ว (4) ด้านล่างมีสายรัดสแตนเลส (5) สำหรับเชื่อมระหว่างส่วนเชื่อมต่อหม้อเตรียมน้ำร้อนและหม้อเตรียมน้ำเย็น และส่วนกลางของหม้อต้ม



รูปที่ 3.4 ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำร้อนและหม้อน้ำเย็น

- (1) ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำร้อนและหม้อน้ำเย็น
- (2) ส่วนเชื่อมต่อหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ
- (3) ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร
- (4) บอลวาล์ว ขนาด 25.4 มิลลิเมตร
- (5) สายรัดสแตนเลส

3. ส่วนกลางของหม้อต้ม (รูปที่ 3.5) สำหรับต้มวัตถุดิบภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ มีลักษณะเป็นหม้อ 2 ชั้น รูปทรงกระบอก ทำจากสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 94 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ด้านนอกมีช่องสำหรับผ่านลมร้อน (2) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ใช้ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มความดันขณะทำการต้ม ด้านล่างมีสายรัดสแตนเลส (3) สำหรับเชื่อมระหว่างส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนกลางของหม้อต้มและส่วนล่างของหม้อต้มอัดความดัน

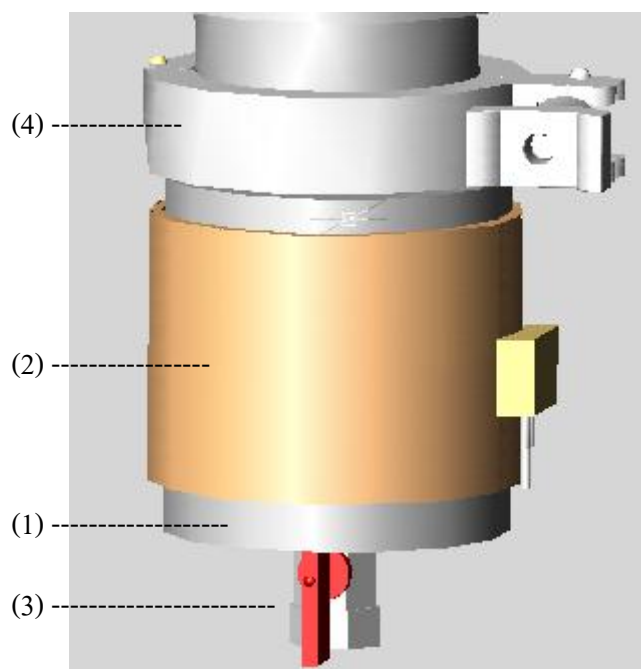


รูปที่ 3.5 ส่วนกลางของหม้อต้ม

- (1) ส่วนกลางของหม้อต้ม
- (2) ช่องสำหรับผ่านลมร้อน
- (3) สายรัดสแตนเลส

4. ส่วนล่างของหม้อต้มอัดความดัน (รูปที่ 3.6) ทำจากอลูมิเนียม ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ด้านล่างปิด เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 90 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 54 มิลลิเมตร ภายนอกสูง 100 มิลลิเมตร ภายในสูง 78 มิลลิเมตร ด้านล่างมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบแท่ง เพื่อวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มวัตถุดิบ และมีช่องสำหรับระบายน้ำออกเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการต้มซึ่งสามารถเปิด-ปิดผ่านทางบอลวาล์ว (3) ด้านข้างมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบแท่ง เพื่อวัดอุณหภูมิหม้อต้มความดัน นอกจากนี้ยังมีแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด (2) ขนาด 1500 วัตต์ 220

โวลต์ ซึ่งมีหน้าที่ให้ความร้อนแก่หม้อต้มความดันขณะต้มเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ด้านโดยแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด จะรับสัญญาณเปิด-ปิดจากระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะกล่าวต่อไป



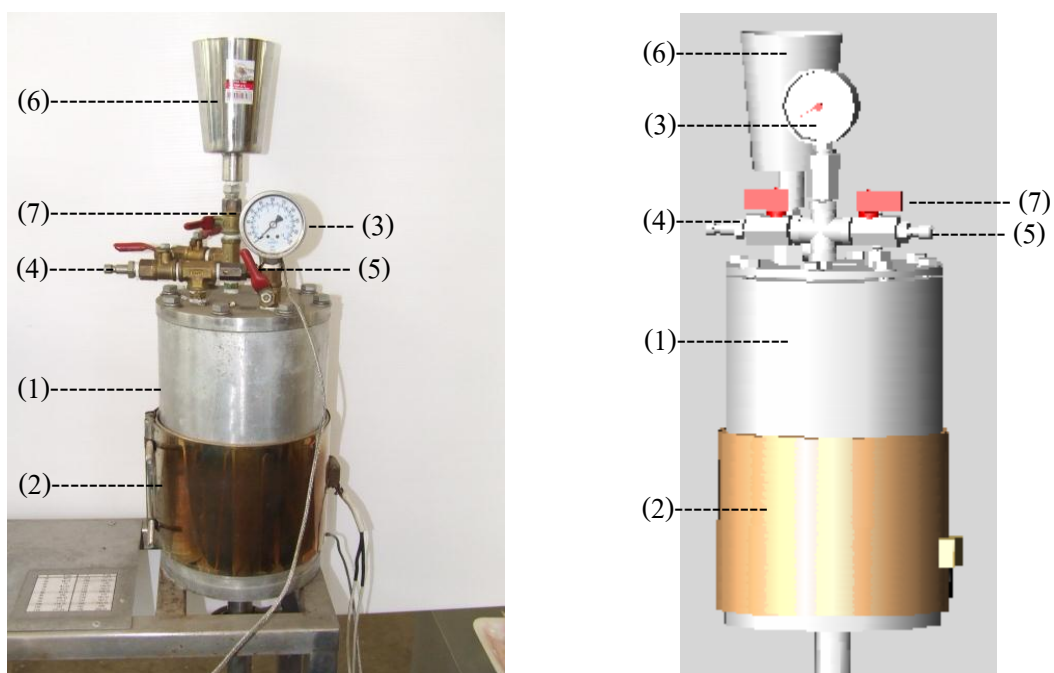
รูปที่ 3.6 ส่วนล่างของหม้อต้มอัดความดัน

- (1) หม้อต้มอัดความดัน
- (2) แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด ขนาด 1500 วัตต์
- (3) บอลวาล์ว ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)
- (4) สายรัดสแตนเลส

3.1.2 หม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันในกระบวนการต้มต่อคุณสมบัติของวัสดุอาหารนั้น น้ำที่ใช้ในกระบวนการต้มต้องมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการและคงที่ตลอดการทดลอง การเตรียมน้ำที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 100 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นไม่สามารถทำการเตรียมได้ เนื่องจากภายใต้สภาวะบรรยากาศ น้ำที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียสจะมีสถานะเป็นไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องมีหม้อต้มอัดความดันอีกใบ เพื่อใช้สำหรับเตรียมน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

หม้ออัดความดันสำหรับเตรียมน้ำอุณหภูมิต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เป็นหม้อออลูมิเนียม รูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 3.7 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 150 มิลลิเมตร หนา 25.4 มิลลิเมตร สูง 238 มิลลิเมตร ด้านบนมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบแท่ง เพื่อวัดอุณหภูมิภายใน ด้านข้างมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบแท่ง เพื่อวัดอุณหภูมิหม้ออัดความดันสำหรับเตรียมน้ำ ด้านนอกมีแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด (2) ขนาด 1500 วัตต์ 220 โวลต์ รับสัญญาณเปิด-ปิดจากระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดมีหน้าที่สำหรับให้ความร้อนในระหว่างการเตรียมน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ด้านบนติดตั้งอุปกรณ์ปรับความดัน ซึ่งประกอบด้วย เกจวัดความดัน ขนาด 0-10 บาร์ (3) ตัวเชื่อมต่อทางปลาตัวผู้ (4) สำหรับต่อกับตัวควบคุมความดันซึ่งติดอยู่กับปั๊มลม ใช้ในการเพิ่มความดันในหม้ออัดความดันสำหรับเตรียมน้ำเพื่อปรับสภาพของน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส วาล์วปลดปล่อยความดัน (5) ใช้สำหรับลดความดัน และถ้วยสแตนเลส (6) ความจุ 250 มิลลิลิตร สำหรับเติมน้ำลงในหม้อ โดยอุปกรณ์ต่างๆ สามารถเปิด-ปิดผ่านทางบอลวาล์ว (7)



รูปที่ 3.7 หม้ออัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ

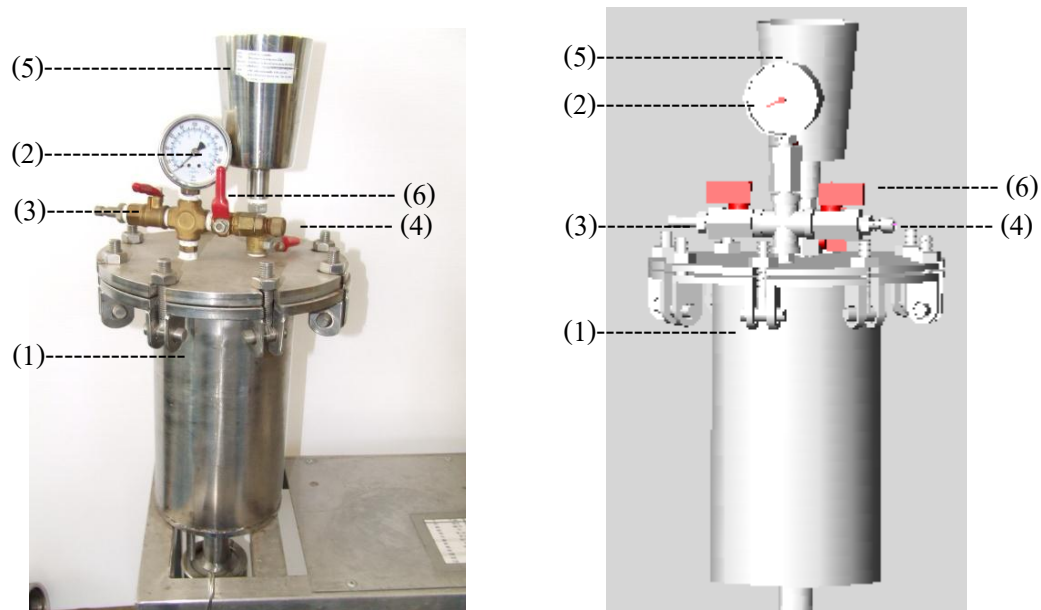
- (1) หม้ออัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ
- (2) แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด ขนาด 1500 วัตต์ 220 โวลต์
- (3) เกจวัดความดันขนาด 0 - 10 บาร์
- (4) ตัวเชื่อมต่อทางปลาตัวผู้

- (5) วาล์วปล่อยความดัน
- (6) ถ้วยสแตนเลส ความจุ 250 มิลลิลิตร
- (7) บอลวาล์ว ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

3.1.3 หม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร

ในการเก็บตัวอย่างวัสดุอาหารเพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติหลังการต้ม ต้องทำการลดความดันภายในหม้อต้มให้หมดก่อนจึงทำการเก็บตัวอย่างวัสดุอาหารได้ ในสภาวะการต้มที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส เมื่อความดันลดลงเท่าความดันบรรยากาศ น้ำจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำและเกิดการเดือดของน้ำขึ้น ซึ่งต้องใช้ระยะเวลานานเพื่อให้อุณหภูมิของน้ำลดลงซึ่งไม่เหมาะสำหรับการเก็บตัวอย่างวัสดุอาหารเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ การทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงอย่างรวดเร็วสามารถทำได้โดยการใช้ไอน้ำเย็นในการลดอุณหภูมิ ดังนั้นจำเป็นต้องมีหม้ออัดความดันอีกใบสำหรับบรรจุน้ำเย็นเพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิตัวอย่างวัสดุอาหาร

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหาร หลังจากการขึ้นตอนการต้ม ไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส จะถูกปล่อยจากหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร เข้าสู่หม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหารเพื่อหยุดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและกายภาพของวัสดุอาหาร และลดอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ต้ม เพื่อให้คงสถานะของเหลวที่ความดันบรรยากาศก่อนนำตัวอย่างออกจากหม้อต้ม หม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร มีลักษณะเป็นหม้อรูปทรงกระบอก ทำจากสแตนเลส สูง 210 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 115 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 105 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.8 ด้านบนมีอุปกรณ์ต่างๆประกอบด้วย เกจวัดความดันขนาด 0 - 10 บาร์ (2) ตัวเชื่อมทางปลาตัวผู้ (3) สำหรับต่อกับตัวควบคุมความดันซึ่งติดอยู่กับปั๊มลม ใช้สำหรับปรับความดันในหม้อน้ำเย็นอัดความดันให้มีความมากกว่าหม้อต้มอัดความดัน เพื่อให้ไอน้ำเย็นไหลจากหม้อน้ำเย็นอัดความดันไปยังหม้อต้มอัดความดัน วาล์วปล่อยความดัน (4) ใช้สำหรับลดความดัน และถ้วยสแตนเลส (5) ความจุ 250 มิลลิลิตร สำหรับเติมน้ำลงในหม้อโดยอุปกรณ์ต่างๆ สามารถเปิด-ปิดผ่านทางบอลวาล์ว (6) ด้านล่างมีท่อน้ำเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร สำหรับผ่านน้ำเย็นที่เตรียมไปยังหม้อต้มโดยบอลวาล์ว



รูปที่ 3.8 หม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการใช้ในการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร

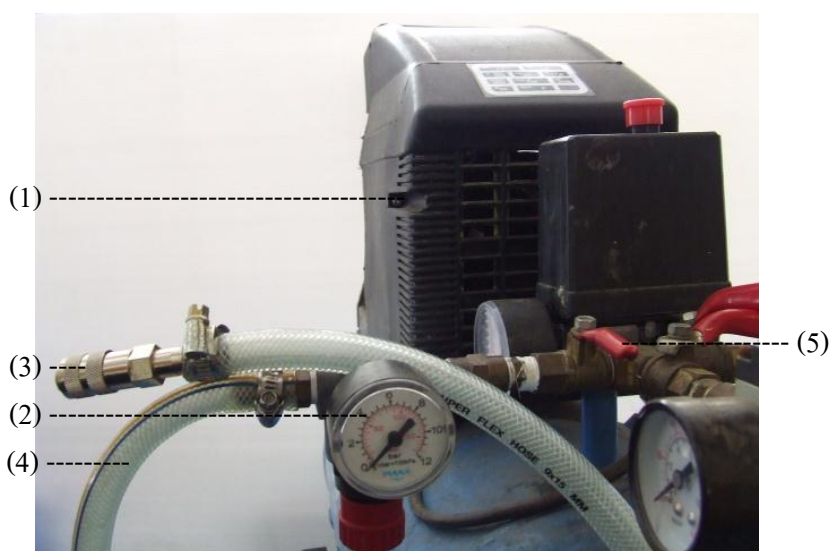
- (1) หม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการใช้ในการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร
- (2) เกจวัดความดันขนาด 0-10 บาร์
- (3) ตัวเชื่อมหางปลาตัวผู้
- (4) วาล์วปล่อยความดัน
- (5) ถ้วยสแตนเลส ความจุ 250 มิลลิลิตร
- (6) บอลวาล์ว ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)

3.2 การพัฒนาชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมความดันและอุณหภูมิ

เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารเนื่องจากอุณหภูมิและความดันเนื่องจากระบวนการต้มที่สภาวะการต้มเหนือจุดเดือดปกติ ระบบควบคุมของเครื่องต้มอัดความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารในระหว่างการต้ม ในระหว่างการทดลอง หากระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมสภาวะต้มให้มีความถูกต้องได้ตามต้องการและไม่มีความคงที่ การเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารที่เกิดขึ้นก็อาจไม่ได้เกิดจากสภาวะการต้มที่ต้องการ ดังนั้นระบบควบคุมควรถูกออกแบบและพัฒนาให้มีความถูกต้องและแม่นยำ ระบบควบคุมที่ดีควรจะสามารถควบคุมสภาวะการต้มให้ได้ตามต้องการ ควบคุมสภาวะการต้มให้มีความคงตัวตลอดการใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานอีกด้วย

3.2.1 ระบบควบคุมสถานะความดัน

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาผลของสถานะการดัมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแครอท โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความดัน ที่ระดับ 0 2 4 และ 6 บาร์ และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการดัม ที่ระดับ 80 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส การควบคุมความดันในระหว่างกระบวนการดัมเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการดัมที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศ น้ำจะอยู่ในสถานะไอน้ำจึงไม่สามารถทำการดัมวัสดุอาหารได้ ดังนั้นต้องปรับความดันในหม้อดัมอัดความดันให้สูงเกินความดันบรรยากาศ เพื่อให้ น้ำที่ใช้ในการดัมคงตัวในสถานะของเหลว ในการปรับสถานะความดันในการดัมสามารถทำได้โดยเปิดปั๊มลม (1) ปั๊มลมจะอัดลมเก็บไว้และปล่อยผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดัน (2) ซึ่งสามารถตั้งค่าความดันได้ จากนั้นให้ทำการต่อตัวเชื่อมทางปลาตัวเมีย (3) ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมความดันที่ติดอยู่กับปั๊มลมผ่านทางสายยางทนแรงดันดัน (4) เข้ากับตัวเชื่อมทางปลาตัวผู้ซึ่งติดตั้งอยู่ ณ บริเวณต่างๆ บนเครื่องดัมอัดความดันดังที่กล่าวมาแล้ว เมื่อทำการเชื่อมต่อเสร็จแล้วให้เปิดบอလာล์ว (5) ที่อยู่ติดกับปั๊มลม เพื่อให้ความดันอากาศไหลจากปั๊มลมเข้าสู่เครื่องดัมอัดความดัน โดยความดันในหม้อดัมอัดความดันจะแสดงบนเกจวัดความดัน และสามารถปรับค่าความดันได้จากวาล์วปล่อยความดันอีกทางหนึ่งด้วย (รูปที่ 3.9)

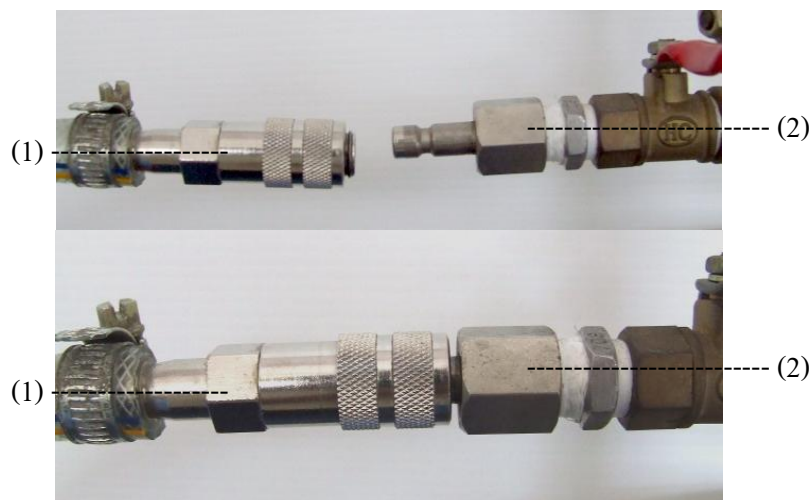


รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ควบคุมความดัน

- (1) ปั๊มลม ยี่ห้อ Abac รุ่น Pole Position 221 CE ประเทศอิตาลี
- (2) อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Regulator)
- (3) ตัวเชื่อมทางปลาตัวเมีย

(4) สายยางทนแรงดันดัน

(5) บอลวาล์ว ขนาด 19 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว)



รูปที่ 3.10 ตัวเชื่อมหางปลาตัวเมีย และตัวผู้

(1) ตัวเชื่อมตัวผู้ เชื่อมติดกับบริเวณต่างๆ ของเครื่องต้มอัดความดัน

(2) ตัวเชื่อมตัวเมีย เชื่อมติดกับอุปกรณ์ควบคุมความดัน

3.2.2 ระบบควบคุมให้ความร้อน

ในขั้นตอนการต้มวัสดุอาหาร อุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างการต้มเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารเป็นอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการต้มอาจส่งผลถึงการเปลี่ยนไปของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากสถานะที่ทำการศึกษา ดังนั้นการศึกษาค่าผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอาหารที่สถานะอุณหภูมิต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิเหนือจุดเดือดปกติ (สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส) ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ใช้จะสามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการต้มให้มีความถูกต้อง และคงที่ตลอดการทดลอง ตลอดจนสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น เป็นระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและควบคุม ชุดอุปกรณ์ควบคุมความร้อนและโปรแกรมควบคุมจะทำงานร่วมกัน โดยชุดอุปกรณ์ควบคุมความร้อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. **เทอร์โมคัปเปิลแบบ K** ชนิดแท่ง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับค่าความร้อนของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ติดตั้งด้วย สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิหม้อต้มอัดความดัน เทอร์โมคัปเปิลจะทำการรับสัญญาณความร้อนจากหม้อต้มอัดความดันสำหรับการใช้ในการต้มวัสดุอาหาร หม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ และน้ำที่ใช้ในการต้ม จากนั้นจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของค่าความต่างศักย์ แล้วส่งไปยังกล่องรับ-ส่งสัญญาณต่อไป

2. **กล่องรับ-ส่งสัญญาณ (Signal Conditioning Block, SCB)** ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท National Instrument มีหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ กล่องรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้รุ่น SCB-68 ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ ในรูปของสัญญาณอนาล็อก เช่น ความต่างศักย์ อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า ความต้านทาน ความถี่ เป็นต้น และส่งสัญญาณออกได้ทั้งในรูปของสัญญาณอนาล็อก ได้แก่ ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า และสัญญาณดิจิทัล เมื่อเทอร์โมคัปเปิลซึ่งอยู่ที่บริเวณต่างๆ ของเครื่องต้มความดันส่งค่าอุณหภูมิในรูปสัญญาณความต่างศักย์มาที่กล่องรับ-ส่งสัญญาณ กล่องรับส่งสัญญาณจะรวบรวมข้อมูลและส่งข้อมูล ไปยังแผ่นวงจร PCI-6014 (อุปกรณ์รับข้อมูลที่ติดตั้งอยู่กับคอมพิวเตอร์) เพื่อเป็นข้อมูลให้กับโปรแกรมควบคุมเครื่องต้มอัดความดันต่อไป



(1)



(2)

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์รับ – ส่งข้อมูล

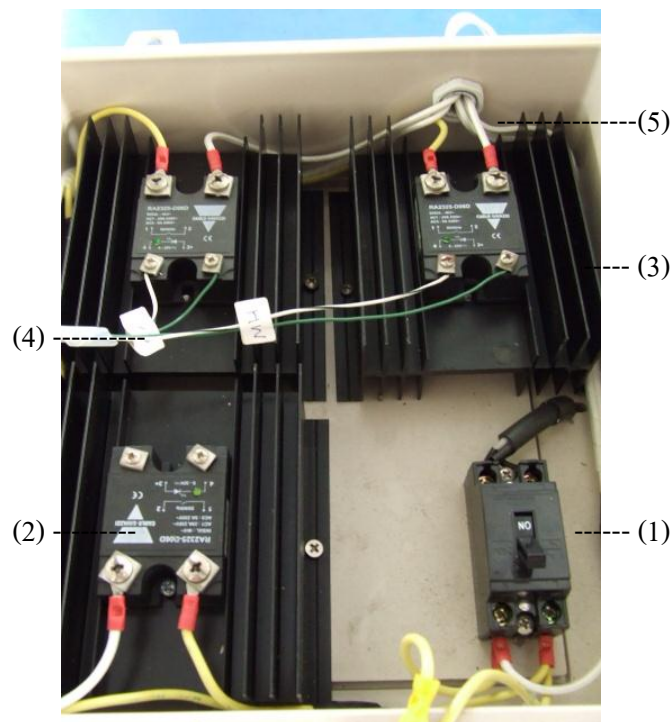
(1) แผ่นวงจร PCI-6014

(2) กล่องรับ-ส่งสัญญาณ (Signal Conditioning Block, SCB) รุ่น SCB-68

3. **คอมพิวเตอร์** เพื่อความถูกต้องและง่ายต่อการใช้งานในการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันในระหว่างกระบวนการต้ม รวมถึงการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิและวิเคราะห์ข้อมูลในการต้มใน

ระหว่างกระบวนการต้ม ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบควบคุมและประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์ เมื่อข้อมูลอุณหภูมิของเครื่องต้มอัดความดันจากกล่องรับ-ส่งสัญญาณถูกส่งมาที่คอมพิวเตอร์ในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก แผ่นวงจร PCI-6014 ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition, DAQ) จะทำการแปลงข้อมูลต่างๆ จากสัญญาณอนาล็อกเป็นข้อมูลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล และส่งไปยังโปรแกรมควบคุมเพื่อทำการประมวลผล ผู้ใช้งานสามารถที่จะตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการต้ม (Temperature Set Point) ได้ตามต้องการบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลโดยเปรียบเทียบข้อมูลอุณหภูมิของเครื่องต้มแรงดันกับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ก่อนส่งสัญญาณดิจิทัลไปยังแผ่นวงจร PCI-6014 เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นความต่างศักย์และส่งไปยังกล่องรับ-ส่งสัญญาณตามลำดับ จากนั้นกล่องรับ-ส่งสัญญาณจะส่งสัญญาณคำสั่งในรูปแบบของความต่างศักย์ไปยังกล่องควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด เพื่อทำการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดต่อไป

4. กล่องควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด ประกอบด้วย เบรกเกอร์ (1) โซลิดรีเลย์ (2) ตัวระบายความร้อนแบบครีบลูก (3) กล่องควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดมีหน้าที่เปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าให้แก่แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด เมื่อทำการเปิดเบรกเกอร์ กระแสไฟฟ้าจะยังไม่ถูกส่งไปยังแผ่นให้ความร้อนซึ่งติดตั้งอยู่ที่เครื่องต้มอัดความดันจนกระทั่งสัญญาณเปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดถูกส่งจากกล่องรับ - ส่งสัญญาณในรูปแบบความต่างศักย์มายังโซลิดรีเลย์ โซลิดรีเลย์จะทำการเปิดวงจรจ่ายไฟฟ้าให้แก่แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดเพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องต้มอัดความดันต่อไป เนื่องจากโซลิดรีเลย์จะทำการเปิด - ปิดวงจรด้วยความรวดเร็วส่งผลให้เกิดความร้อนในตัว โซลิดรีเลย์จึงต้องมีตัวระบายความร้อนแบบครีบลูกอยู่ด้านล่าง



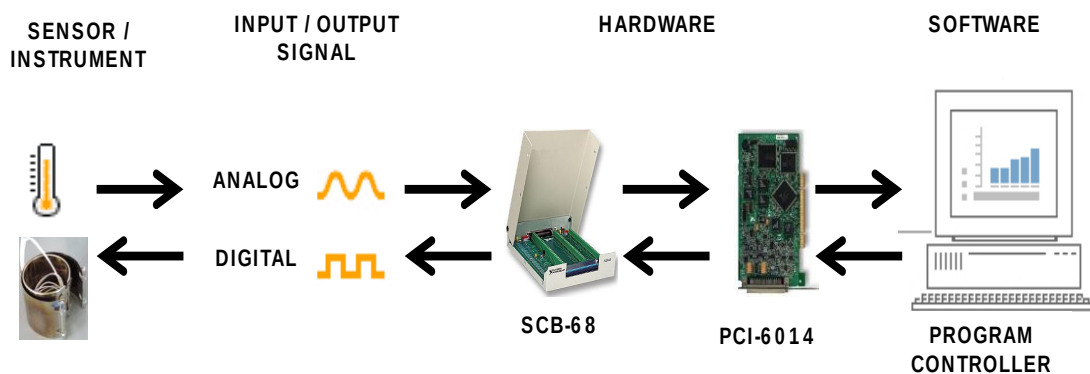
รูปที่ 3.12 กล่องควบคุมการเปิด - ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด

- (1) เบรกเกอร์ ยี่ห้อเนชั่นแนล ขนาด 20 แอมแปร์
- (2) โซลิดีรีเลย์ ยี่ห้อ Carlo Gavazzi ขนาด 25 แอมแปร์ 230 โวลต์
- (3) ตัวระบายความร้อนแบบครีปปลา
- (4) สายสัญญาณจากกล่องรับ-ส่งสัญญาณ
- (5) สายไฟของแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด

5. แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด ขนาด 1500 วัตต์ 220 โวลต์ จำนวน 2 ตัว เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 90 มิลลิเมตรสำหรับหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร และ 150 มิลลิเมตร สำหรับหม้ออัดความดันสำหรับเตรียมน้ำอุณหภูมิต่างๆ ใช้ให้ความร้อนแก่หม้อต้มอัดความดันทั้ง 2 เพื่อให้ได้อุณหภูมิในการต้มตามต้องการ



รูปที่ 3.13 แผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด



รูปที่ 3.14 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมความร้อน

3.3 การพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 7.1

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างโดยบริษัท National Instruments Corporate Headquarters (Texas, USA) ทำงานภายใต้โปรแกรม Microsoft Windows ลักษณะการสร้างและการใช้งานโปรแกรมจะมีลักษณะที่อยู่ในรูปของแผนผัง (Block Diagram) หรือ ไอคอน (Icon) ที่เรียกว่า Graphic Command โปรแกรม LabVIEW สามารถทำหน้าที่ในการอ่าน ควบคุม แสดงผล คำนวณ และบันทึกข้อมูล โดยจะรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ LabVIEW จึงสามารถจำลองข้อมูลที่ปรากฏบนเครื่องมือวัด รวมถึงปุ่มควบคุมต่างๆ มาแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ หรือที่เรียกว่า Virtual Instrument ข้อมูลที่ LabVIEW สร้างขึ้นมาจะเก็บอยู่ในไฟล์ที่มีนามสกุลเป็น VI (filename.VI)

ส่วนประกอบของโปรแกรม LabVIEW 7.1

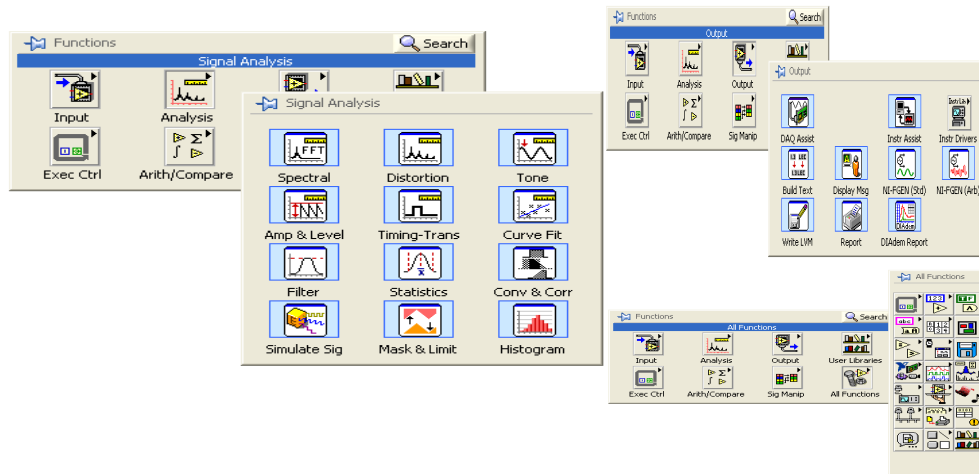
โปรแกรม LabVIEW 7.1 ประกอบด้วย 2 หน้าต่างหลักได้แก่

3.3.1 หน้าต่าง Block Diagram

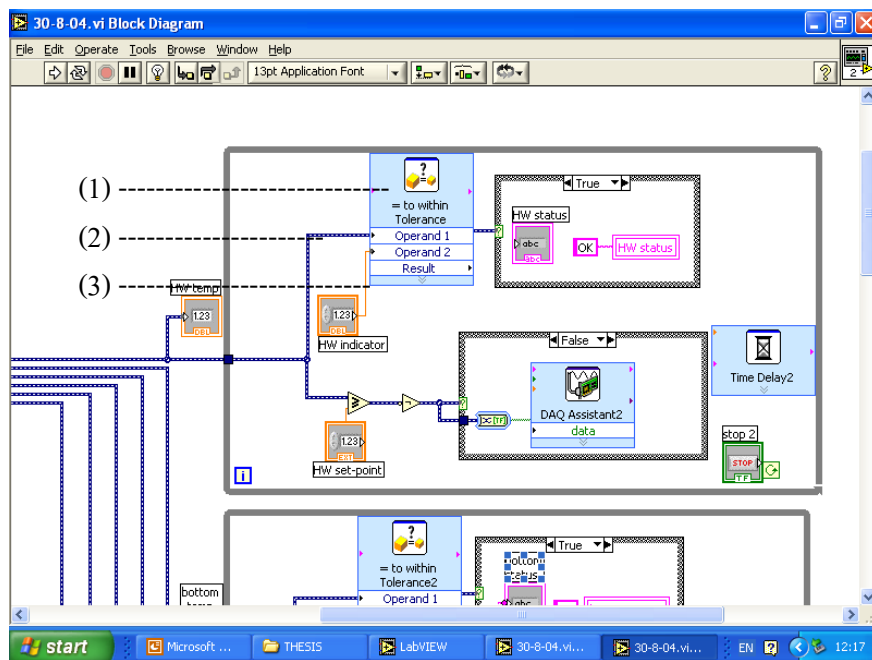
หน้าต่าง Block Diagram (รูปที่ 3.16) เป็นหน้าต่างที่ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุม หรือ โปรแกรมต่างๆที่ต้องการ โดยแสดงแผนผังโครงสร้างของภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมในรูปของคำสั่งที่เป็นสัญลักษณ์ (ไอคอน) ผู้เขียนจะต้องเริ่มจากการวางไอคอนตัวควบคุมและอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องการ (รูปที่ 3.15) จากนั้นทำการเชื่อมคำสั่งด้วยตัวเชื่อม (Connector) โดยไอคอนแต่ละตัวจะมีตัวเชื่อมอยู่ด้วยเสมอ แต่ละไอคอนจะต้องมีข้อมูลเข้ามาถึงทำงานได้ และเมื่อส่งข้อมูลออกไปจะใช้ตัวเชื่อมเป็นตัวแยกข้อมูล ในการเขียนโปรแกรม ผู้เขียนจะต้องทราบถึงความต้องการชนิดของข้อมูลของไอคอนที่ส่งเข้าและชนิดข้อมูลที่นำออกจากไอคอน การรับ-ส่งชนิดของข้อมูลที่ไม่ตรงกันจะไม่สามารถเชื่อมส่งข้อมูลระหว่างไอคอนได้ เพื่อเป็นการระวังข้อผิดพลาด ผู้เขียนอาจสังเกตจากสีของตัวเชื่อม เช่น ตัวเชื่อมสีฟ้า หมายถึงข้อมูลตัวเลขประเภทแปรผัน (เช่น อุณหภูมิ) ตัวเชื่อมสีส้ม หมายถึงข้อมูลตัวเลขประเภทค่าคงที่ การทำงานในส่วนของแผนผังจะมีการทำงานอย่างเป็นลำดับขั้นตอน เริ่มจากส่วนที่เป็นตัวรับข้อมูล ผ่านไปยังตัวควบคุม ตัวประมวลผล แล้วส่งไปยังส่วนแสดงผลเป็นส่วนสุดท้าย

3.3.2 หน้าต่าง Front Panel

หน้าต่าง Front Panel (รูปที่ 3.17) เป็นการแปลงส่วนควบคุมหรือไอคอนต่างๆที่อยู่บนหน้าต่าง Block Diagram มาจำลองให้อยู่ในรูปของ Front Panel โดยผู้ใช้โปรแกรมสามารถนำรูปภาพมาประกอบเป็นพื้นหลังเพื่อความเข้าใจในการใช้งาน หน้าต่าง Front Panel แสดงถึงผลข้อมูลที่ได้มาจากเครื่องมือวัด (Sensor) นอกจากนี้ ยังแสดงตัวควบคุมต่างๆเช่น ตัวควบคุมแบบตัวเลขใช้ในการตั้งค่าเพื่อทำการเปรียบเทียบ ตัวควบคุมแบบ Boolean (True/False) และตัวควบคุมแบบข้อความ เป็นต้น ซึ่งการแสดงผลและตัวควบคุมต่างๆ เหล่านี้สามารถที่จะกำหนดสี รูปแบบ และจัดตำแหน่งร่วมกับรูปภาพได้ตามต้องการ

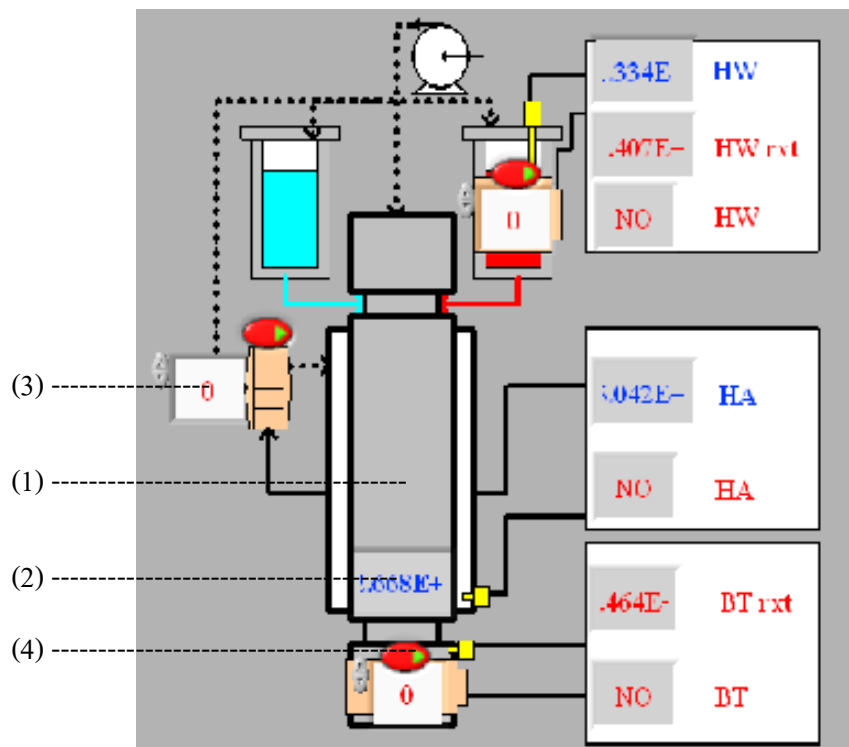


รูปที่ 3.15 ไอคอนรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 3.16 หน้าต่าง Block Diagram

- (1) ไอคอนคำสั่งเปรียบเทียบ
- (2) ตัวเชื่อมสีฟ้า แสดงข้อมูลตัวเลขประเภทแปรผัน
- (3) ตัวเชื่อมสีส้ม แสดงข้อมูลตัวเลขประเภทค่าคงที่



รูปที่ 3.17 หน้าต่าง Front Panel

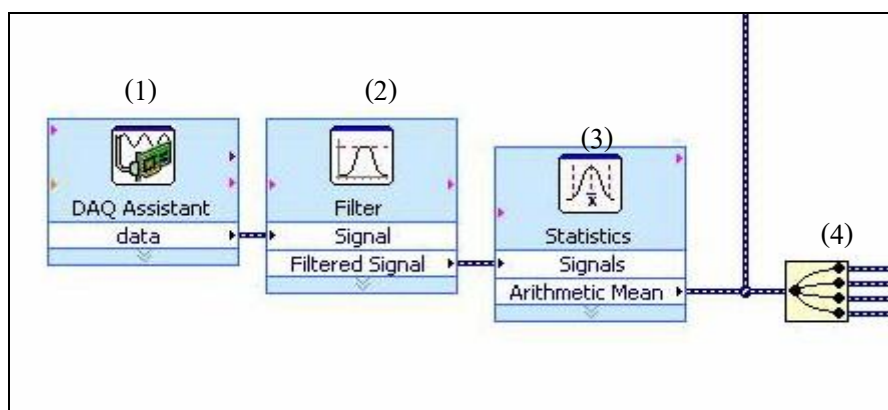
- (1) รูปภาพที่นำมาประกอบเป็นพื้นหลังเพื่อความเข้าใจในการใช้งาน
- (2) ข้อมูลที่ได้มาจากเครื่องมือวัด
- (3) ตัวควบคุมแบบตัวเลขค่าคงที่
- (4) ตัวควบคุมแบบ Boolean (True/False)

3.3.2 การพัฒนาระบบควบคุม โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 7.1

การพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 7.1 เริ่มจากการเขียนโครงสร้างของโปรแกรมในหน้าต่าง Block Diagram โดยการสร้างไอคอน DAQ assistant (ดังรูปที่ 3.18) ซึ่งเป็นไอคอนที่ติดต่อทำการรับข้อมูลจากแผ่นวงจร PCI 6014 โดยแผ่นวงจรนี้ทำการรับข้อมูลอุณหภูมิจากบริเวณต่างๆ ของเครื่องต้มแรงดันที่ถูกส่งจากกล่องรับ-ส่งสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลไว้ที่ 1,000 ข้อมูลต่อวินาที เนื่องจากสัญญาณอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลอ่านเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ขณะเก็บสัญญาณอาจมีข้อมูลที่ผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวน ดังนั้นข้อมูลอุณหภูมิจากบริเวณต่างๆ ของเครื่องต้มแรงดันจะถูกทำการวิเคราะห์โดยผ่านการแยกข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ ไอคอน Filter และหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ด้วยไอคอน Statistics ก่อนนำไปบันทึกและแยกสัญญาณข้อมูลอุณหภูมิจากบริเวณต่างๆ ออกจากกันเพื่อนำไปใช้ต่อไป

ข้อมูลอุณหภูมิจากบริเวณต่างๆของเครื่องต้มอัดแรงดันที่แยกออกจากกันแล้ว จะถูกนำเสนอบนหน้าจอหน้าต่าง Front Panel ด้วยไอคอนควบคุมการแสดงผล เพื่อแจ้งให้ผู้ใช้งานทราบถึงอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ของเครื่องต้มอัดความดัน (ดังรูปที่ 3.19) จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (เพื่อลดค่า Over Shoot) และเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการต้มด้วยไอคอนตัวควบคุมค่าคงที่ (ดังรูปที่ 3.19) ซึ่งสามารถกำหนดได้จากหน้าต่าง Front Panel หลังจากการเปรียบเทียบ สัญญาณข้อมูลจะออกมาในรูปของข้อมูลประเภท Boolean ก่อนส่งไปยัง DAQ Assistant เพื่อแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วส่งไปยังกล่องรับ-ส่งสัญญาณ จากนั้นกล่องรับ-ส่งสัญญาณจะทำการส่งสัญญาณดิจิทัลในรูปแบบของความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV) ไปยัง โซลิดรีเลย์ เพื่อทำการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนที่ติดอยู่กับตัวเครื่องที่จุดต่างๆต่อไป

บนหน้าต่าง Front Panel ของระบบควบคุมที่เขียนขึ้นจะแสดงอุณหภูมิของน้ำภายในหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร หม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อน อุณหภูมิต่างๆ และอุณหภูมิของตัวหม้อทั้งสอง ในระหว่างการทดลองค่าอุณหภูมิ ณ บริเวณต่างๆ ของหม้อต้มแรงดันในระหว่างกระบวนการต้มสามารถที่จะตั้งเวลาในการบันทึกข้อมูลได้ ระบบควบคุมการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.20 ผู้ใช้งานสามารถที่จะตั้งความถี่ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในระดับ วินาที นาที และชั่วโมง คอมพิวเตอร์จะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและเวลา ระหว่างกระบวนการต้มในรูปของไฟล์อักษร (.txt) ซึ่งเป็นไฟล์ขนาดเล็ก และสามารถแปลงเป็นไฟล์ชนิดอื่นได้ นอกจากนี้ในระหว่างการทดลอง ผู้ใช้งานสามารถตั้งเวลาเพื่อแสดงไฟสัญญาณเตือนเมื่อถึงเวลาที่ต้องทำการเก็บตัวอย่างได้ รูปที่ 3.21 แสดงโปรแกรมจับเวลาพร้อมไฟสัญญาณเตือน



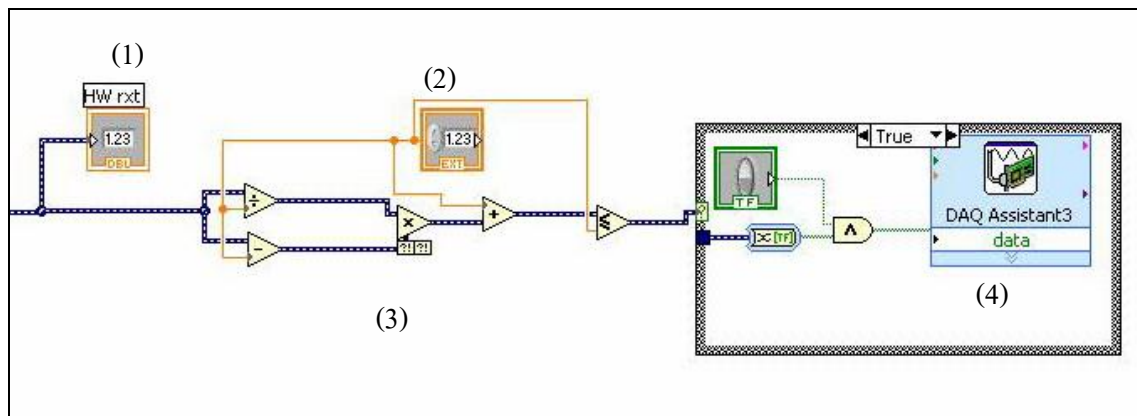
รูปที่ 3.18 ไอคอนอุปกรณ์รับข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

(1) ไอคอน DAQ Assistant

(2) ไอคอน Fitter

(3) ไอคอน Statistics

(4) ไอคอนแยกสัญญาณข้อมูล



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการเปรียบเทียบอุณหภูมิ และส่งสัญญาณไปยังกล่องรับ-ส่งสัญญาณ

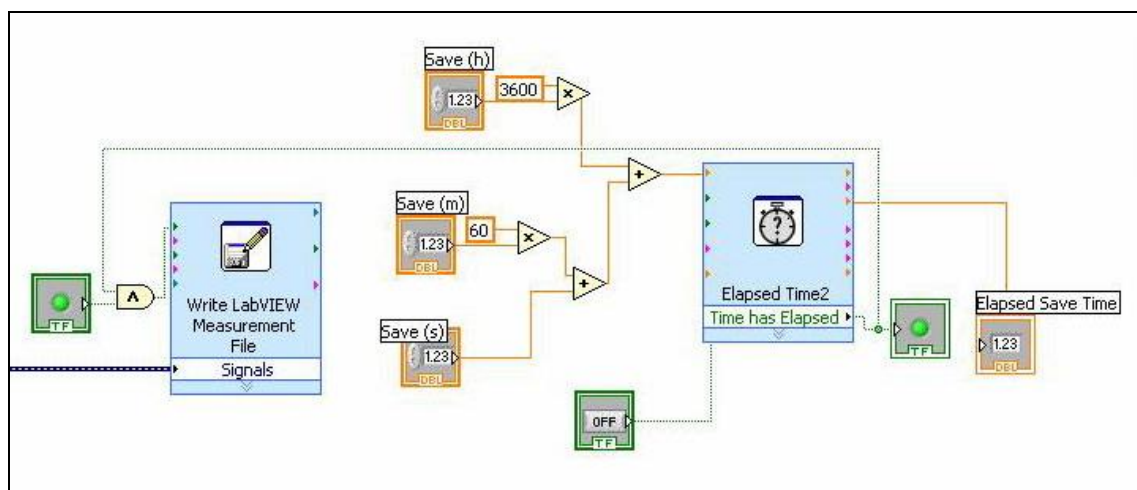
บนหน้าต่าง Block Diagram

(1) ไอคอนควบคุมการแสดงผล

(2) ไอคอนตัวควบคุมค่าคงที่

(3) การคำนวณแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบกับค่าคงที่

(4) ไอคอนDAQ Assistant ส่งสัญญาณไปยังกล่องรับ-ส่งสัญญาณ

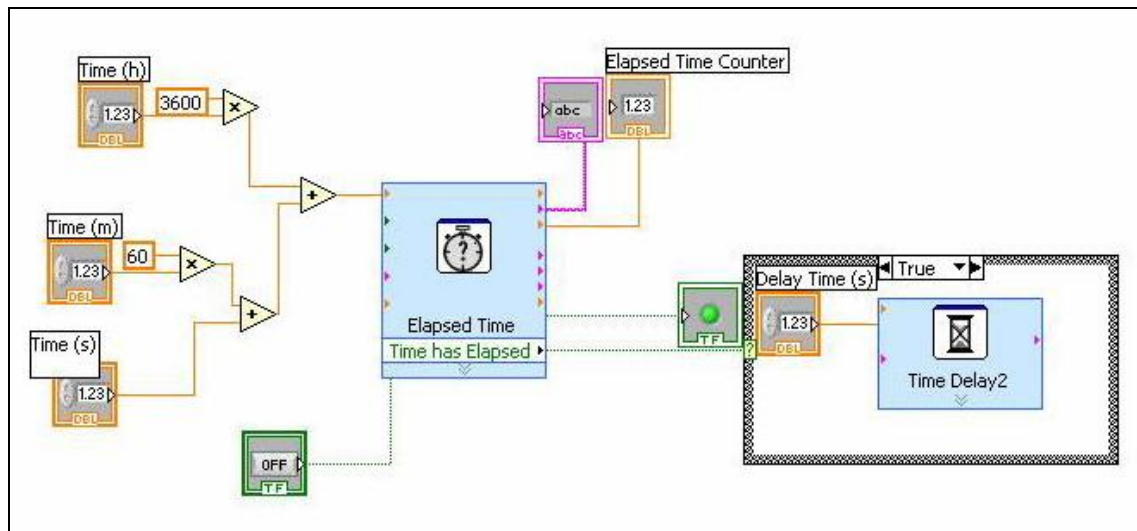


รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการตั้งเวลาเพื่อเก็บบันทึกข้อมูล บนหน้าต่าง Block Diagram

(1) ไอคอนเปรียบเทียบเวลา

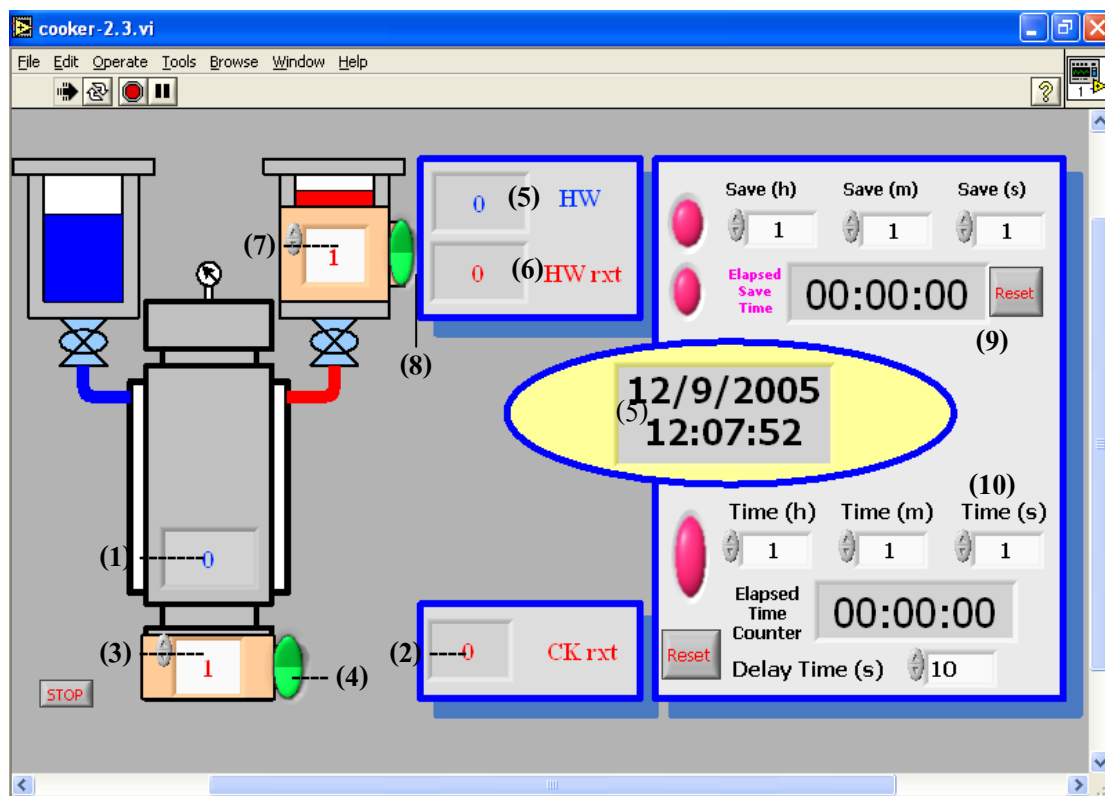
(2) ไอคอนบันทึกผล

(3) ข้อมูลอุณหภูมิ



รูปที่ 3.21 โปรแกรมจับเวลาพร้อมไฟสัญญาณเตือน

- (1) ไอคอนเปรียบเทียบเวลา
- (2) ไอคอนไฟสัญญาณเตือน



รูปที่ 3.22 หน้าต่าง Front Panel ของระบบควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์

- (1) ค่าอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร
- (2) ค่าอุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร
- (3) ค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการต้ม (Temperature set point) ของหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร
- (4) ปุ่มเปิด-ปิดการใช้งานแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดของหม้อต้มอัดความดันสำหรับการต้มวัสดุอาหาร
- (5) ค่าอุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ
- (6) ค่าอุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ
- (7) ค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการต้ม (Temperature set point) ของหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับการลดอุณหภูมิหม้อต้ม
- (8) ปุ่มเปิด-ปิดการใช้งานแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดของหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ
- (9) ชุดจับเวลาในการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการต้ม
- (10) ชุดจับเวลาในการเก็บตัวอย่างวัสดุอาหาร

3.4 การใช้งานเครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ

กระบวนการต้มวัสดุอาหารด้วยเครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ มีวิธีการใช้งานดังนี้

3.4.1. การเตรียมสถานะการต้ม

ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมน้ำร้อนในหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ และการปรับอุณหภูมิของหม้อต้มความดันให้พร้อมใช้งาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นเตรียมสถานะ (อุณหภูมิและความดัน) การต้มให้พร้อมที่จะทำการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมน้ำร้อนเริ่มจากเติมน้ำลงในหม้อต้มอัดความดันสำหรับการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ เมื่อเปิดระบบควบคุม บนหน้าต่าง Front Panel คอมพิวเตอร์จะแสดงค่าอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของเครื่องต้มแรงดัน แล้วทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากเครื่องต้มแรงดันกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้ในการกระบวนการต้ม ผู้ทดลองสามารถตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หากอุณหภูมิในหม้อต้มอัดความดันหรืออุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันต่างๆ มีค่าน้อยกว่า

อุณหภูมิที่ต้องการ โปรแกรมควบคุมจะส่งสัญญาณไปยังกล่องควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดเพื่อทำการเปิดแผ่นความร้อนให้ทำงาน แต่หากอุณหภูมิในหม้อต้มอัดความดันหรืออุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันต่างๆ มีค่ามากกว่าที่จะทำการปิดแผ่นให้ความร้อน (รูปที่ 3.23 (1)) เมื่อน้ำในหม้อต้มอัดความดันและอุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันต่างๆ มีอุณหภูมิตามต้องการแล้ว ให้ปรับความดันในหม้อต้มอัดความดันสำหรับใช้ในการเตรียมน้ำร้อนโดยใช้ปั๊มลมเพื่อให้มั่นใจว่าน้ำที่เตรียมมีสถานะเป็นของเหลว (รูปที่ 3.23 (2))

3.4.2 การต้มวัสดุอาหารที่สภาวะต่างๆ

ขั้นตอนนี้จะทำการควบคุมสภาวะการต้มให้คงที่ตั้งแต่เนื้อวัสดุสัมผัสน้ำร้อนจนกระทั่งเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอาหารที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลมาจากสภาวะที่ต้องการศึกษาเพียงอย่างเดียว ไม่มีผลของการต้มในสภาวะอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง

เมื่อน้ำในหม้อต้มอัดความดันและอุณหภูมิของหม้อต้มอัดความดันต่างๆ มีอุณหภูมิตามต้องการแล้วขั้นตอนต่อมาบรรจุวัสดุอาหารตัวอย่างลงในตะกร้าและทำการหย่อนลงในหม้อต้มความดัน ปิดส่วนฝาบนหม้ออัดความดัน รัดสายรัดสแตนเลสให้แน่น (รูปที่ 3.23 (3)) เปิดบอลลวล์ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำร้อนให้น้ำร้อนที่เตรียมไหลลงในหม้อต้มโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน (Pressure Gradient) และความแตกต่างของระดับน้ำในการถ่ายเทมวลของน้ำร้อนจากหม้อที่ใช้เตรียมน้ำสู่หม้อต้มวัสดุอาหาร เมื่อทำการเปิดวาล์วให้น้ำร้อนสัมผัสกับวัสดุอาหาร หรือกระบวนการต้มเริ่มขึ้นให้เริ่มจับเวลาที่ใช้ในการต้มในขั้นตอนนี้ โดยการคลิกที่ปุ่ม Reset ของชุดจับเวลาในการเก็บตัวอย่างวัสดุอาหารบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ นาฬิกาของชุดจับเวลาจะเริ่มจากศูนย์และเปรียบเทียบกับค่าเวลาที่ตั้งไว้ ขั้นตอนต่อมาปรับความดันให้ได้ตามต้องการผ่านโดยใช้ปั๊มลม (รูปที่ 3.23 (4)) ในขั้นตอนเปิดวาล์วน้ำร้อนจนกระทั่งปรับความดันเสร็จไม่ควรใช้เวลาเกิน 15 วินาที เมื่อทำการปล่อยน้ำร้อนลงในหม้อต้มเสร็จแล้ว ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัดให้ความร้อนแก่หม้อต้มอัดความดันสำหรับใช้ในการเตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิต่างๆ ที่ปุ่มเปิด-ปิดบนหน้าจอ Front Panel

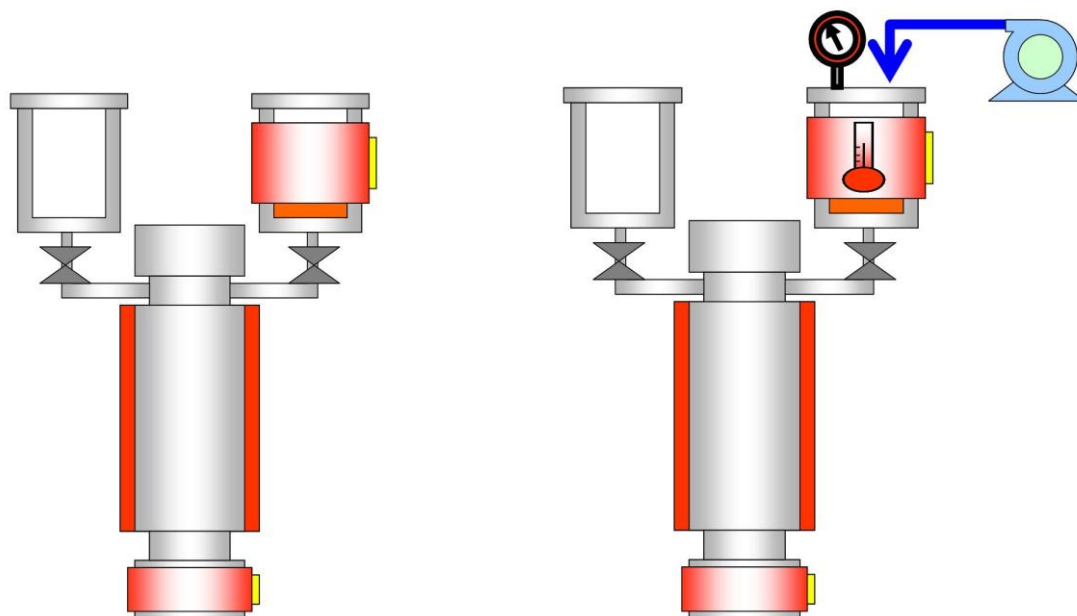
3.4.3 การเตรียมน้ำเย็น

หลังเสร็จสิ้นการต้ม หากมีความร้อนเหลืออยู่ในวัสดุอาหารหลังจากกระบวนการต้ม ย่อมส่งผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเคมีและกายภาพของตัวอย่างวัสดุอาหารต่อไป เพื่อเป็นการลดผลกระทบเนื่องจากความร้อนที่เหลืออยู่ การทำให้วัสดุอาหารเย็นทันทีเป็นสิ่งที่จำเป็น ดังนั้นก่อนเสร็จสิ้นการต้มควรมีการเตรียมน้ำเย็นไว้ล่วงหน้า ซึ่งสามารถทำได้โดยเติมน้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 0 องศา

เซลล์เชิงกลในหม้อน้ำเย็นอัดความดันสำหรับใช้ในการลดอุณหภูมิหม้อต้มและวัสดุอาหาร แล้วเพิ่มความดันด้วยปั๊ม โดยความดันในหม้อน้ำเย็นอัดความดันควรมากกว่าความดันในหม้อต้มอัดความดันที่ใช้ในการต้มวัสดุอาหาร เพื่อให้ น้ำเย็นสามารถไหลลงไปยังหม้อต้มอัดความดันได้

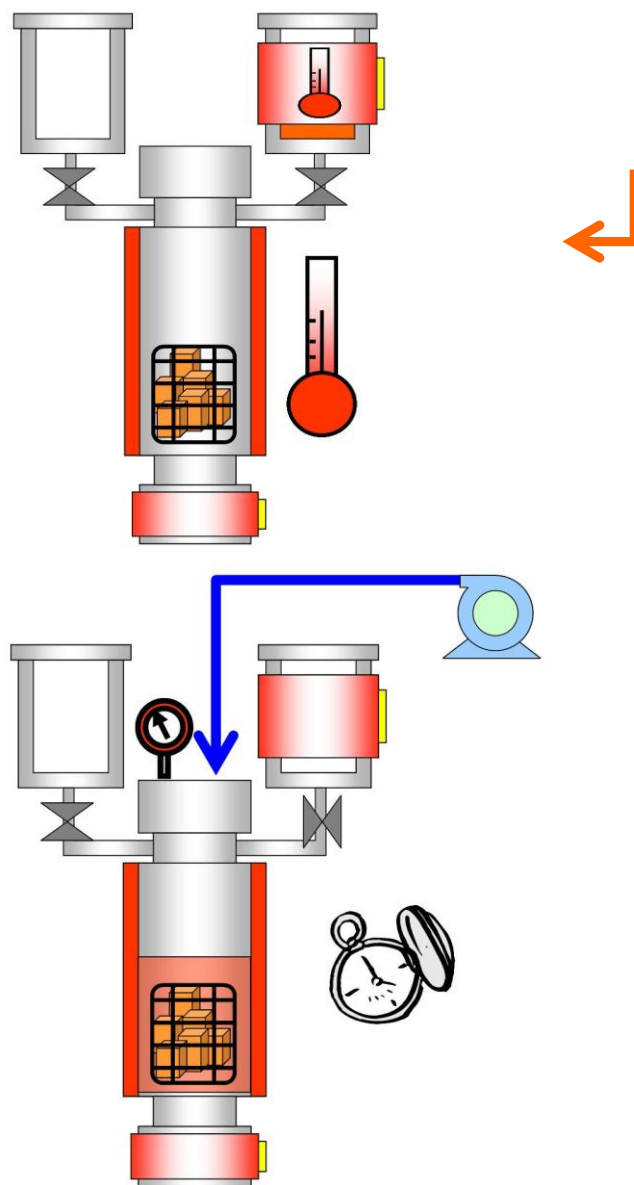
3.4.4 การเก็บตัวอย่างวัสดุอาหาร

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการต้มวัสดุอาหารที่สภาวะต่างๆแล้ว (หรือถึงเวลาที่ต้องการเก็บตัวอย่าง) ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเป็นอีกขั้นตอนที่สำคัญ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการต้มวัสดุอาหารที่สภาวะต่างๆแล้ว เปิดบอลลวล์ส่วนเชื่อมต่อหม้อน้ำเย็นให้น้ำเย็นไหลลงในหม้อต้มอัดความดันพร้อมกับปล่อยความดันภายในหม้อต้มอัดความดันเล็กน้อยทางวาล์วปล่อยความดัน เพื่อให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างหม้อทั้งสอง เมื่อน้ำเย็นไหลลงในหม้อต้มอัดความดัน อุณหภูมิของวัสดุอาหารและน้ำในหม้อต้มจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจึงปล่อยความดันในหม้อต้มวัสดุอาหารออกให้หมด (รูปที่ 3.23 (5)) และปล่อยน้ำออกจากหม้อต้มอัดความดันทางบอลลวล์ซึ่งอยู่ด้านล่าง สุดท้ายนำวัสดุอาหารออกจากหม้อต้มความดันไปแช่ในน้ำเย็นอีกครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีความร้อนเหลือจากกระบวนการต้ม แล้วจึงนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆต่อไป (รูปที่ 3.23 (6))



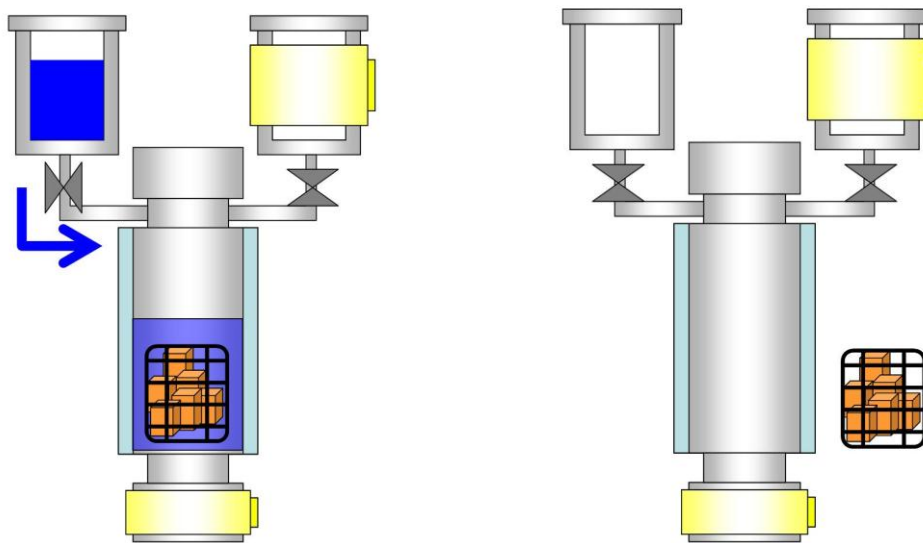
(1) เปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด

(2) เพิ่มความดัน



(3) ใส่วัสดุอาหาร ปิดฝาเครื่องต้มอัดความดัน

(4) ปล่อยน้ำร้อนสู่หม้อต้มอัดความดัน
เพิ่มความดัน จับเวลา



- (5) ปล่อยน้ำเย็นสู่หม้อต้มอัดความดัน (6) นำวัสดุอาหารออก ปล่อยน้ำ
ปิดแผ่นให้ความร้อนชนิดสายรัด
ปล่อยความดัน

รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการใช้เครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ

บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแครอทภายใต้สภาวะกระบวนการต้มเนื้อจุดเดือดสำหรับการผลิตอาหารเหลว ผู้ดำเนินงานวิจัยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาเครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการพัฒนาเครื่องต้มความดันต่อจากหม้อต้มความดันแบบ ซึ่งถูกสร้างโดย พงษ์ธร ลีลายุทธสุนทร (2547) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงรูปแบบเครื่องต้มความดันให้สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบควบคุมและติดตามผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำการพัฒนาโปรแกรมควบคุมและติดตามผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 7.1 เพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องต้มแรงดันให้สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก และมีความถูกต้องและแม่นยำในการควบคุม โดยมีรายละเอียดดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในส่วนที่สองของงานวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะกระบวนการต้มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแครอทต้ม ซึ่งได้แก่ การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ลักษณะเนื้อสัมผัส โครงสร้างภายใน สี และปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินงานวิจัยดังนี้

4.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์และสารเคมี

4.1.1 วัตถุดิบ

1. แครอทสีส้ม (*Daucuc carota* L.) จากตลาดราชภัฏวชิรญาณ ถนนประชาอุทิศ กรุงเทพมหานคร

4.1.2. อุปกรณ์ และสารเคมี

1. เครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) ยี่ห้อ Stable Micro System รุ่น TA-XT2i ประเทศอังกฤษ
3. เครื่องวัดสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Juki รุ่น JP7100 ประเทศญี่ปุ่น
4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2100 PC ประเทศญี่ปุ่น
5. เครื่อง Homogenizer ยี่ห้อ IKA LABOTECHNIK รุ่น T25 basic
6. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น D06064 Modell 800 ประเทศเยอรมนี
7. ตู้ดูดความชื้น (Electronic Dry Cabinet) ยี่ห้อ Weifo รุ่น DRY-60 ประเทศไต้หวัน
8. เครื่องทำแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer) ยี่ห้อ Labconco รุ่น 77550 ประเทศสหรัฐอเมริกา

9. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscopy) ยี่ห้อ Joel รุ่น JSM-5410 LV ประเทศญี่ปุ่น
10. เครื่องเคลือบทอง (Fine Coater) ยี่ห้อ Joel รุ่น JFC-1200 ประเทศญี่ปุ่น
11. เครื่องปั่น (Chopper Grinder) ยี่ห้อ Waring รุ่น WCG 75 E/K
12. บั้มลม ยี่ห้อ Abac รุ่น Pole Position 221 CE ประเทศอิตาลี
13. บั้มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Gast รุ่น 0532-V4-G21DX
14. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius Basic รุ่น Ba4100s ประเทศเยอรมนี
15. Ethyl Alcohol Absolute ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศเยอรมนี
16. Acetone ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศเยอรมนี

4.2 การศึกษาผลของสภาวะกระบวนการต้มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแครอท

4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและสภาวะในการต้ม

ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของสภาวะในการต้มซึ่งได้แก่อุณหภูมิและความดันในการต้ม ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแครอทด้วยเครื่องต้มความดันดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ นำแครอทสีส้มสดซึ่งซื้อจากตลาดมาล้างและตัดแต่งให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขาวด้านละ 10 มิลลิเมตร จากนั้นแยกชิ้นแครอทที่ได้จากบริเวณส่วนแกนกลางออก เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีสีใสและมีลักษณะฝ่อในบางลูก เก็บชิ้นแครอทตัวอย่างจำนวน 30 ชิ้น (แครอทจำนวน 5 หัว หัวละ 6 ชิ้น) ในภาชนะป้องกันแสง เพื่อรอนำไปผ่านขั้นตอนการต้มเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่อไป

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการต้มที่ อุณหภูมิ 4 ระดับ คือ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส และความดัน 4 ระดับ คือ ความดันบรรยากาศ 0, 2, 4 และ 6 บาร์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 สภาวะการต้มที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)			
	0	2	4	6
80	(ก)	(ก)	(ก)	(ก)
100	(ก)	(ก)	(ก)	(ก)
120	(ข)	(ก)	(ก)	(ก)
140	(ข)	(ข)	(ก)	(ก)

หมายเหตุ (ก) สภาวะการต้มที่สามารถทำการทดลองได้

(ข) สภาวะการต้มที่ไม่สามารถทำการทดลองได้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสามารถทำการทดลองได้เพียง 13 การทดลอง จากการวางแผนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง เนื่องจากภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 0 บาร์ สภาวะอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 0 และ 2 บาร์ ไม่สามารถทำการทดลองได้เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าว น้ำไม่อยู่ในสถานะของเหลว

4.2.2 ขั้นตอนการต้ม

ในขั้นตอนการต้ม นำแครอทที่หั่นแล้วจำนวน 30 ชิ้นใส่ลงในตะกร้าซึ่งทำขึ้นสำหรับใส่วัสดุอาหารแล้วเปิดเครื่องต้มความดันต้นแบบ (ซึ่งมีวิธีการใช้งานดังกล่าวในบทที่ 3) โดยใช้ปริมาณน้ำในการต้ม 500 มิลลิลิตร ปรับสภาวะที่ใช้ในการต้มให้พร้อมใช้งาน เมื่อเครื่องต้มความดันพร้อมใช้งาน นำแครอทไปต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ต้องการศึกษา จากนั้นตัวอย่างแครอทที่ได้มาทำการวิเคราะห์ปริมาณค่าความชื้นด้วยวิธี Direct Heating Method (AOAC, 1984) ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Compression Test โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ศึกษาโครงสร้างภายในของแครอทที่ถูกต้มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscopy; SEM) ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) และปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Total Carotenoids) ด้วยวิธีของ Talcott และคณะ (2000) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.3 – 4.2.7 ตามลำดับ

4.2.3 การวัดปริมาณความชื้นของแครอท

นำตัวอย่างที่ผ่านการต้มหนัก 2 ± 0.1 กรัม ไปทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของแครอทด้วยวิธี Direct Heating Method (AOAC, 1984) รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ปริมาณความชื้นมีดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักด้วยอวลูมิเนียมพร้อมฝา ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและนำไปอบหลายๆครั้ง จนน้ำหนักที่ได้คงที่
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ด้วยอวลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยเปิดฝาชะอบ จากนั้นนำออกจากตู้อบลมร้อน ปิดฝา และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักและนำไปอบหลายๆครั้ง จนน้ำหนักที่ได้คงที่
3. คำนวณปริมาณความชื้นจากสมการที่ 4.1

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{(\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}) \times 100}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \quad (4.1)$$

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในตัวอย่างแครอทจะทำจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ดังสมการ 4.2

$$\text{ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ปริมาณความชื้นหลังการต้ม}}{\text{ปริมาณความชื้นก่อนการต้ม}} \quad (4.2)$$

4.2.4 การวัดเนื้อสัมผัสของแครอท

วัดค่าความแข็งของแครอทโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (รูปที่ 4.1) ด้วยวิธี Compression Test โดยใช้หัวกดอวลูมิเนียม รูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ซึ่งต่อกับ Load cell ของเครื่อง ขนาด 25 กิโลกรัม ความเร็วของหัวกดขณะเคลื่อนที่ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะทางการกดของหัวกด ร้อยละ 1 และ ร้อยละ 30 ค่าของแรงสูงสุดที่กดลงบนแครอทครั้งแรก หมายถึงค่าความแข็งมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) นำค่าความแข็งของตัวอย่าง 15 ตัวอย่างมาคำนวณค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณค่าความแข็งสัมพัทธ์จากสมการที่ 4.3

$$\text{ค่าความแข็งสัมพัทธ์} = \frac{\text{ค่าความแข็งเฉลี่ยหลังการต้ม}}{\text{ค่าความแข็งเฉลี่ยก่อนการต้ม}} \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.1 เครื่อง Texture Analyzer

4.2.5 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของแครอท

โดยนำตัวอย่างแครอทที่ผ่านการต้มไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบระเหิด (Freeze Dryer) โดยมีความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 5 ก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscopy; SEM) การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแครอทที่ถูกต้มสามารถทำได้โดยหักแครอทตามแนวขวางและพิจารณาบริเวณระยะ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ถัดจากผิวรอบนอกของตัวอย่างแครอทที่ถูกหัก จากนั้นเคลือบทองตัวอย่างด้วยเครื่องเคลือบทอง (Fine Coater) และทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

4.2.6 การวัดสีของแครอท

นำตัวอย่างแครอทจำนวน 30 ชิ้น มาปั่นรวมกันและวัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Juki รุ่น JP7100 (รูปที่ 4.2) ขนาดเลนส์ 30 มิลลิเมตร โดยบรรจุแครอทที่ถูกปั่นลงใน Cuvette รูปทรงกระบอก (ดังรูปที่ 4.3) จากนั้นวัดค่าสี จำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ครั้ง ค่าสีที่วัดได้จะอยู่ในรูปของระบบ ICI Coordinates (L^* , a^* , b^*) โดยที่ L^* จะแสดงช่วงสีขาว (Whiteness) ถึงสีดำ (Darkness) ค่า a^* จะแสดงช่วงสีแดง (Redness) ถึงสีเขียว (Greenness) และค่า b^* จะแสดงช่วงสีฟ้า (Blueness) ถึงสีเหลือง (Yellowness) จากนั้นค่าสีที่วัดได้ในแต่ละสถานะจะถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าสีสัมพัทธ์ดังสมการ 4.4

$$\text{ค่าสีสัมพัทธ์} = \frac{\text{ค่าสีของแครอทที่วัด } (L^*, a^*, b^*) \text{ ได้หลังการต้ม}}{\text{ค่าสีของแครอทที่วัด } (L^*, a^*, b^*) \text{ ได้ก่อนการต้ม}} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.2 เครื่องวัดสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Juki รุ่น JP7100



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างแครอทที่นำไปวัดค่าสี

4.2.7 การวัดปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในแครอท

นำชิ้นแครอทจำนวน 30 ชิ้น มาวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด โดยลดอุณหภูมิตัวอย่างแครอทอย่างรวดเร็วด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส เพื่อหยุดปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากนั้นนำ

ตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดด้วยวิธีของ Tolcott และคณะ (1984) รายละเอียดวิธีวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดมีดังนี้

1. นำตัวอย่างแครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่ศึกษา จำนวน 30 ชิ้น มาปั่นรวมกันด้วยเครื่องปั่น
2. นำตัวอย่างที่ปั่นแล้ว ประมาณ 1 กรัม เติมด้วยสารละลายผสมระหว่าง เอทิล แอลกอฮอล์ และอะซิโตน ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศเยอรมนี (50:50) 30 มิลลิลิตร และนำไปโฮโมจีไนซ์ด้วยเครื่อง Homogenizer ยี่ห้อ IKA LABOTECHNIK รุ่น T25 basic นาน 1 นาที
3. นำตัวอย่างผสมที่ได้เทบนกรวยกรองแล้วกรองด้วยปั๊มสุญญากาศ ผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างกากแครอทด้วยสารละลาย เอทิล แอลกอฮอล์และอะซิโตน จนกระทั่งกากแครอทไม่มีสี
4. ปรับปริมาตรสารละลายสุดท้ายให้เท่ากับ 50 มิลลิลิตร ด้วยสารละลาย เอทิล แอลกอฮอล์ และอะซิโตน
5. สารละลายที่ได้จะถูกนำไปวัดค่าดูดซับแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2100 PC ประเทศญี่ปุ่น ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในตัวอย่างจากสมการที่ 4.5

$$\mu\text{g carotenoid/g tissue} = (A \cdot V \cdot 10^6) / (A^{1\%} \cdot 100 \cdot G) \quad (4.5)$$

เมื่อ	A	=	ค่าการดูดซับ ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร
	V	=	ปริมาตรทั้งหมดของสารละลาย ด้วยสารละลาย เอทิล แอลกอฮอล์ และอะซิโตน (มิลลิลิตร)
	G	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
	$A^{1\%}$	=	Specific Extinction Coefficient (2,500)

การวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในตัวอย่างแครอทจะทำจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าปริมาณแคโรทีนอยด์สัมพัทธ์ดังสมการ 4.6

$$\text{ปริมาณแคโรทีนอยด์สัมพัทธ์} = \frac{\text{ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดหลังการต้ม}}{\text{ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดก่อนการต้ม}} \quad (4.6)$$

4.2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในงานวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองด้วยวิธี Full Factorial Design จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Turkey's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) และคำนวณค่าเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์

บทที่ 5 ผลการทดลองและบทวิจารณ์

งานวิจัยนี้เน้นการพัฒนาและปรับปรุงเทคโนโลยีการต้มให้มีประสิทธิภาพ มีความแปลกใหม่ของผลิตภัณฑ์ และได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงต่อต้องการของผู้บริโภค ความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุอาหารเนื่องจากสภาวะการต้มเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการต้มเป็นกระบวนการทำสุกที่ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม โดยกระบวนการให้ความร้อนลักษณะนี้มีส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุอาหาร เช่น ความแข็ง เนื้อสัมผัส กลิ่น สี รสชาติ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุอาหาร โดยตัวอย่างวัสดุอาหารที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือแครอท

5.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของแครอทที่ผ่านกระบวนการต้มที่อุณหภูมิสูง

การทดลองในงานวิจัยนี้เริ่มจากการต้มแครอทขนาด $1 \times 1 \times 1$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 30 ชิ้น ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ ทำการต้มแครอทภายใต้สภาวะการต้มเหนือจุดเดือดปกติ ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 80 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 0.2, 4 และ 6 บาร์ โดยใช้เครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้น (ดังอธิบายรายละเอียดในบทที่ 3) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแครอทที่ถูกต้ม ณ เวลาต่างๆ และนำตัวอย่างแครอทที่ได้มาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เทียบกับเวลาโดยคุณสมบัติทางกายภาพของแครอทที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ได้แก่ ค่าความชื้น ความแข็งของเนื้อสัมผัส และลักษณะโครงสร้างภายใน

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้น

หลังจากทำการต้มแครอทที่สภาวะและเวลาต่างๆ แล้ว ตัวอย่างแครอทจะถูกนำไปหาค่าความชื้นด้วยวิธี Direct Heating Method (AOAC, 1984) จากนั้นนำค่าความชื้นที่ได้มาคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ (หรือค่าความชื้น ณ เวลาในต้มใดๆ ของแครอท เทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น) และนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สภาวะการต้มต่างๆ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.1 - 5.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ขณะต้ม และรูปที่ 5.5 - 5.8 เป็นการเปรียบเทียบผลของความดันภายในหม้อต้มโดยกราฟเหล่านี้ใช้แสดงผลของสภาวะที่ใช้ในการต้มต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของตัวอย่างแครอท

5.1.1.1 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการต้ม

หลังจากผ่านกระบวนการต้มแครอทจะถูกนำไปหาค่าปริมาณความชื้น และค่าความชื้นสัมพัทธ์ตามลำดับ เมื่อนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากผลการทดลองมาสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์กับเวลาในการต้ม โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากสภาวะอุณหภูมิในการต้มที่ต่างกัน (80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส) ที่ความดันคงที่โดยทดลองที่ความดันต่างๆ (0, 2, 4 และ 6 บาร์ ตามลำดับ) ได้เส้นความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.1 – 5.4 ตามลำดับ

จากรูปแสดงผลของความชื้นในระหว่างกระบวนการต้มและเวลาต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของชิ้นแครอททั้ง 4 รูป พบว่าในช่วงระยะเวลาการต้ม 15 นาที ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของตัวอย่างแครอทที่ต้มภายใต้อุณหภูมิสูงมีค่าความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าการต้มที่อุณหภูมิต่ำ ณ ช่วงระยะเวลาการต้มที่เท่ากัน โดยหลังการต้มนาน 15 นาที ตัวอย่างแครอทที่ต้มภายใต้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสมีค่าความชื้นสัมพัทธ์หลังการต้มสูงที่สุด และรองลงมาได้แก่ที่อุณหภูมิ 120 100 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากผลการคำนวณทางสถิติด้วยวิธี Turkey's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าค่าความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทที่ต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของระดับอุณหภูมิในการต้มส่งผลต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของตัวอย่างแครอทที่ต้มได้

ความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญของค่าความชื้นของแครอทที่ผ่านการต้มที่สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างเซลล์ของแครอทเนื่องจากกระบวนการต้ม เช่นการสลายตัวของสารประกอบเพกติน โดยทั่วไปแล้วเซลล์พืชประกอบด้วยเซลล์ลูโลส เซมิเซลล์ลูโลสและลิกนิน ซึ่งรวมตัวกันเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ และระหว่างผนังเซลล์ของแต่ละเซลล์จะเชื่อมติดกันด้วยสารประกอบเพกติน

ภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิต่ำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแครอทจะเกิดการสลายตัวของสารประกอบเพกติน สารประกอบเพกตินเป็นส่วนประกอบของเซลล์ชั้นกลาง (Middle Lamella) ซึ่งยึดติดกับผนังเซลล์และให้ความแข็งแรงและยืดหยุ่นแก่เนื้อเยื่อ (Kato และคณะ, 1997) เมื่อแครอทผ่านกระบวนการให้ความร้อนเช่นการต้ม สารประกอบเพกตินจะสลายตัวและละลายจากผนังเซลล์และเซลล์ชั้นกลางระหว่างผนังเซลล์ที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างเซลล์ ก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์และทำให้ความแข็งแรงของเนื้อเยื่อลดลง (Grave และคณะ, 1994; Stolle-Smits และคณะ 1997; Ni และคณะ, 2005)

ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแคโรท การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์ของแคโรท ซึ่งเป็นสารประกอบเพกตินเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั้งแบบไม่ต้องอาศัยเอนไซม์ และโดยอาศัยเอนไซม์ โดยมีเอนไซม์ Pectinase ชนิดต่างๆ เช่น Pectinmethylesterase (PME) และ Polygalacturonase (PG) (Van Buren, 1979; Adam, 1991) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของสารประกอบเพกตินเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยอาศัยเอนไซม์ ซึ่งมีเอนไซม์ PME และ PG เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจาก ในขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาการลด Degree of Methylation ของเพกติน ในขั้นตอนนี้เอนไซม์ PME จะเข้าเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยทำลายพันธะที่หมู่เมทิลของเพกติน ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทานอลเพกตินที่มี Degree of Methylation น้อยกว่าเดิม และ Polygalacturonic Acid (ดังรูปที่ 5.5) ซึ่งการที่เพกตินมี Degree of Methylation น้อยลงกว่าเดิม ส่งผลให้โครงสร้างของเซลล์ของแคโรทมีความคงตัวลดลง (Vu และคณะ, 2005)

ปฏิกิริยาต่อมาในส่วนที่สองเป็นการลดขนาดของสายโพลีเมอร์ของเพกติน โดยสารประกอบเพกตินจะถูกลดขนาดของสายโพลีเมอร์โดยมีเอนไซม์ Polygalacturonase หรือ PG เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ PG จะเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั้งบริเวณส่วนปลายและส่วนกลางของโครงสร้างเพกติน ส่งผลให้สายโพลีเมอร์ของสารประกอบเพกตินมีขนาดสั้นลง (ดังรูปที่ 5.6) การลดลงของหมู่เมทิลและสายโพลีเมอร์ของสารประกอบเพกตินส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างผนังเซลล์ของแคโรทลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้สารประกอบเพกตินเกิดการสลายตัวและละลายจากผนังเซลล์ ทำให้เซลล์เกิดการแยกตัวออกจากกันระหว่างผนังเซลล์ได้ง่าย เมื่อผนังเซลล์แยกตัวออกจากกันส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นเซลล์ของแคโรททำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปภายในช่องว่าง ค่าความชื้นของแคโรทจึงมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การสลายตัวของประกอบเพกตินยังส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของแคโรทซึ่งจะกล่าวต่อไป

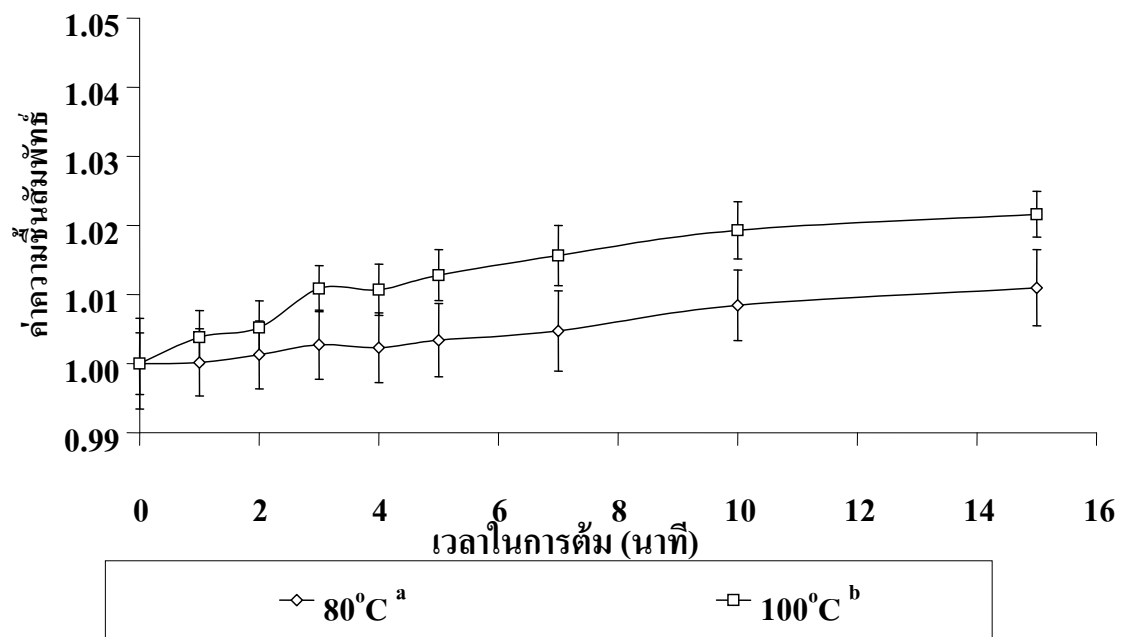
ในกระบวนการต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส จะการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยอาศัยเอนไซม์เป็นหลัก ในขณะที่เดียวกันสารประกอบเพกตินอาจการเปลี่ยนแปลงเนื่องปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเนื่องจากความร้อน แต่เนื่องจากการต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำปริมาณความร้อนไม่สูงมาก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมากนัก

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงผนังเซลล์ของแคโรทเนื่องจากการสลายตัวของเพกตินโดยเอนไซม์ PME และ PG เกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะการต้มอุณหภูมิไม่สูงมากนัก เนื่องจากเอนไซม์ PME และ PG สามารถทำงานได้ดีภายใต้สภาวะอุณหภูมิการต้ม 50 – 70 องศาเซลเซียส (Chang และคณะ, 1996; Hou

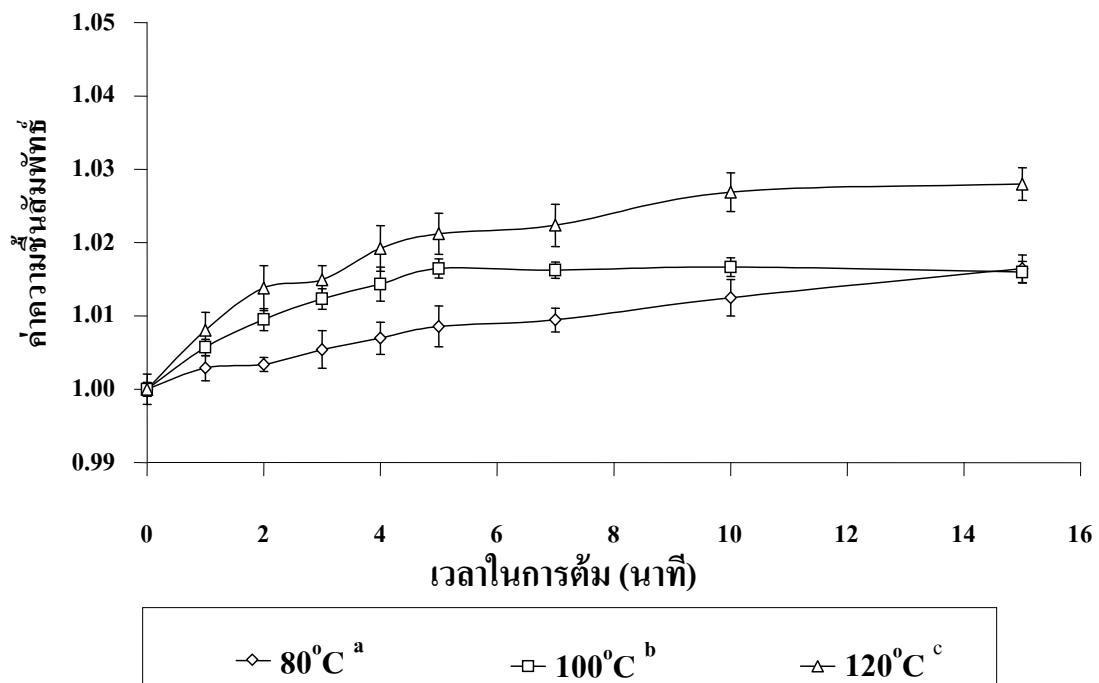
และ Chang, 1996; Van Buren, 1979) เมื่ออุณหภูมิในการต้มสูงขึ้นเอนไซม์ PME และ PG ซึ่งเป็นสารประกอบโปรตีนจะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์ของแครอทระหว่างกระบวนการต้มเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบไม่ต้องอาศัยเอนไซม์เป็นหลัก

เมื่อพิจารณาถึงสภาวะอุณหภูมิสูงในระหว่างกระบวนการต้ม เมื่อแครอทได้รับความร้อนในปริมาณมาก เช่นการต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง หรือการต้มเป็นเวลานาน เมื่อแครอทได้รับความร้อนที่สูงพอที่จะ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเพกติน โดยอาจเกิดการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่ต้องใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปริมาณความร้อนที่มากพอก่อให้เกิดปฏิกิริยาการลด Degree of Methylation และสลายพันธะของสารประกอบเพกตินให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สารประกอบเพกตินเกิดการสลายตัวและละลายจากผนังเซลล์ ส่งผลให้ผนังเซลล์ของแครอทเกิดการแยกตัวออกจากกัน น้ำที่อยู่บริเวณรอบข้างจึงสามารถแพร่เข้าไปในช่องว่างได้ การเปลี่ยนแปลงสารประกอบเพกตินแสดงดังรูปที่ 5.7 นอกจากนี้แล้วความร้อนระหว่างกระบวนการต้มอาจส่งผลต่อเฮมิเซลลูโลสบางชนิดซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำระหว่างการต้ม เมื่อเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์เกิดการสลายตัว น้ำบางส่วนจึงสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้ ค่าความชื้นของแครอทที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิสูงจึงเพิ่มขึ้นได้รวดเร็วกว่าแครอทที่ถูกต้มที่อุณหภูมิต่ำกว่า

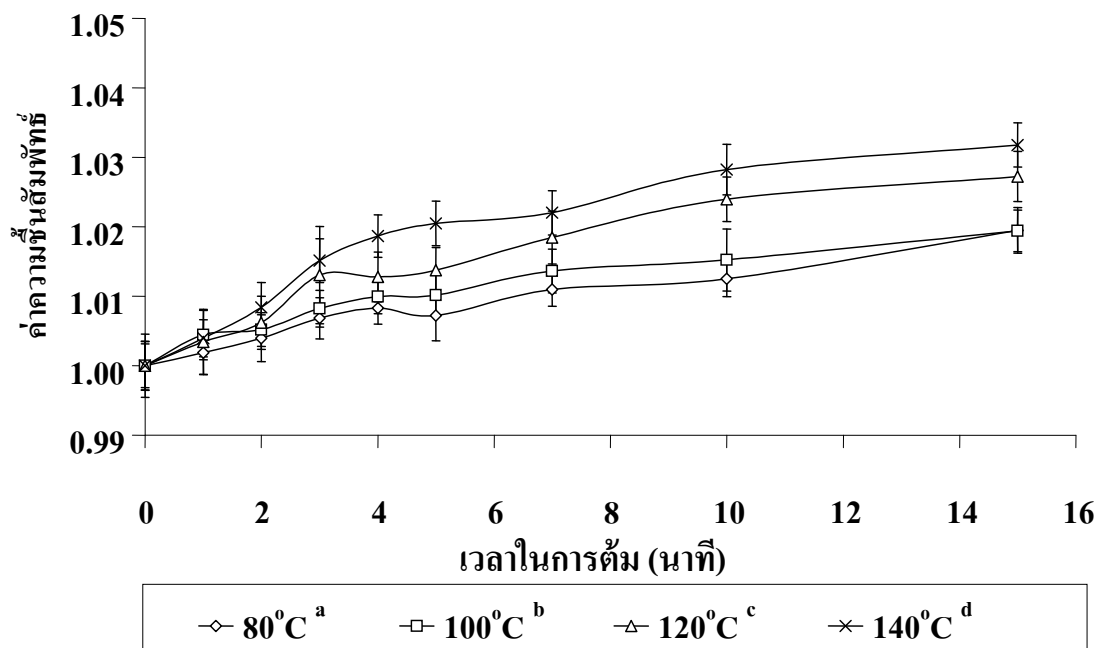
เมื่อพิจารณาทุกสภาวะการต้มพบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ เวลาเริ่มต้น (0 นาที) มีค่าเท่ากับ 1.0000 จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป ค่าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อระยะเวลาในการต้มนานขึ้น จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทุกสภาวะการต้มพบว่าในช่วงระยะเวลาในการต้มทั้งหมด 15 นาที ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.0365 ที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยสังเกตได้ว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้น ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากแครอทเป็นพืชหัวที่มีค่าความชื้นสูง โดยทั่วไปแล้วแครอทมีลักษณะเป็นพืชเนื้อแข็งแต่มีค่าความชื้นสูงถึงประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้ง (ในการทดลองนี้มีค่าประมาณร้อยละ 93-94) การที่น้ำในการต้มแพร่เข้าไปเพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง) ย่อมส่งผลให้ค่าความชื้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นพบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์สุดท้ายมีความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญ (Turkey's test, $p < 0.05$)



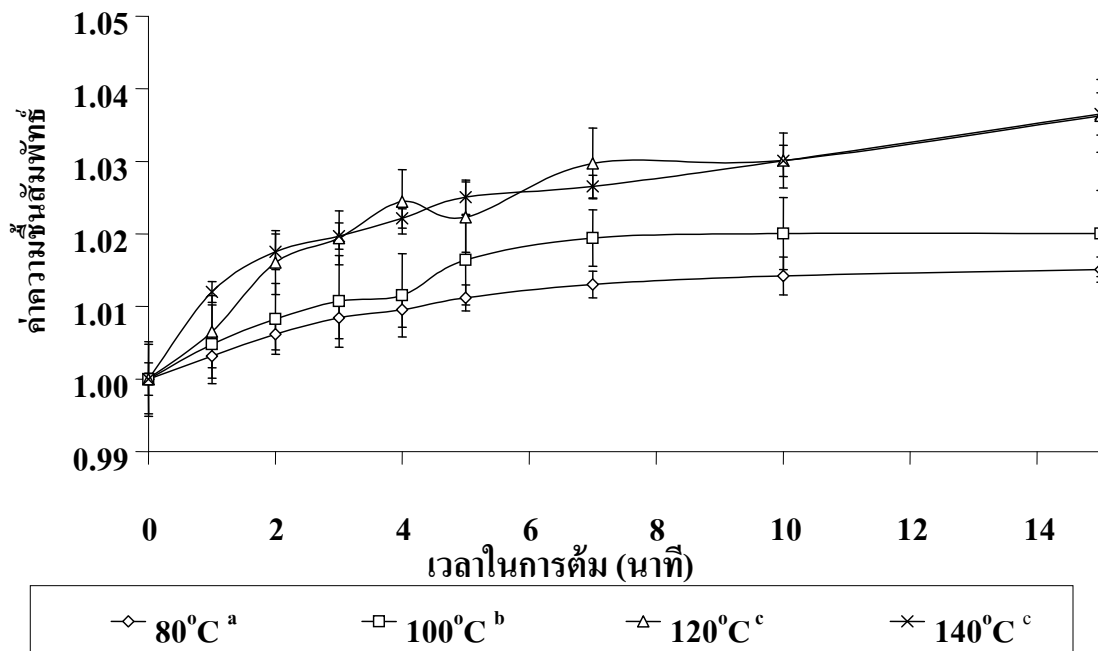
รูปที่ 5.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



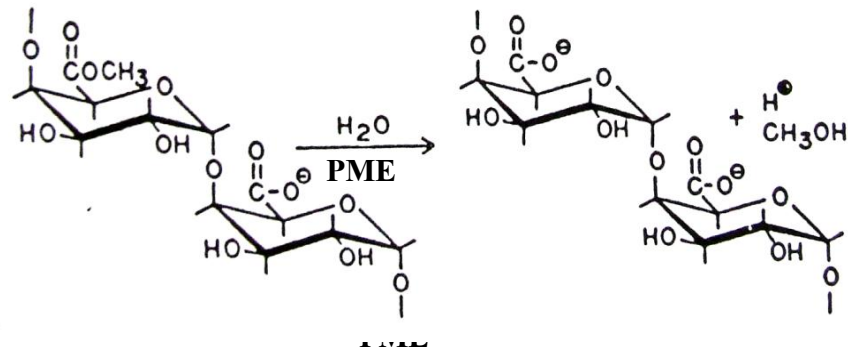
รูปที่ 5.2 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.3 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)

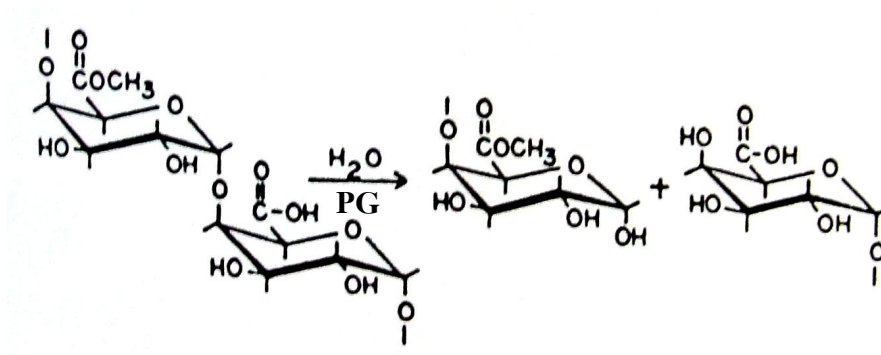


รูปที่ 5.4 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)



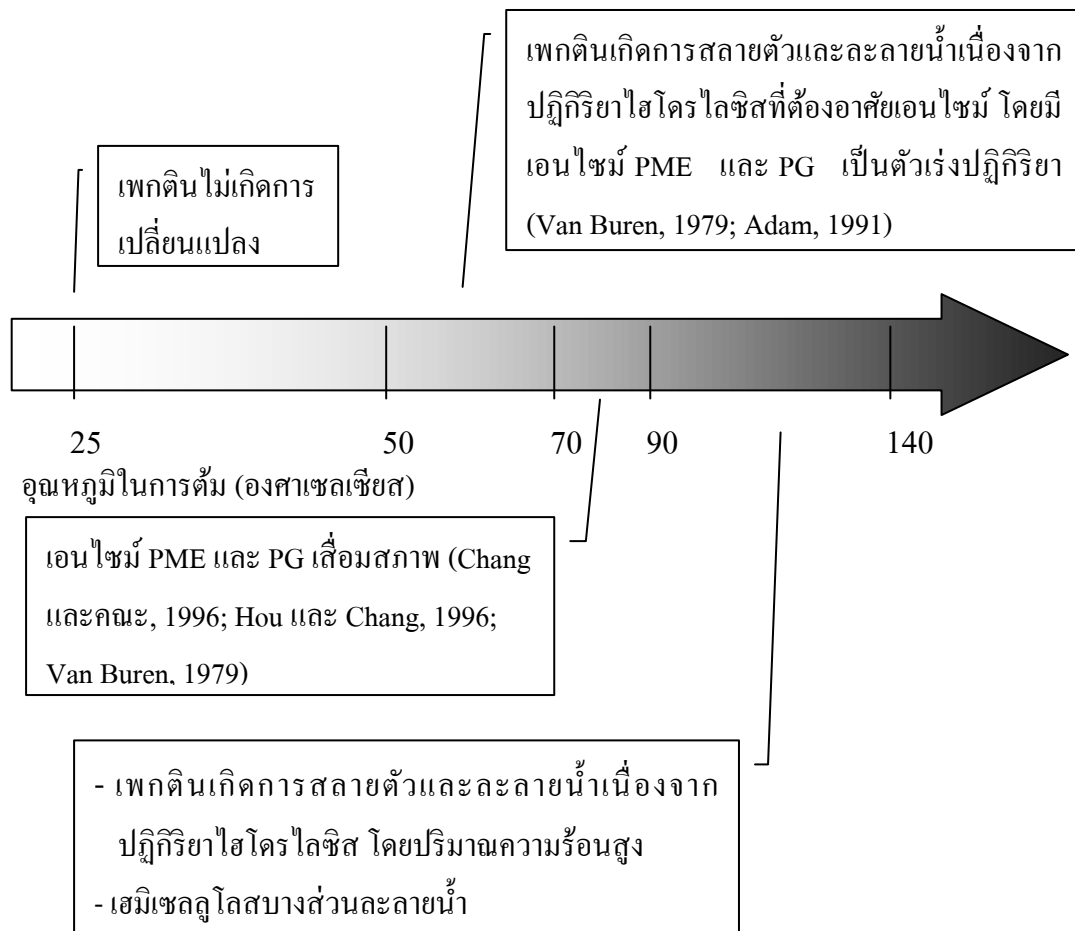
รูปที่ 5.5 การสลายตัวของเพคตินด้วยเอนไซม์ Pectinmethylesterase (PME)

ที่มา: Fennema, 1996



รูปที่ 5.6 Polygalacturonase (PG) ย่อยโพลีเมอร์เพคตินให้มีขนาดเล็กลง

ที่มา: Fennema, 1996



รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงเคมีกายภาพของแครอทระหว่างกระบวนการต้มที่อุณหภูมิต่างๆ

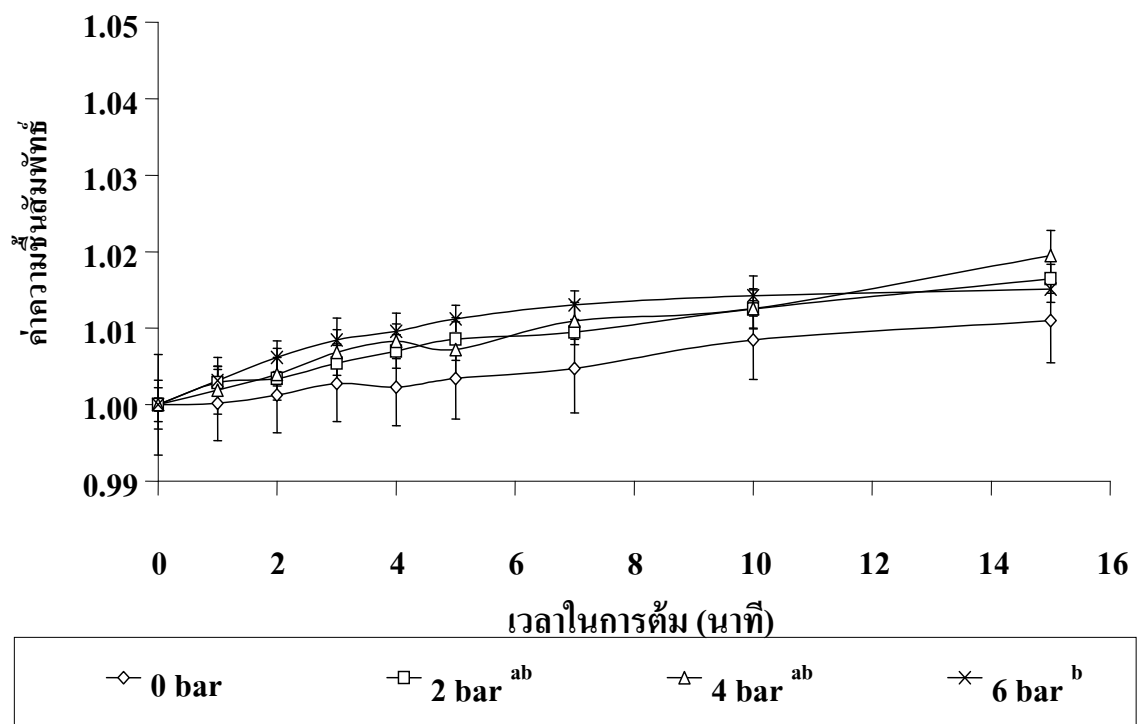
5.1.1.1 ผลของความดันในกระบวนการต้ม

ในการศึกษาผลของความดันในการต้มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของแครอท เมื่อนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ณ สถานะการต้มต่างๆ มาสร้างเส้นความสัมพันธ์กับเวลาในการต้ม โดยเปรียบเทียบผลที่เกิดจากสถานะความดันในการต้มที่ต่างกัน (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.8 – 5.11 (อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ)

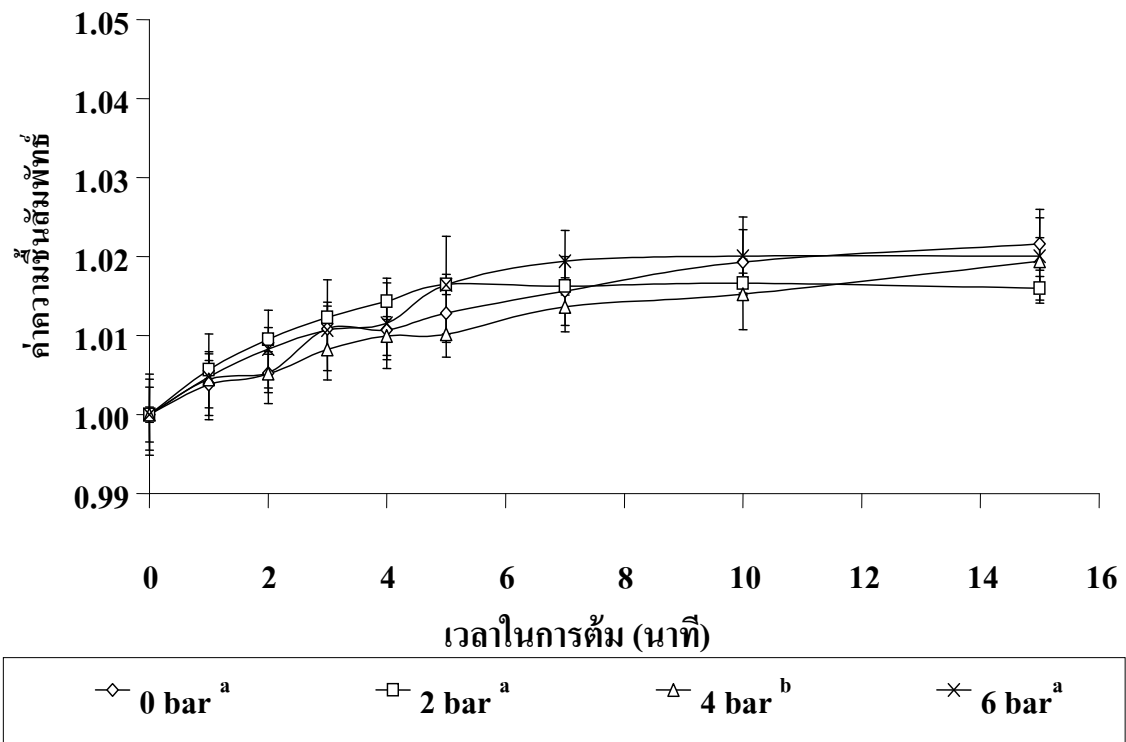
จากรูปแสดงความสัมพันธ์ทั้ง 4 รูป แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการต้มผ่านไปค่าความชื้นสัมพัทธ์ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์สถิติด้วยวิธี Turkey's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์พบว่า การต้มภายใต้สถานะอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.8 และ 5.9) ความแตกต่างของความดันขณะต้มไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง

ค่าความชื้นแครอท อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะการต้มโดยใช้อุณหภูมิในการต้มสูงขึ้น (ที่สภาวะอุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียส) พบว่าความดันที่แตกต่างในกระบวนการต้มส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอท (ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11) จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของตัวอย่างแครอทภายใต้สภาวะดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความดันขณะทำการต้ม

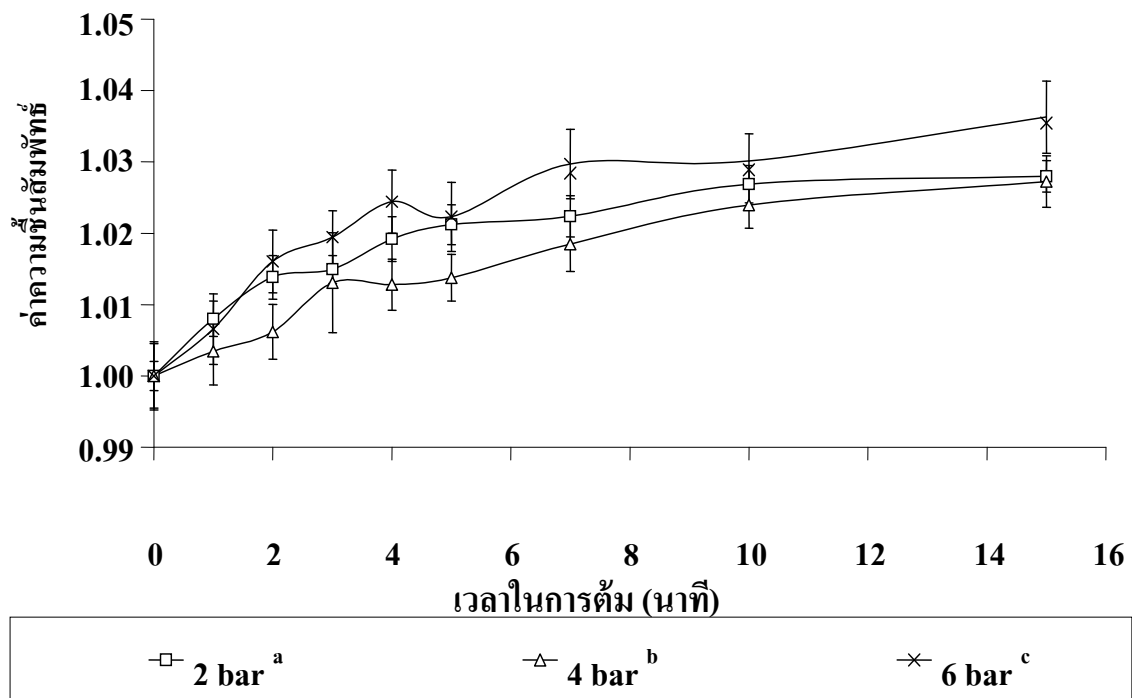
Xu (2004) ทำการศึกษาผลของการใช้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อเยื่อและเนื้อสัมผัสของแครอทโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพโครงสร้างเซลล์ จากภาพถ่ายโครงสร้างเซลล์ของแครอทพบว่า การใช้ความดันต่ำกว่า 400 MPa เพียงอย่างเดียวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อเยื่อและเนื้อสัมผัสของแครอท อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ จากผลของค่าความชื้นเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแครอทเกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความดันในการต้ม โดยมีสมมติฐานของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นเนื่องจาก ผลของความดันที่แตกต่างขณะต้มภายใต้อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นเนื่องจากการต้มแครอทภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างทำให้ผนังเซลล์ โดยความร้อนสูงจะทำให้ผนังเซลล์อ่อนตัวลง หรือเกิดการสลายตัวของผนังเซลล์ เมื่อความดันในสภาวะการต้มสูงขึ้น ผลต่างของความดันภายในหม้อต้มกับความดันภายในเซลล์ของแครอทที่เพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้น้ำที่อยู่บริเวณโดยรอบเซลล์สามารถแพร่เข้าไปภายในเซลล์ของแครอทได้มากขึ้น ค่าความชื้นของแครอทจึงมีค่าสูงขึ้น



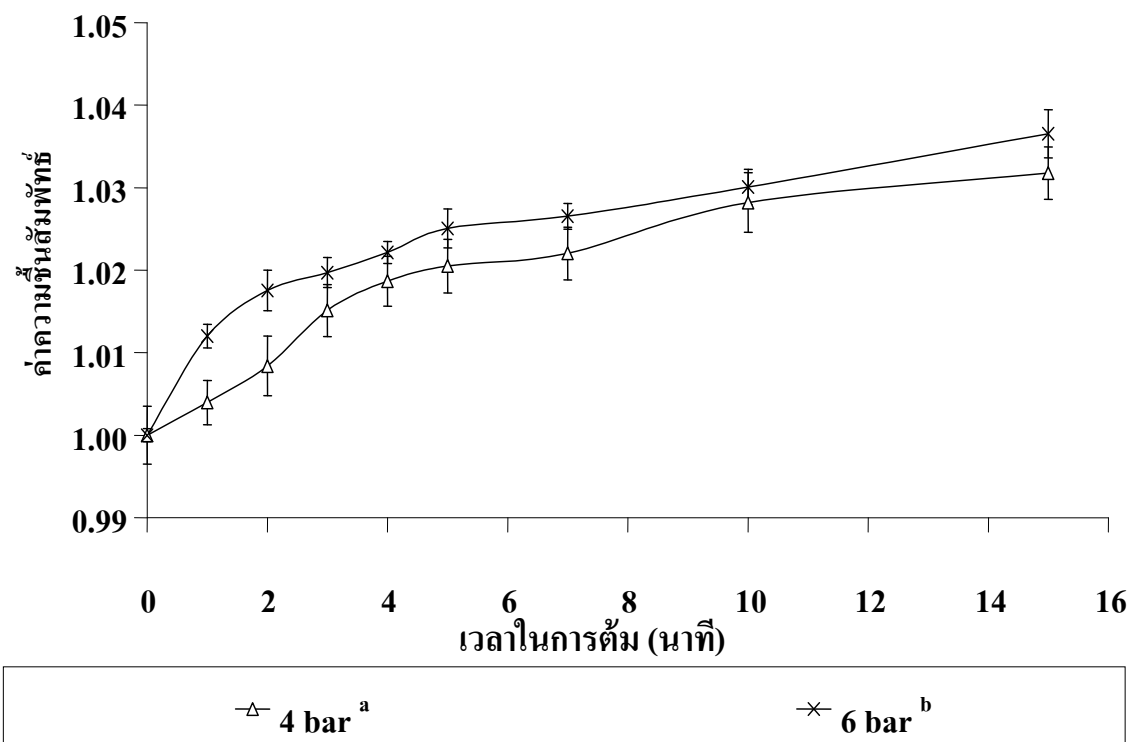
รูปที่ 5.8 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการดัมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.9 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการดัมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.10 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.11 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัส

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ (80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส) และความดัน (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ในระหว่างกระบวนการต้มต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท ตัวอย่างแครอทที่ผ่านการต้มที่สภาวะต่างๆ จะถูกนำไปวัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA-XT2 โดยวิธี Compression Test ค่าที่วัดได้บอกถึงค่าความแข็งของตัวอย่าง จากนั้นค่าความแข็งที่วัดได้ถูกคำนวณแปลงเป็นค่าความแข็งสัมพัทธ์ (Relative Hardness) ซึ่งเป็นค่าความแข็ง ณ เวลาในกระบวนการต้มใดๆ เทียบกับค่าความแข็งเริ่มต้นหรือความแข็งของแครอทดิบ นำค่าความแข็งสัมพัทธ์ที่คำนวณได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งสัมพัทธ์กับเวลาในกระบวนการต้มเพื่อศึกษาผลของสภาวะการต้มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัส

ค่าความแข็งสัมพัทธ์ของแครอทที่ได้จากกระบวนการต้มภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.12 - 5.19 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งสัมพัทธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็วในลักษณะเส้นโค้งในช่วงแรก และมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการต้มนานขึ้น ส่วนค่าความเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้จากผลการทดลองมีค่าค่อนข้างกว้างแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความแปรผันค่อนข้างมาก เนื่องจากแครอทเป็นวัสดุชีวภาพที่มีความแตกต่างทางด้านโครงสร้างทั้งในแนวรัศมี และแนวตั้ง โดยในการทดลองนี้ต้องการศึกษาผลของสภาวะการต้มต่อคุณลักษณะของแครอทโดยรวมจึงไม่มีการแยกศึกษาส่วนต่างๆของแครอท

5.1.2.1 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการต้ม

เมื่อนำค่าความแข็งสัมพัทธ์ของแครอทที่คำนวณได้จากผลการทดลองมาสร้างเส้นความสัมพันธ์กับเวลาในการต้มโดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการต้มภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่ระดับความดันเท่ากัน ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.12 - 5.15 (ความดัน 0, 2, 4 และ 6 บาร์ ตามลำดับ)

จากรูปความสัมพันธ์ทั้ง 4 รูป พบว่าการต้มแครอทในช่วงระยะเวลา 15 นาที ค่าความแข็งสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการต้ม การต้มแครอทที่อุณหภูมิสูงค่าความแข็งสัมพัทธ์มีค่าลดลงมากกว่าการต้มที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากผลการทดลองพบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทต้มที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส มีค่า 0.538, 0.050, 0.015 และ 0.010 ตามลำดับ จากการคำนวณทางสถิติด้วยวิธี Turkey's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าความแตกต่างของค่าความแข็งสัมพัทธ์ของ

แครอทที่ต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของระดับอุณหภูมิในการต้มมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของตัวอย่างแครอทที่ต้มได้

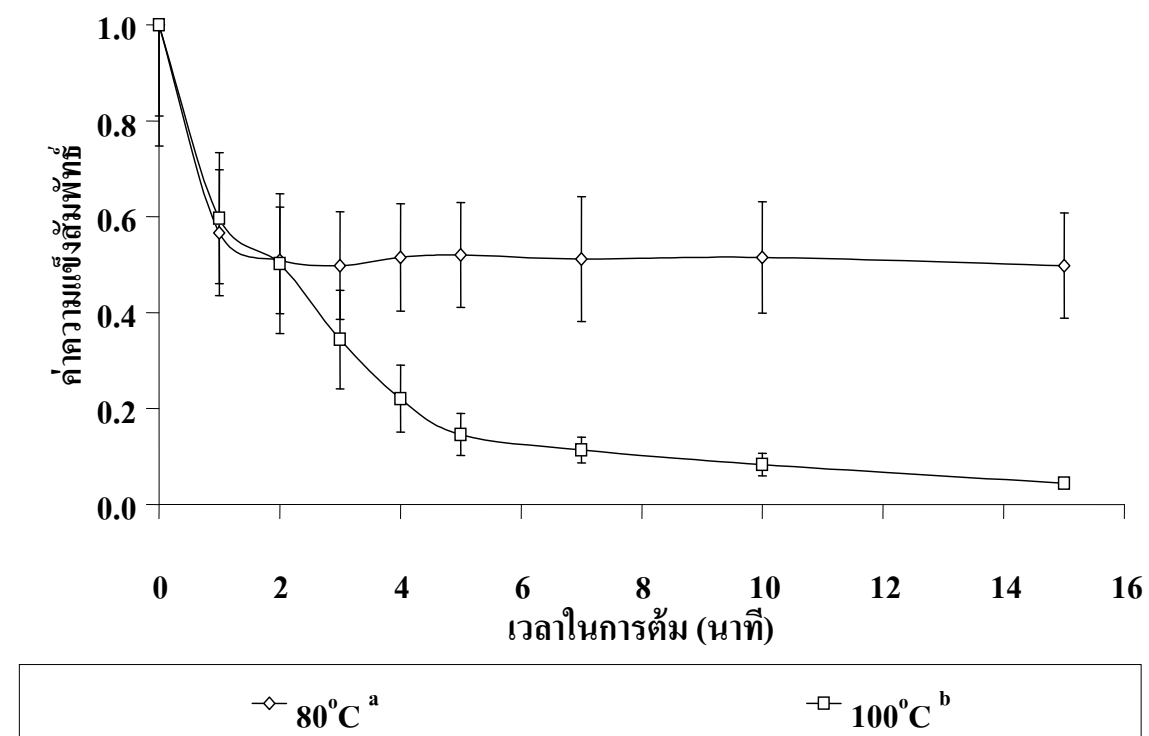
การเปลี่ยนแปลงความแข็งของเนื้อสัมผัสของแครอทที่ผ่านกระบวนการต้มสามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติทางโครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อ คุณสมบัติทางโครงสร้างและลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อของผักและผลไม้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับผนังเซลล์ (Klockeman และคณะ, 1991) ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบจำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพกติน การอ่อนตัวของผักและผลไม้มีสาเหตุจาก ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารประกอบเพกติน การเกิดเจลลาติในเซลล์ของแป้ง การละลายน้ำบางส่วนของเฮมิเซลลูโลส รวมถึงการสูญเสียความดันภายในเซลล์ (Fellows, 2000) โดยการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทจากการต้มในงานวิจัยนี้คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของเพกติน

จากเหตุผลดังอธิบายข้างในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของแครอทต้มเกิดเนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างผนังเซลล์ การต้มแครอทภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างผนังเซลล์ของแครอท เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของแครอทที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพบว่าค่าความแข็งสัมพัทธ์ลดลงเหลือประมาณ ครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นในช่วงแรกของการต้ม และหลังจากนั้นเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งลดลงของค่าความแข็งในช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบเพกติน โดยในช่วงแรกเมื่อแครอทได้รับความร้อน อุณหภูมิของชิ้นแครอทจะเพิ่มขึ้น เพกตินจะเริ่มเกิดการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยมีเอนไซม์ PME และ PG เป็นสารเร่งปฏิกิริยา จนกระทั่งอุณหภูมิของแครอทสูงถึงประมาณ 80 องศาเซลเซียส เอนไซม์ดังกล่าวจะเกิดการสลายตัวส่งผลให้ไม่สามารถย่อยสลายเพกตินต่อไปได้ค่าความแข็งของแครอทจึงคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาที่สภาวะการต้มที่ภายใต้อุณหภูมิในการต้มสูงขึ้น ปริมาณความร้อนที่แครอทได้รับมากเพียงพอที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพกตินที่อยู่ระหว่างผนังเซลล์ของแครอทจึงเกิดการสลายตัวและละลายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าความแข็งสุดท้ายของแครอทจึงมีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น โดยภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสพบว่าค่าความแข็งสัมพัทธ์มีค่าลดลงเร็วกว่าการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสในช่วงแรก เนื่องจากเกิด ความแตกต่างของความร้อนของแครอทและน้ำที่ใช้ต้มสูงกว่า ความร้อนจึงถ่ายเทไปยังชิ้นแครอท

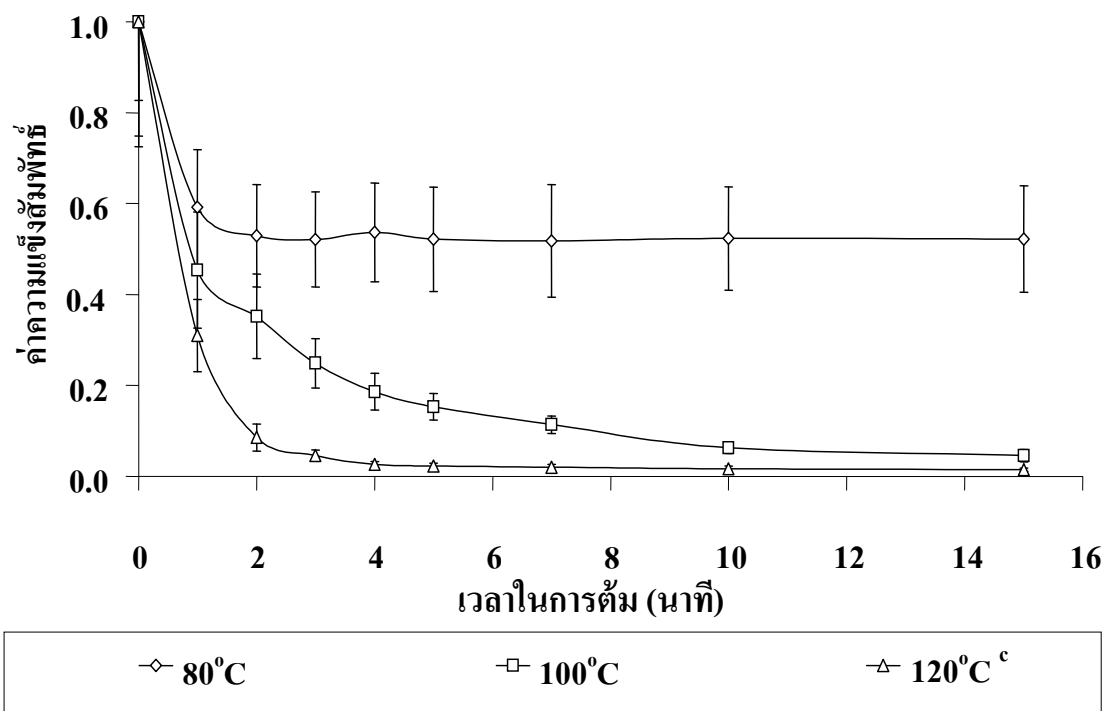
รอทได้เร็วกว่า ส่งผลให้การสลายตัวของเพกตินเนื่องจากเอนไซม์ PME และ PG เกิดขึ้นได้เร็ว หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิของขึ้นเครื่องสูงขึ้นเอนไซม์จะเกิดการสลายตัว อย่างไรก็ตามปริมาณความร้อนและระยะเวลาในการต้มที่นานขึ้นส่งผลให้เพกตินสามารถเกิดการสลายโดยไม่ต้องใช้เอนไซม์ ค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ของเครื่องจึงค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการต้มนานขึ้น

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ของเครื่องที่ถูกต้มที่อุณหภูมิ 120 และ 140 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาระยะแรกของการต้มซึ่งเกิดจากสาเหตุเช่นเดียวกับการต้มเครื่องที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อเวลาในการต้มผ่านไปพบว่าค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ของเนื้อสัมผัสของเครื่องลดลงจนถึงค่าหนึ่งและไม่เปลี่ยนแปลง (ประมาณ 0.01) ซึ่งสาเหตุเกิดเนื่องจากโครงสร้างเซลล์ที่เหลือเป็นโครงสร้างหลักเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส หรือลิกนิน ซึ่งไม่สามารถสลายตัวเนื่องจากความร้อน

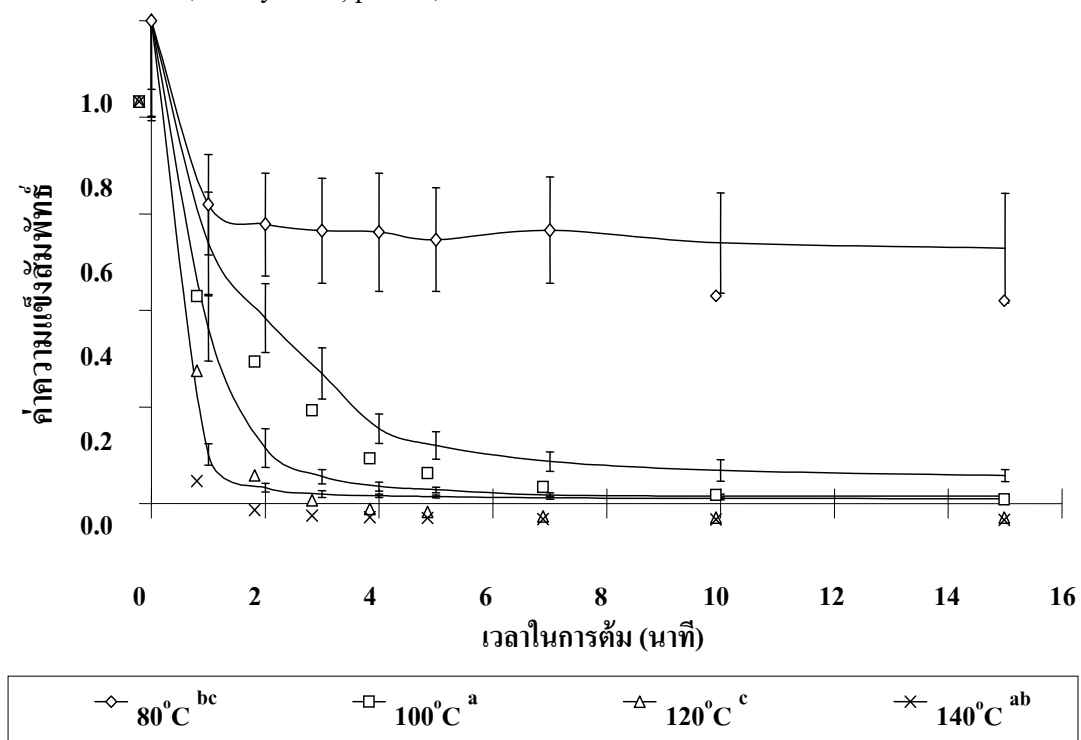


รูปที่ 5.12 ค่าความแข็งแรงของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

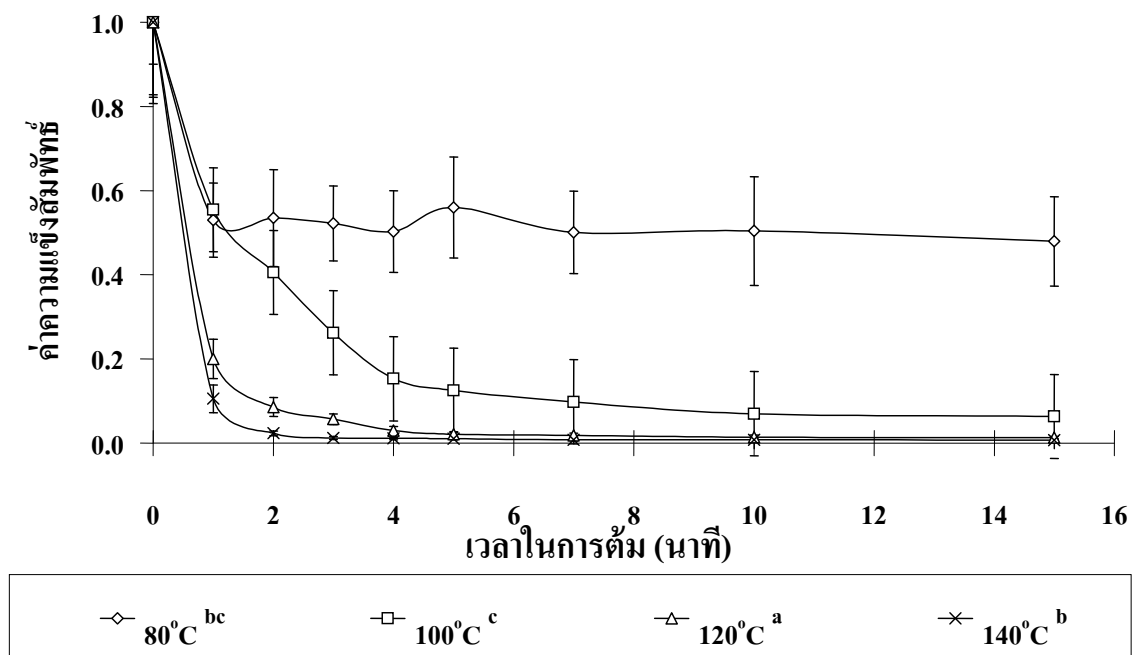
(Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.13 ค่าความแข็งแรงของเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.14 ค่าความแข็งแรงของเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)



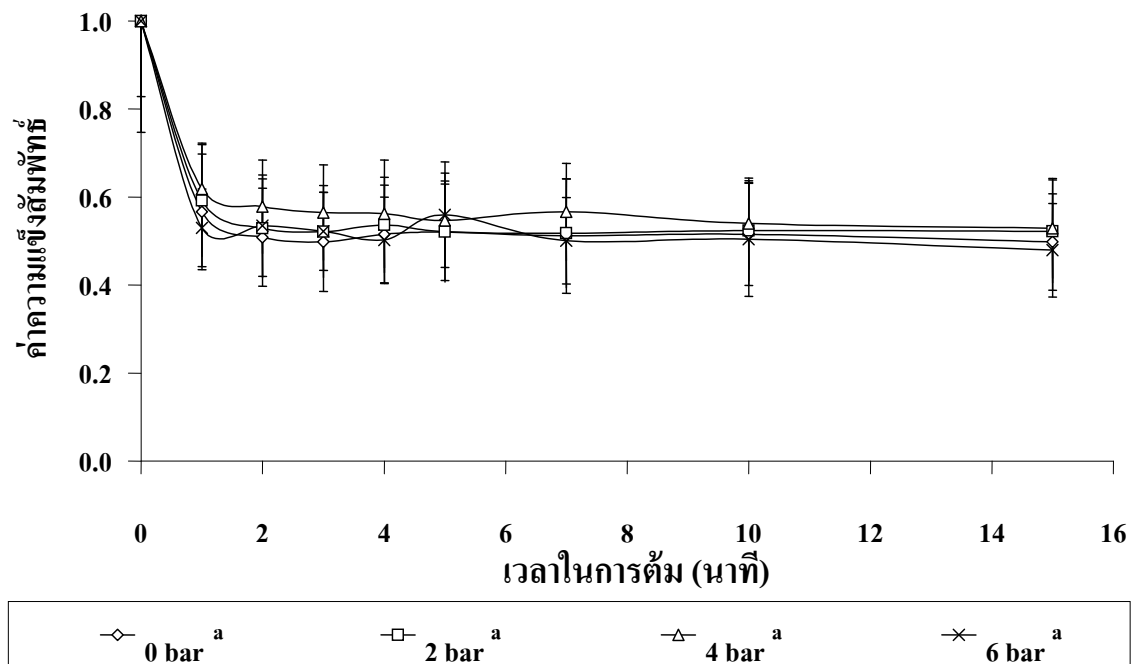
รูปที่ 5.15 ค่าความแข็งแรงของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)

5.1.2.2 ผลของความดันในกระบวนการต้ม

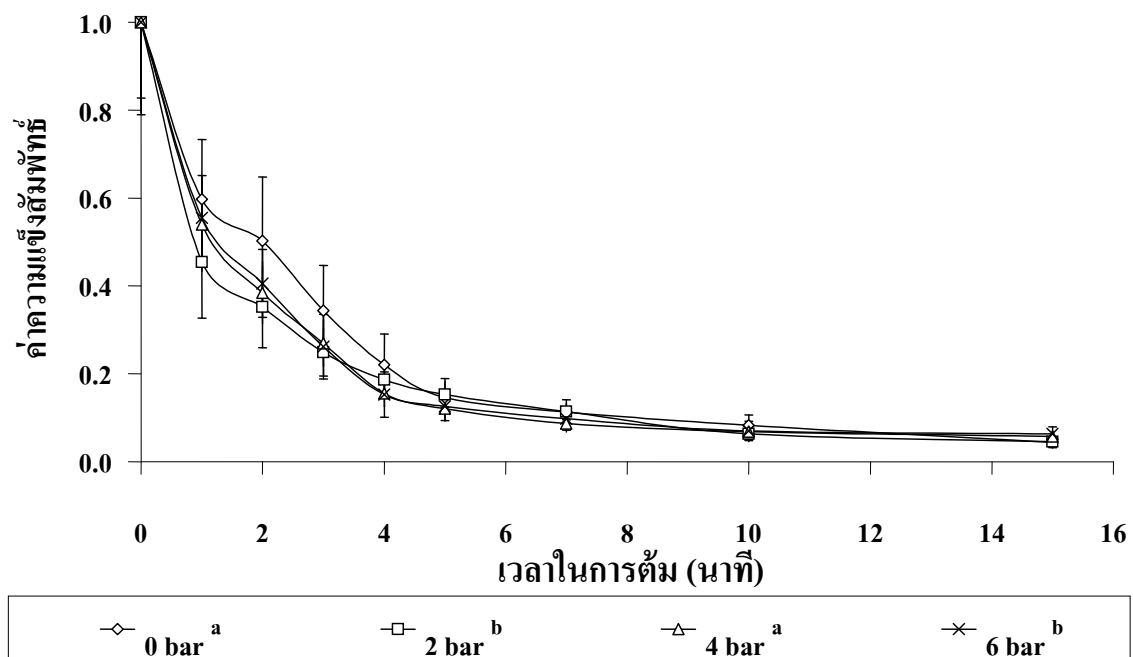
ในการศึกษาผลของความดันในกระบวนการต้มต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอท เมื่อนำค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ณ สภาวะการต้มภายใต้ความดันในการต้มที่ต่างกัน (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.16 – 5.19 (อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) จากรูปความสัมพันธ์ทั้ง 4 รูปแสดงให้เห็นว่า ในช่วงระยะเวลาในการต้ม 15 นาที ค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการต้ม (0-5 นาที) จากนั้นค่าความแข็งแรงเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพิจารณาผลของความดันต่อค่าความแข็งแรงสัมพัทธ์ที่ลดลงของแครอทพบว่า แครอทที่ต้มภายใต้ความดันที่แตกต่างกันมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การลดลงของค่าความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสจึงเป็นผลของระยะเวลาในการต้มเพียงอย่างเดียว

จากผลงานวิจัยของ Xu (2004) แสดงให้เห็นว่าเนื้อสัมผัสและเนื้อเยื่อของแครอทไม่เกิดการเสียหายเนื่องจากผลของความดันสูงไม่สูงนัก แต่สามารถพบเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและเนื้อเยื่อของแครอทได้เมื่อแครอทอยู่ภายใต้สภาวะความดัน 600 MPa นาน 5 นาที หรือ 400 MPa นาน 20 นาที ซึ่งเป็นสภาวะความดันที่สูงกว่าความดันที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ซึ่งมีค่าเพียง 0.1 – 0.7 MPa นอกจากนี้จาก

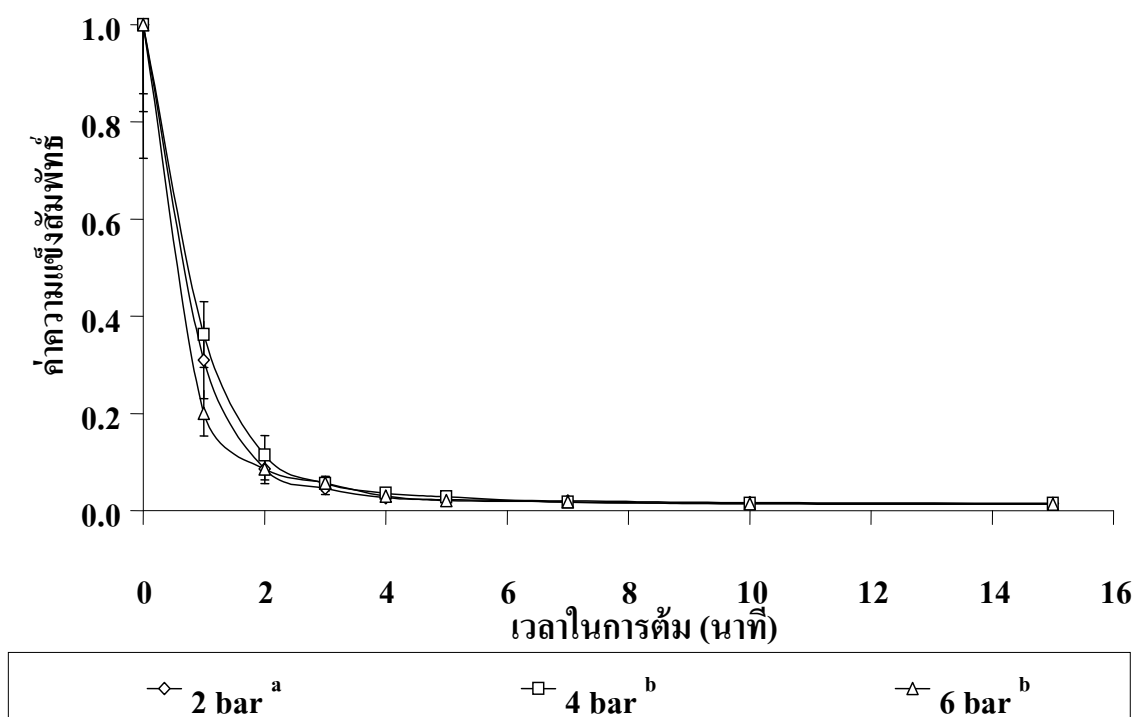
ผลการทดลองพบว่าเมื่อความดันในการต้มเพิ่มขึ้นค่าความชื้นมีการเพิ่มขึ้น แต่ความความแข็งของเนื้อสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยของปริมาณน้ำในเซลล์ (ประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง) ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเซลล์ ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสจึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการต้มแครอทภายใต้ความดัน 0 ถึง 6 บาร์ ในกระบวนการต้มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้



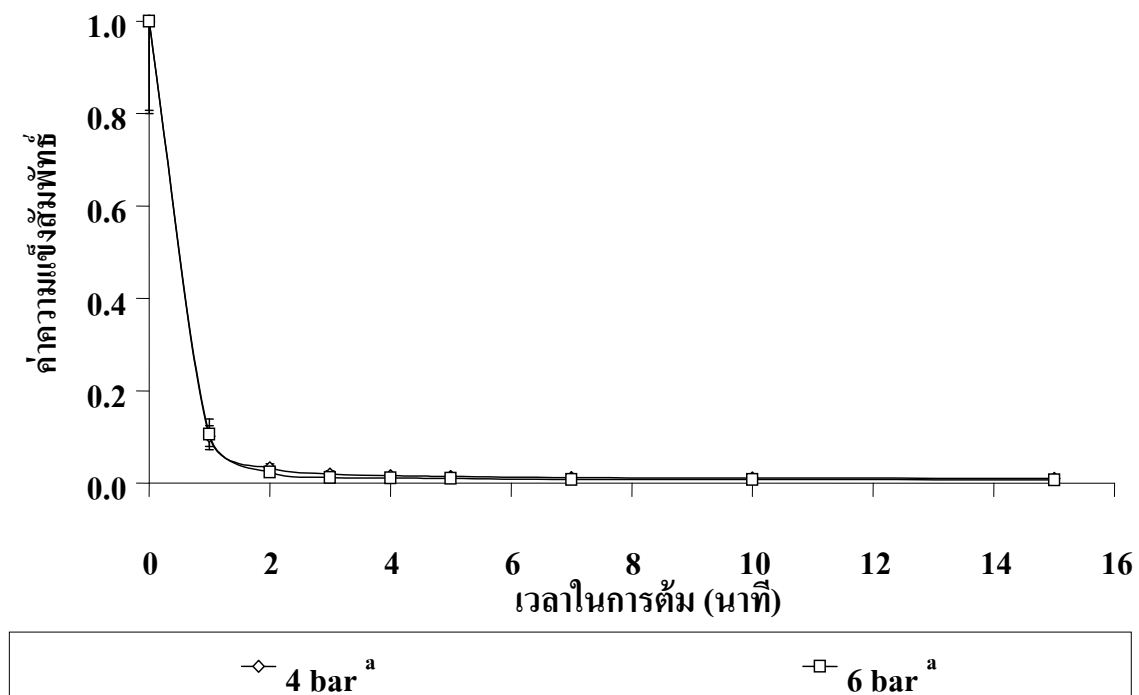
รูปที่ 5.16 ค่าความแข็งของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.17 ค่าความแข็งของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.18 ค่าความแข็งของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.19 ค่าความแข็งแรงของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)

5.1.3 ผลของสภาวะในการต้มต่อลักษณะโครงสร้างของแครอทต้ม

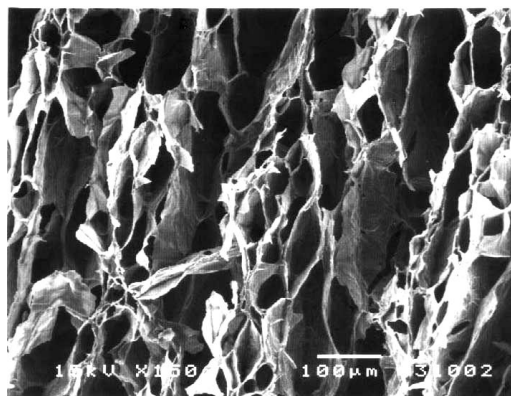
การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของวัสดุอาหารเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุอาหาร กระบวนการและสภาวะในการแปรรูปอาหารที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุอาหารที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุอาหารจึงสามารถใช้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากผลของกระบวนการแปรรูปอาหารได้ จากข้อมูลผลการทดลองที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า ความดันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของแครอท อีกทั้งจากงานวิจัยของ Xu (2004) พบว่าต้องใช้ความดันถึง 600 MPa จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของแครอท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ศึกษาผลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแครอท

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะในการต้มต่อลักษณะโครงสร้างของแครอทนี้ได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการต้มในช่วง 5 นาทีแรกเนื่องจากจากข้อมูลข้างต้นจะพบว่าในช่วงเวลา 5 ของการต้ม ค่าความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของแครอทในช่วงเวลาดังกล่าว นอกจากนี้แล้วได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการต้ม (ที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของ

แครอทต้ม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscopy; SEM) ถ่ายรูปโครงสร้างของแครอทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะต่างๆ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของแครอทต้ม ซึ่งมีรายละเอียดผลของการศึกษาดังนี้

5.1.3.1 ผลของเวลาในการต้มต่อลักษณะโครงสร้างของแครอทต้ม

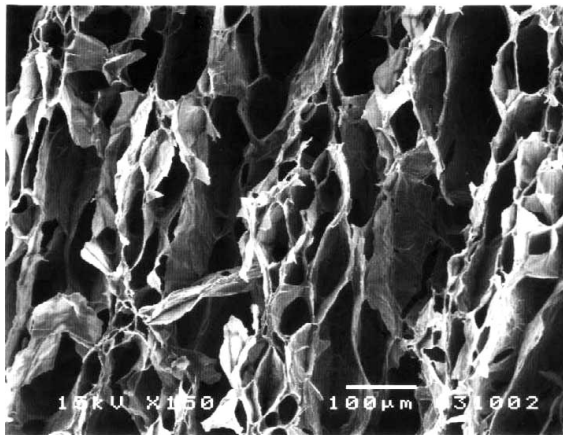
ลักษณะโครงสร้างภายในของแครอทดิบจากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งแสดงดังรูปที่ 5.20 ซึ่งเป็นภาพขยายโครงสร้างภายในขนาด 150 เท่า จากรูปพบว่าแครอทดิบมีลักษณะโครงสร้างเป็นเยื่อที่มีช่องว่างขนาดเล็กคล้ายรังผึ้ง การการเรียงตัวของผนังเซลล์อย่างไม่เป็นระเบียบมากนัก ช่องว่างขนาดเล็กภายในเกิดเนื่องจากแครอทเป็นพืชที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้ง เมื่อทำการระเหิดน้ำออกโดยวิธีการทำแห้งแบบระเหิด แล้วถ่ายภาพโครงสร้างจึงสังเกตโครงสร้างดังภาพ



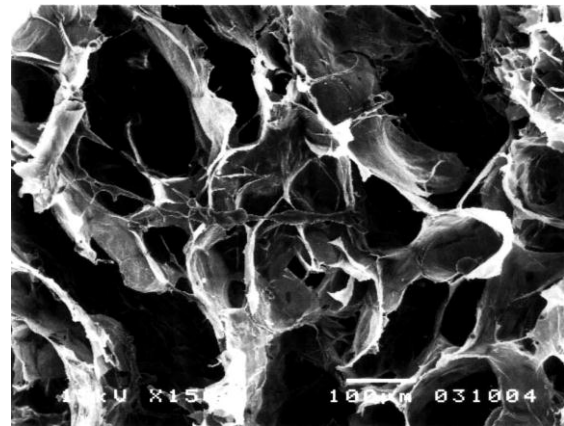
รูปที่ 5.20 โครงสร้างภายในของแครอทดิบ จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของแครอทที่ผ่านกระบวนการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6 บาร์ ที่เวลาต่างๆ (0, 1, 3 และ 5 นาที) ดังรูปที่ 5.21 พบว่าที่เวลาเริ่มต้น ผนังเซลล์ของแครอทมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้ง เมื่อแครอทได้รับความร้อนเนื่องจากการต้ม โครงสร้างของเซลล์ซึ่งมีลักษณะเป็นรังผึ้งจะมีการขยายใหญ่ขึ้นในช่วงนาที่ที่ 1 ถึงนาที่ที่ 3 ของการต้มซึ่งเกิดเนื่องจากเริ่มมีการแยกตัวกันของผนังเซลล์เนื่องจากการสลายตัวของเพกตินทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าผนังเซลล์ของแครอทในช่วงนี้ยังมีสภาพค่อนข้างสมบูรณ์เป็นระเบียบ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในช่วงนาที่ที่ 3 ถึงนาที่ที่ 5 ของการต้มพบว่าผนังเซลล์ของแครอทเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งเกิดจากการสลายตัว

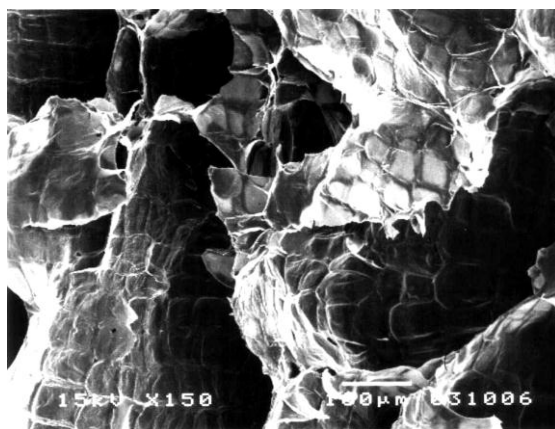
ของเพคตินซึ่งเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดความไม่คงตัว สามารถเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย ดังนั้นเมื่อทำการต้มแครอทน้ำจึงสามารถแพร่เข้าไปในช่องว่างระหว่างโครงสร้างผนังเซลล์ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ค่าความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างยังส่งผลให้ ความแข็งแรงของแครอทมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการต้มนานขึ้น



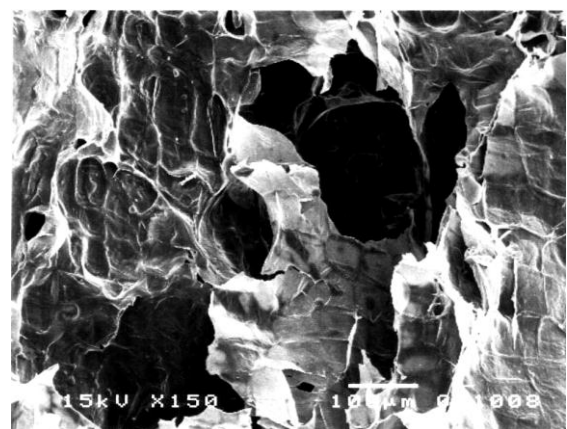
(ก) 0 นาที (แครอทดิบ)



(ข) 1 นาที



(ค) 3 นาที

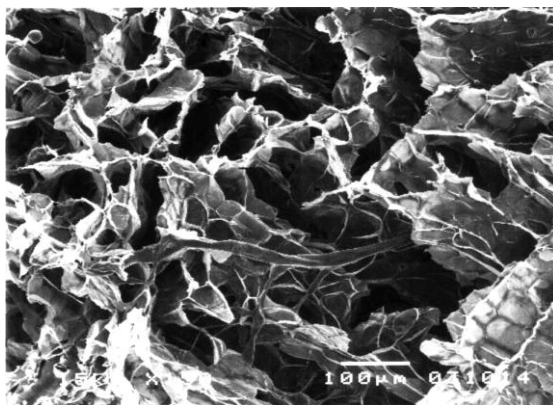


(ง) 5 นาที

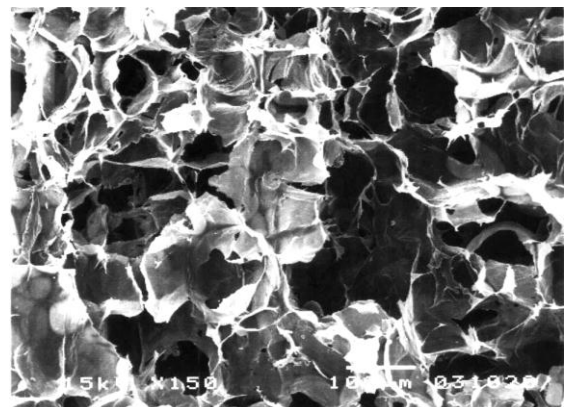
รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งของโครงสร้างภายในของแครอทจากการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 6 บาร์ ณ เวลาต่างๆ

5.1.3.2 ผลของอุณหภูมิในการดัดต่อลักษณะโครงสร้างของแอรอตัม

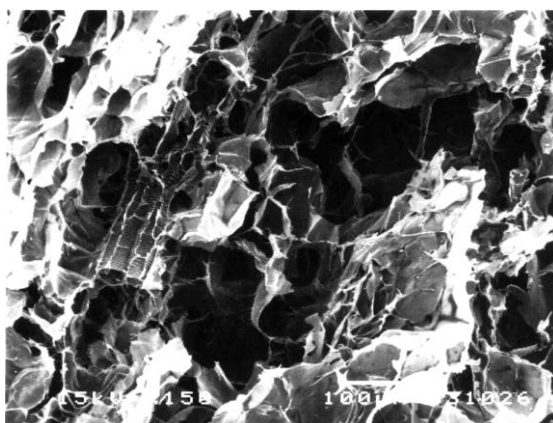
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแอรอตัม เมื่อพิจารณาภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างภายในของแอรอตัมที่ผ่านกระบวนการดัดเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดัน 6 บาร์ ดังรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแอรอตัมมีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายรังผึ้ง ซึ่งมีช่องว่างระหว่างเซลล์ขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาโครงสร้างของแอรอตัมที่ถูกดัดภายใต้อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ช่องว่างภายในโครงสร้างของแอรอตัมมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการดัด โดยที่อุณหภูมิในการดัดสูงขึ้นพบว่าโครงสร้างของแอรอตัมมีลักษณะที่เป็นโพรงช่องว่างใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องจากในขั้นตอนการดัดภายใต้อุณหภูมิต่ำจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเนื่องจากการสลายตัวของเพกตินโดยใช้เอนไซม์ PME และ PG ส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดการแยกตัวออกจากกัน เมื่ออุณหภูมิในการดัดสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเซลล์เกิดเนื่องจากการสลายตัวและละลายน้ำของเพกตินโดยความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ความร้อนดังกล่าวอาจทำให้โครงสร้างหลักของผนังเซลล์บางอย่างเช่น เฮมิเซลลูโลสบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ ละลายน้ำจึงทำให้แอรอตัมที่ผ่านการดัดที่อุณหภูมิสูงจะมีโพรงช่องว่างขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิต่ำ



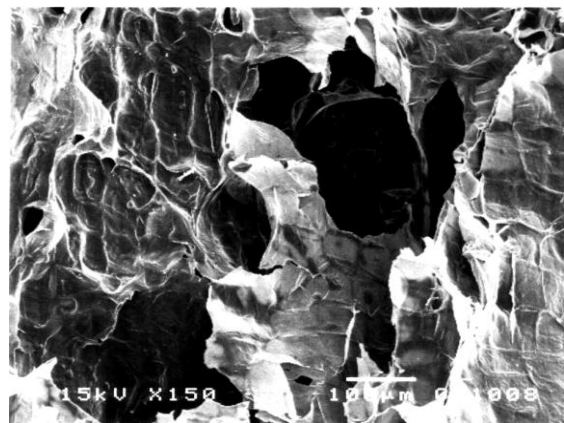
(ก) 80 องศาเซลเซียส



(ข) 100 องศาเซลเซียส



(ค) 120 องศาเซลเซียส



(ง) 140 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งของโครงสร้างภายในของแคโรท
ภายใต้สภาวะการต้มที่ ความดัน 6 บาร์ ณ เวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของแคโรทที่ผ่านกระบวนการต้มที่อุณหภูมิสูง

การทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของแคโรทที่ถูกต้มภายใต้สภาวะการต้มเหนือจุดเดือดปกติ ได้แก่ที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 0, 2, 4 และ 6 บาร์ โดยใช้เครื่องต้มความดันแบบสำหรับต้มวัสดุอาหารระดับห้องปฏิบัติ เริ่มจากการต้มแคโรทที่สภาวะการต้มเหนือจุดเดือด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแคโรทที่ถูกต้ม ณ เวลาต่างๆ และนำตัวอย่างแคโรทที่ได้มาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี เทียบกับเวลาโดยคุณสมบัติทางเคมีของแคโรทที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ได้แก่ สี และปริมาณแคลโรทีนอยด์ทั้งหมด

5.2.1 การเปลี่ยนแปลงสีของแคโรท

หลังจากทำการต้มแคโรทที่สภาวะและเวลาต่างๆแล้ว ตัวอย่างที่ผ่านการต้มจำนวน 30 ชิ้นถูกนำไปบดและวัดค่าสีในระบบ C.I.E. Coordinates (L^* , a^* , b^*) จากนั้นนำค่าสีที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสีสัมพัทธ์ (หรือค่าสี ณ เวลาใดๆเทียบกับค่าสีเริ่มต้น) แล้วนำค่าสีสัมพัทธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ผลถึงการเปลี่ยนแปลงสีของแคโรทเนื่องจากการต้มที่สภาวะต่างๆต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

5.2.1.1 ผลของอุณหภูมิในการต้ม

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการต้มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของแคโรทโดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมพัทธ์สีของแคโรทที่ได้จากการต้มที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (80 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส) ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันในช่วงเวลาการต้ม 60 นาที โดยรูปที่ 5.23 - 5.26 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L^*) รูปที่ 5.27 - 5.30 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง (a^*) รูปที่ 5.31 - 5.34 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลือง (b^*) โดยมีรายละเอียดผลของการทดลองดังนี้

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างสัมพัทธ์ของแคโรทในกระบวนการต้มที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5.23 - 5.26 พบว่าในช่วงระยะเวลาในการต้ม 60 นาที ค่าความสว่างสัมพัทธ์ในการต้มแคโรทที่อุณหภูมิสูงกว่ามีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับการต้มที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงระยะเวลาการต้ม 20 นาทีแรกพบว่าแคโรทที่ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมี

ค่าความสว่างสัมพัทธ์ลดลงจากค่าเริ่มต้นที่ 1.00 เหลือประมาณ 0.97 หลังจากนั้นค่าความสว่างสัมพัทธ์ของแครอทไม่เปลี่ยนแปลง ขณะที่ค่าความสว่างสัมพัทธ์ของแครอทที่ต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลาการต้ม 20 นาทีแรกเหลือเพียงประมาณ 0.86 จากนั้นยังคงมีแนวโน้มที่จะลดลงต่อไปเมื่อระยะเวลาในการต้มนานขึ้น

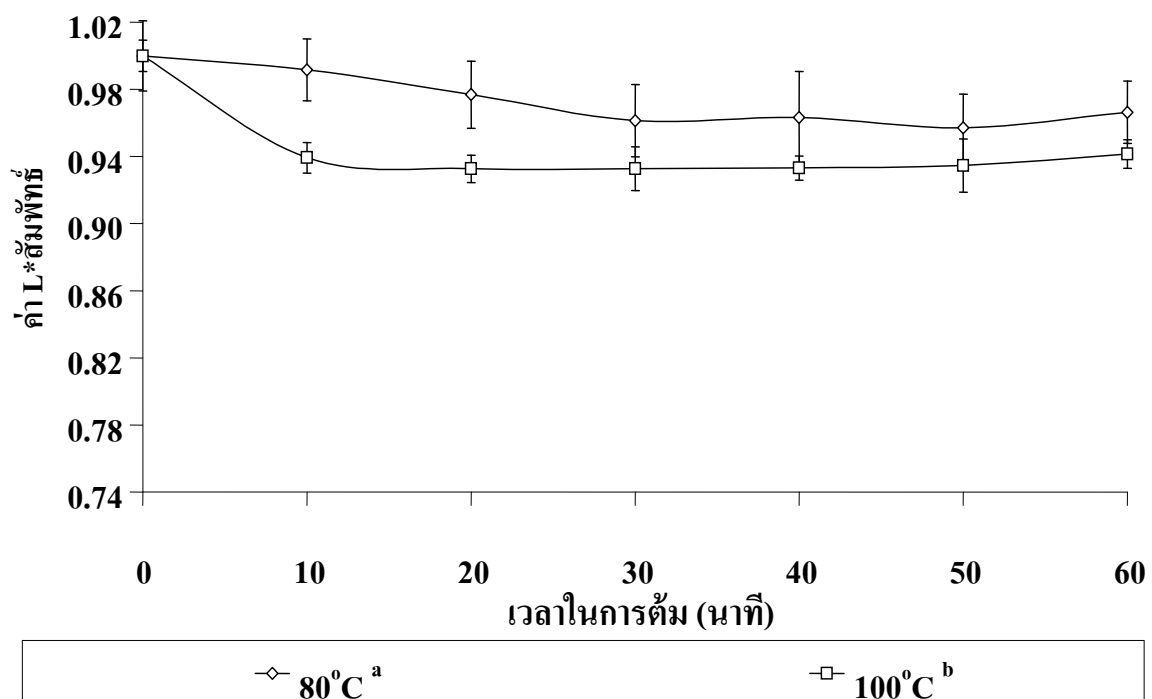
การลดลงของค่าความสว่าง (L^*) ของแครอทอาจเกิดเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น การสลายตัวของรงควัตถุสีต่างๆ การเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล โดยการลดลงของค่าความสว่างในช่วงแรกของการต้มที่อุณหภูมิต่างๆ ยังไม่มีงานวิจัยใดสามารถบอกรายละเอียดชัดเจนว่าเกิดจากสาเหตุใด Serkat และ Luh, 1976; Okitani และคณะ, 1983; Petropakis และ Montgomery, 1984; Shin และ Bhowmik, 1995; Barreiro และคณะ, 1997 กล่าวโดยรวมว่าการเปลี่ยนแปลงสีของอาหารเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนเกิดเนื่องจากกลไกหลายอย่าง รวมถึงการสลายตัวของรงควัตถุให้สี และปฏิกิริยาเมลลาร์ด

ปฏิกิริยาเกิดการสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non-enzymatic Browning Reaction) แบบปฏิกิริยาเมลลาร์ด เป็นการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการที่น้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งได้รับความร้อนในสภาวะที่มีน้ำกับเอมีน โดยน้ำตาลรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนในโมเลกุลของแอมโมเนียและจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล ซึ่งคาดว่าจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ค่าความสว่างลดลงภายใต้สภาวะอุณหภูมิการต้ม 140 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อสังเกตสีของน้ำที่ใช้ในการต้มแครอทที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสพบว่าการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการต้มผ่านไป (รูปที่ 5.35) ซึ่งเกิดจากสลายตัวเพคตินส่งผลให้ของผนังเซลล์ของแครอทเกิดการสลายตัว รงควัตถุสีน้ำตาลจึงสามารถแพร่ออกมายังน้ำที่อยู่บริเวณรอบๆ ได้

ค่าสีแดง (a^*) สัมพัทธ์ของแครอทได้จากการต้มที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.27 - 5.30 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสีแดงสัมพัทธ์ที่ได้จากการต้มแครอทที่ความดันเท่ากันพบว่าที่ระดับความดันในการต้มเท่ากัน การต้มแครอทที่อุณหภูมิสูงค่าสีแดงสัมพัทธ์จะลดลงเร็วกว่าการต้มที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าสีเหลือง (b^*) สัมพัทธ์ ภายใต้สภาวะการต้มเดียวกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (80, 100 และ 120 องศาเซลเซียส) ค่าสีเหลืองสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงลดน้อยลง (รูปที่ 5.31 - 5.34) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งสองนี้อาจเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์จากรูปแบบ Trans Form ซึ่งมีสีแดง-ส้ม เป็นรูปแบบ Cis Form ซึ่งมีสีส้ม-เหลือง ค่าสีเหลืองสัมพัทธ์จึงเพิ่มขึ้นขณะที่ค่าสีแดงสัมพัทธ์ลดลง

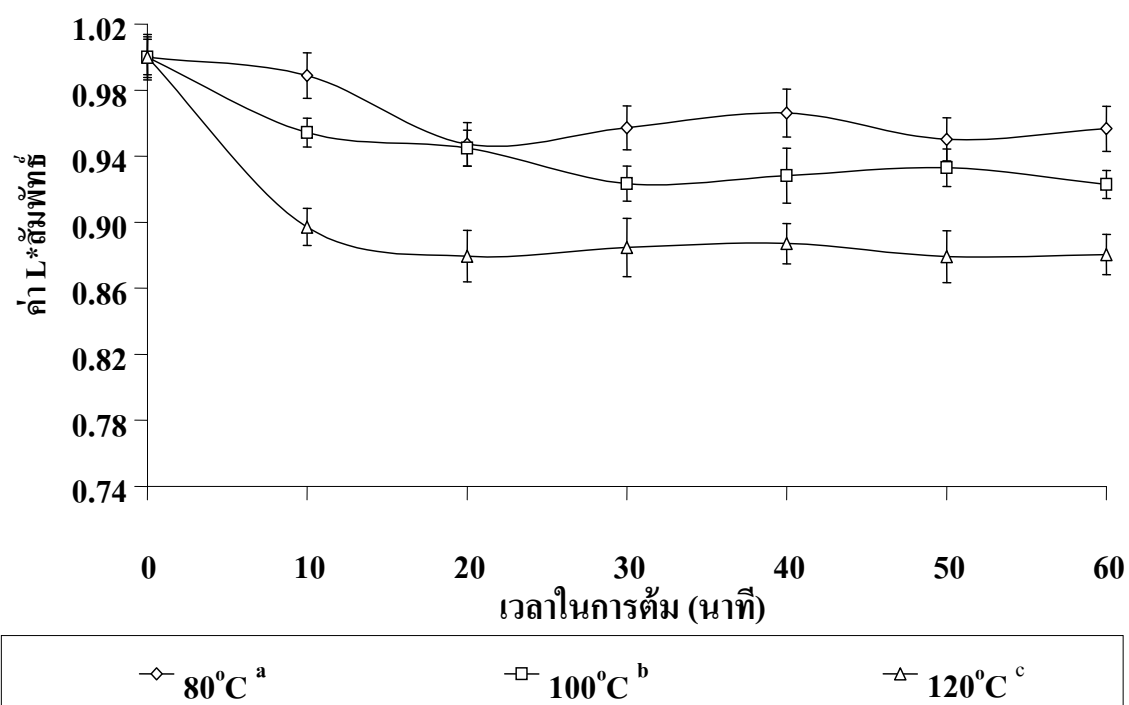
ในธรรมชาติแล้วแคโรทีนอยด์ที่อยู่ในแครอทจะอยู่ในรูปแบบ มากกว่า Cis Form แต่เมื่อแครอทผ่านกระบวนการให้ความร้อน แคโรทีนอยด์ที่ได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากรูปแบบ Trans Form เป็น Cis Form จากงานวิจัยของ Chen และคณะ (1996) พบว่าเมื่อน้ำแครอทผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณ เบต้า แอลฟา แคโรทีนอยด์ ในรูปแบบโครงสร้างแบบ Trans Form มีค่าลดลง และเมื่อทำการเก็บน้ำแครอทต่อไปพบว่า แคโรทีนอยด์ในรูปแบบโครงสร้างแบบ Cis Form มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการต้มที่ 140 องศาเซลเซียสพบว่าทั้งค่าสีแดงและค่าสีเหลืองมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการถ่ายทอดของสารให้สีน้ำตาลไปยังน้ำ

จากผลการทดลองทุกสภาวะพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสีมีความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญ (ในช่วงระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิ 80 ถึง 140 องศาเซลเซียส ในกระบวนการต้มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของแครอท



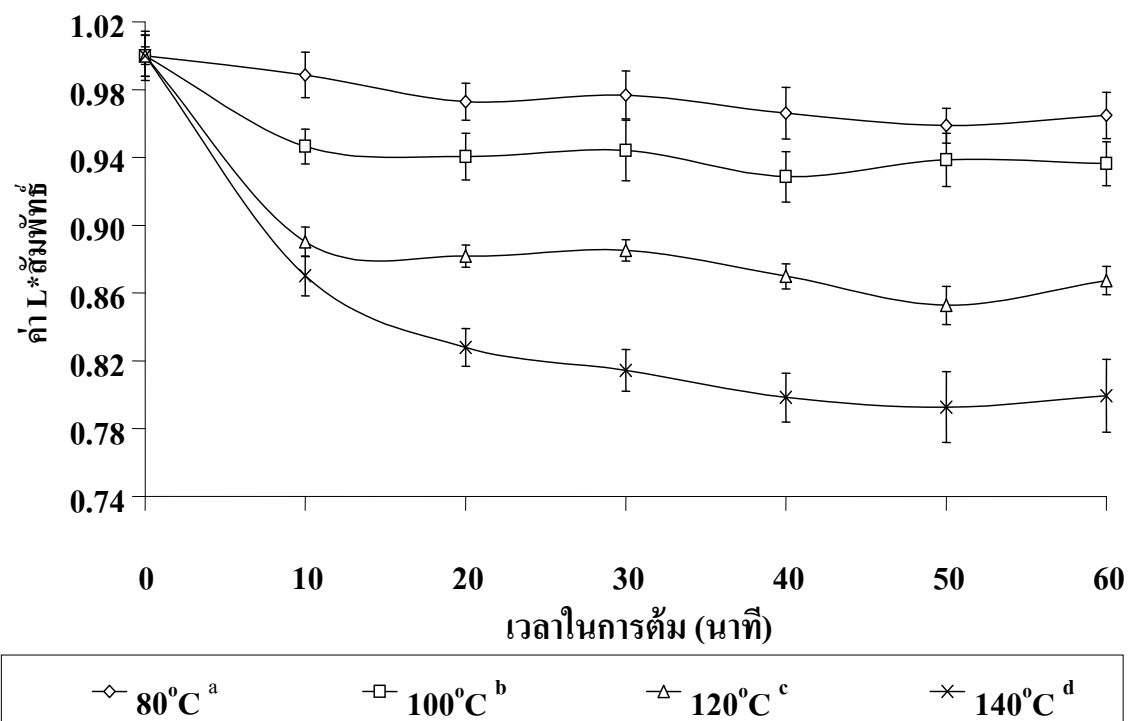
รูปที่ 5.23 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



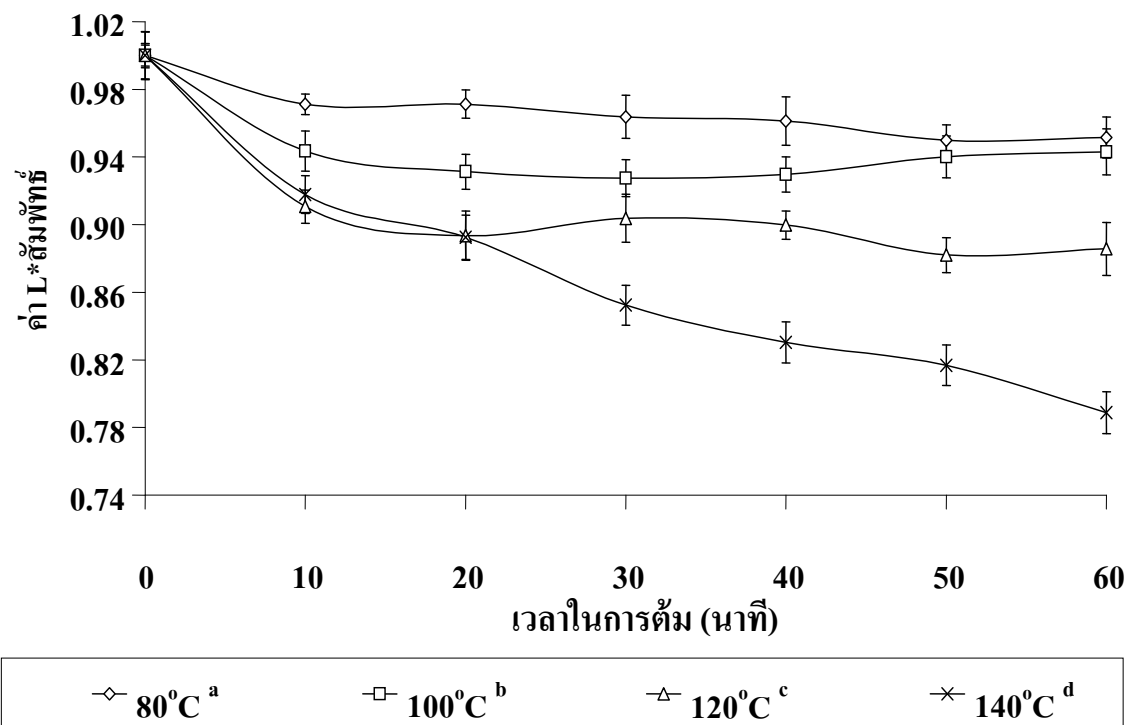
รูปที่ 5.24 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



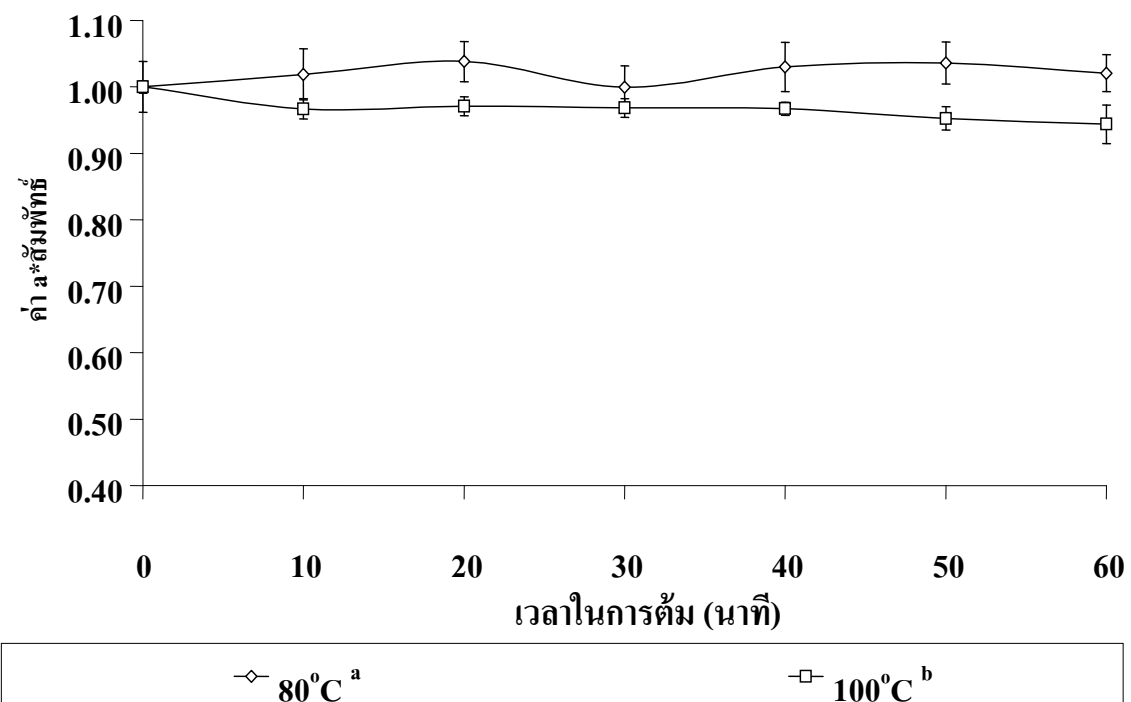
รูปที่ 5.25 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



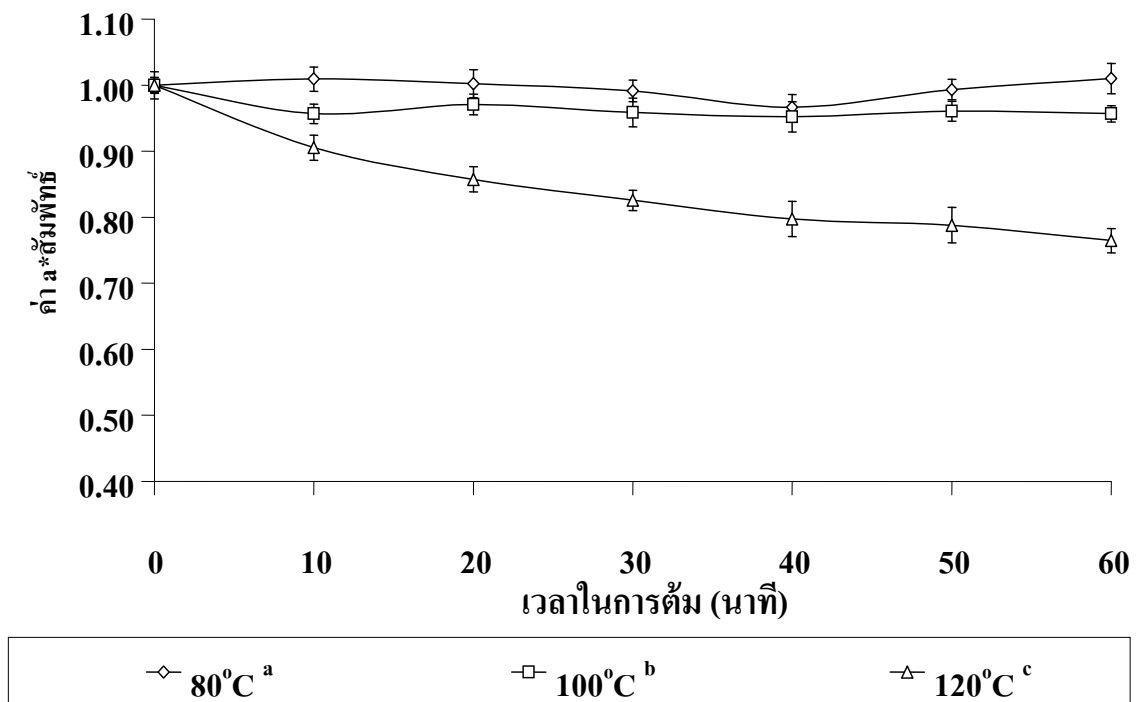
รูปที่ 5.26 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



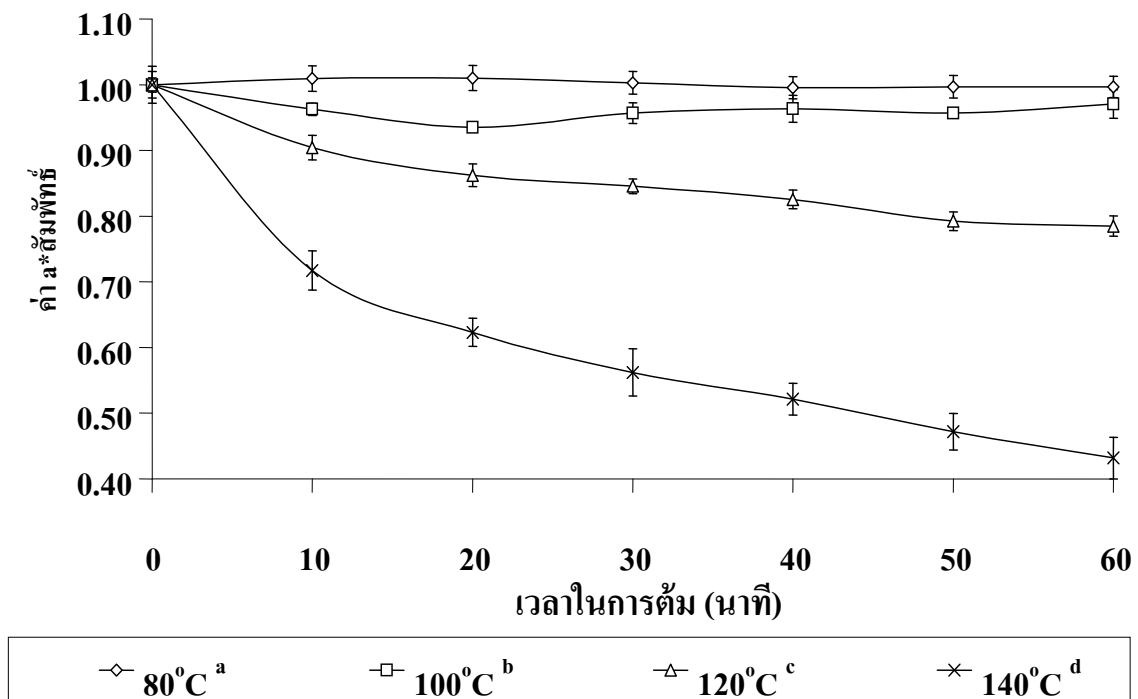
รูปที่ 5.27 ค่า a* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



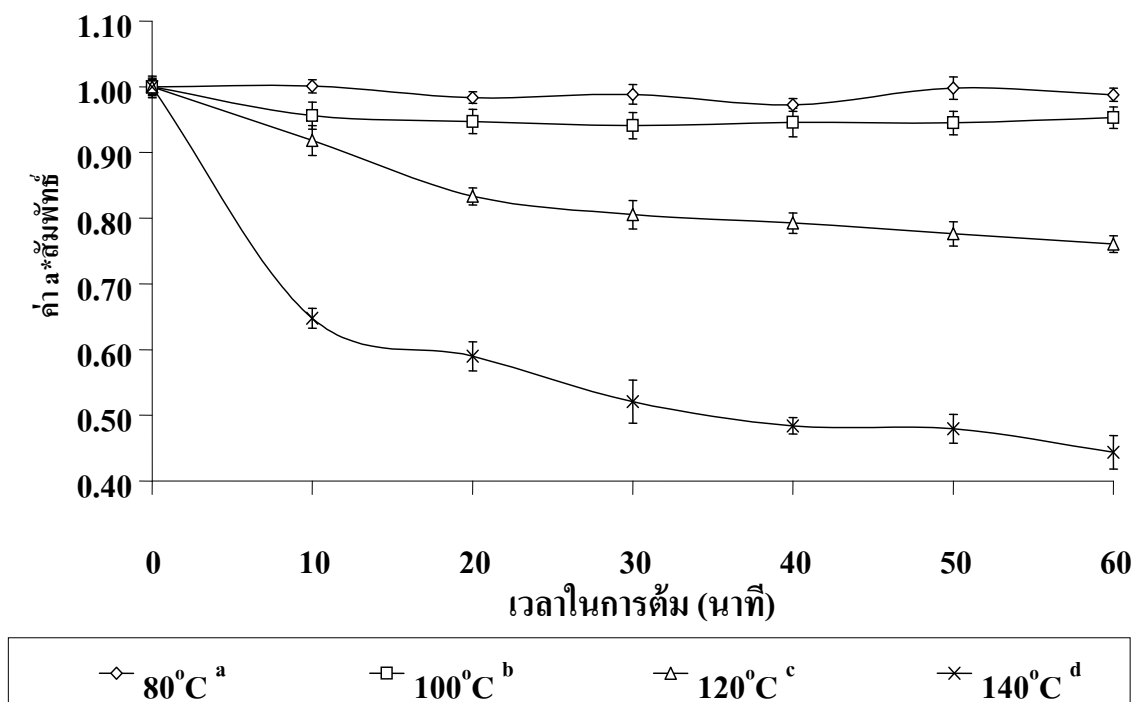
รูปที่ 5.28 ค่า a* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



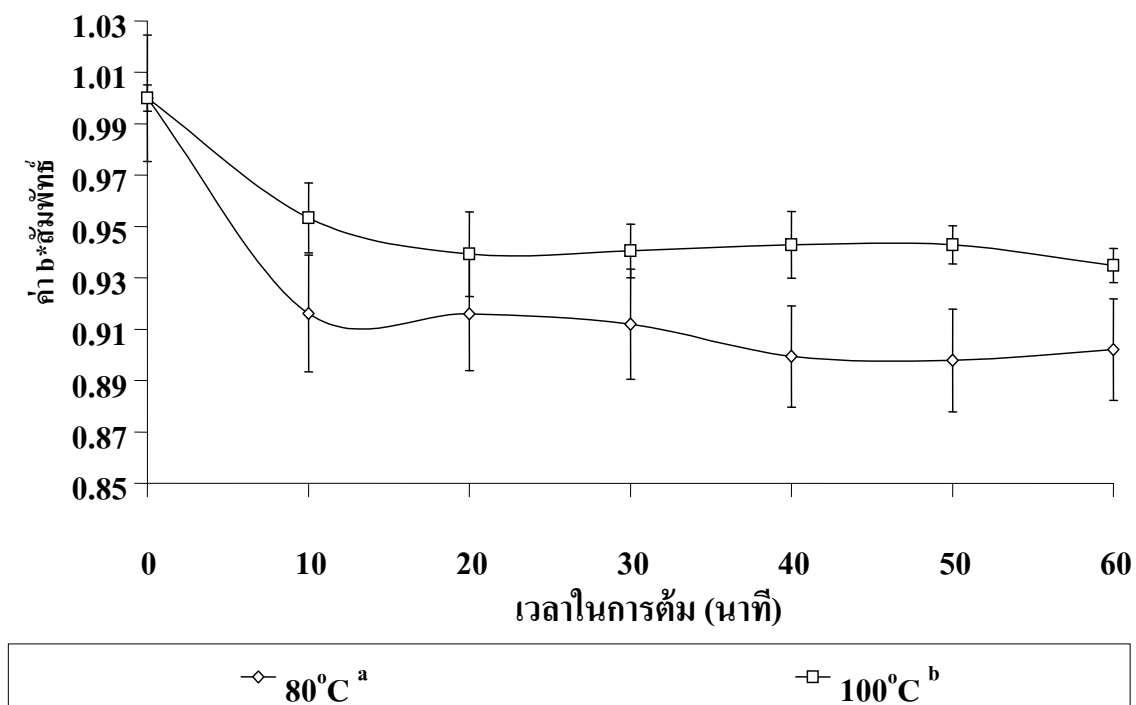
รูปที่ 5.29 ค่า a* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



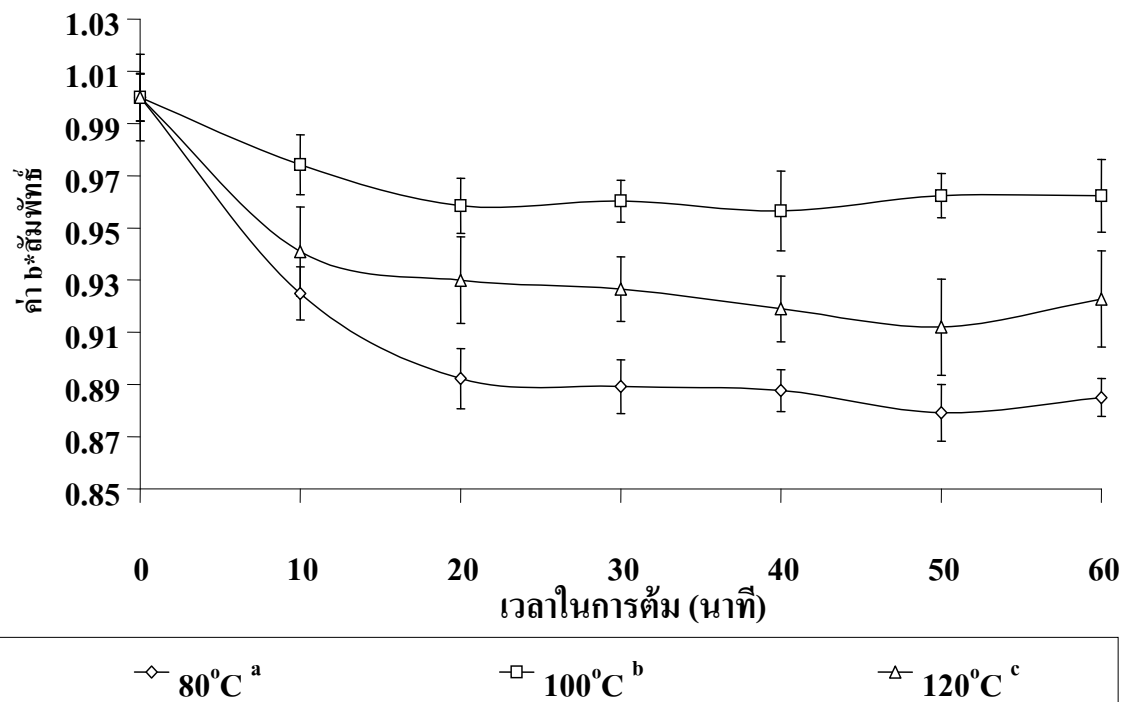
รูปที่ 5.30 ค่า a* ส้มพัทของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



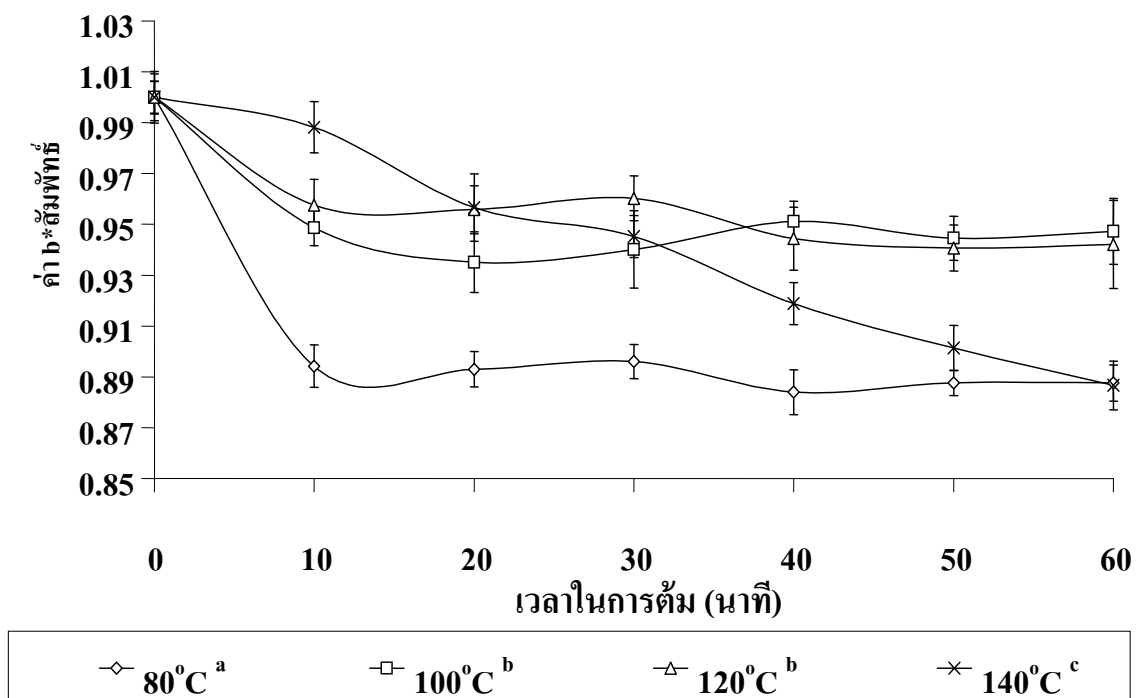
รูปที่ 5.31 ค่า b* ส้มพัทของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



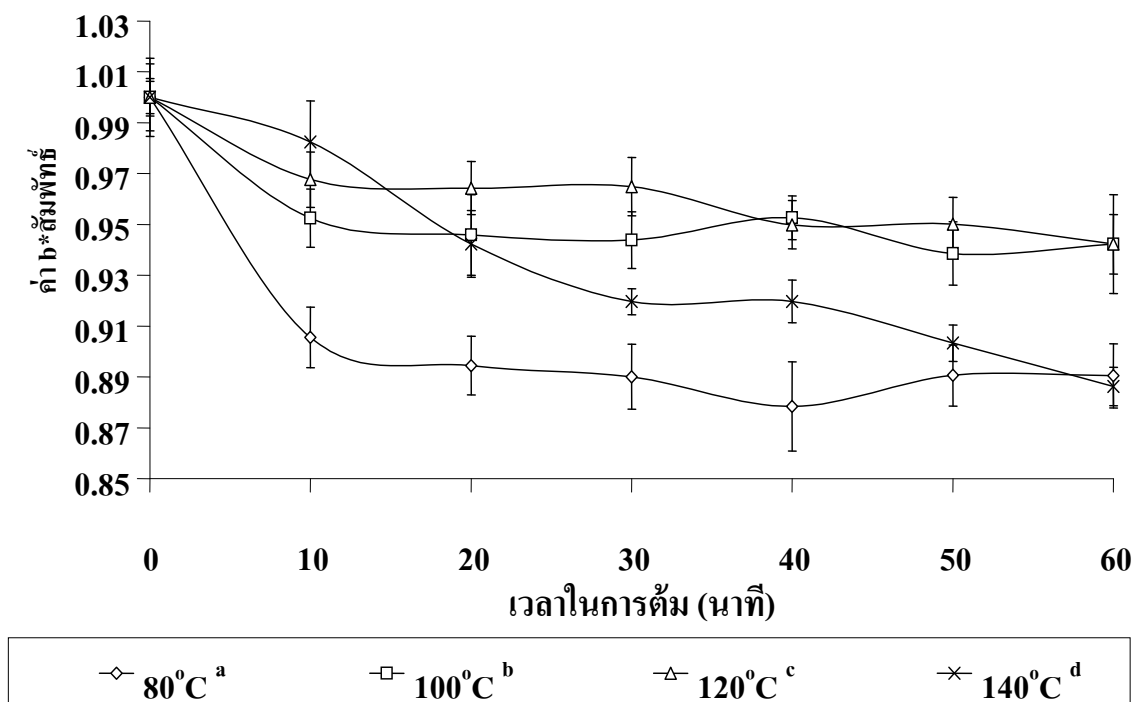
รูปที่ 5.32 ค่า b^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)

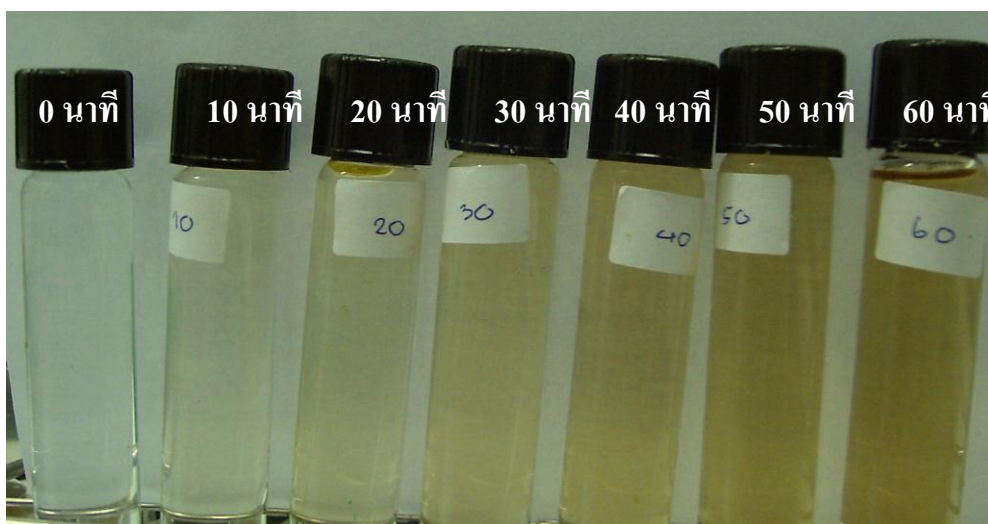


รูปที่ 5.33 ค่า b^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ

(Turkey's test, $p < 0.05$)



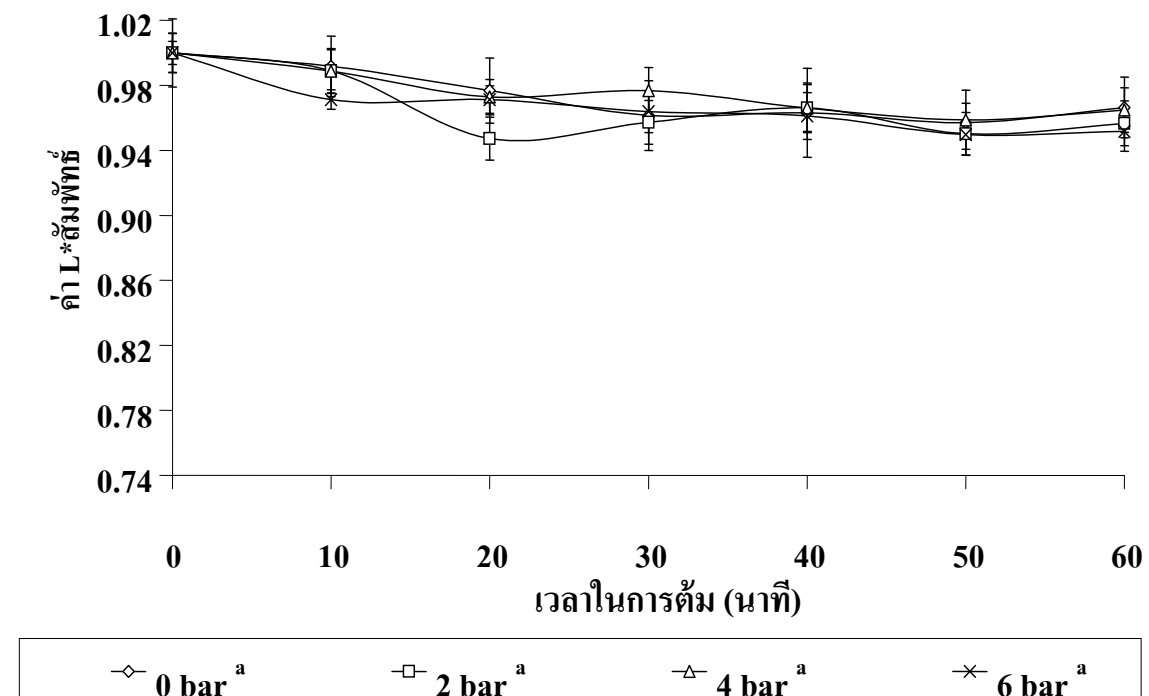
รูปที่ 5.34 ค่า b* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ
(Turkey's test, $p < 0.05$)



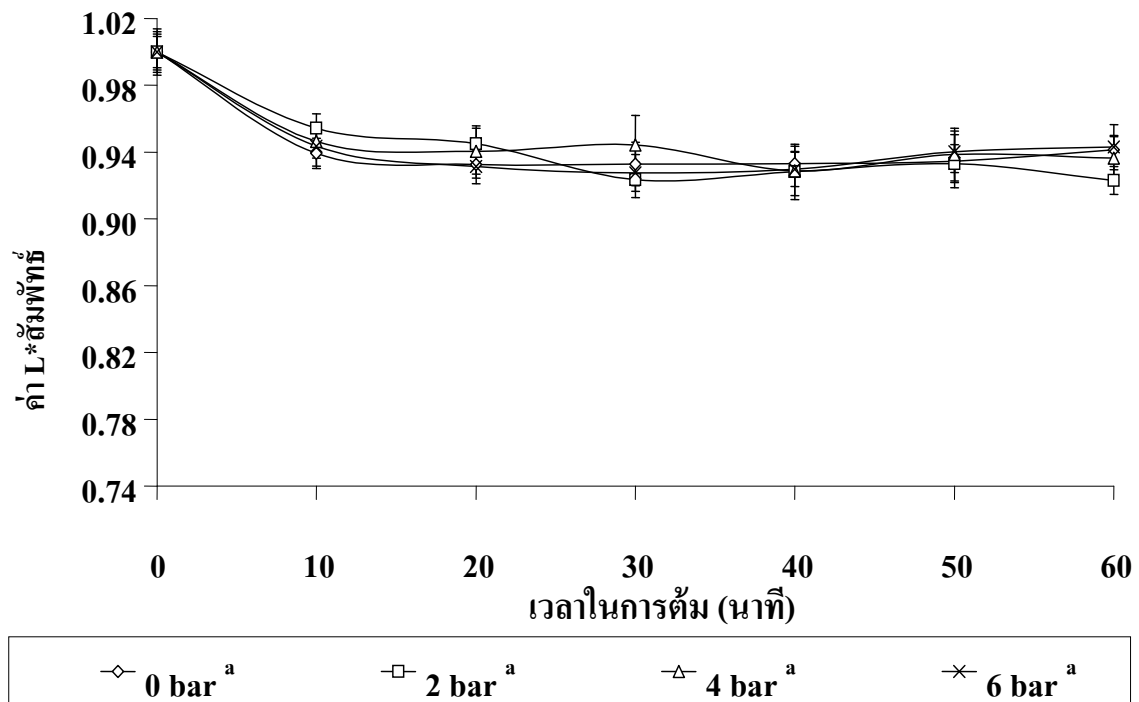
รูปที่ 5.35 การเปลี่ยนสีของน้ำต้มแครอทเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล
ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 6 บาร์ ณ เวลาต้มต่างๆ

5.2.1.2 ผลของความดันในกระบวนการต้ม

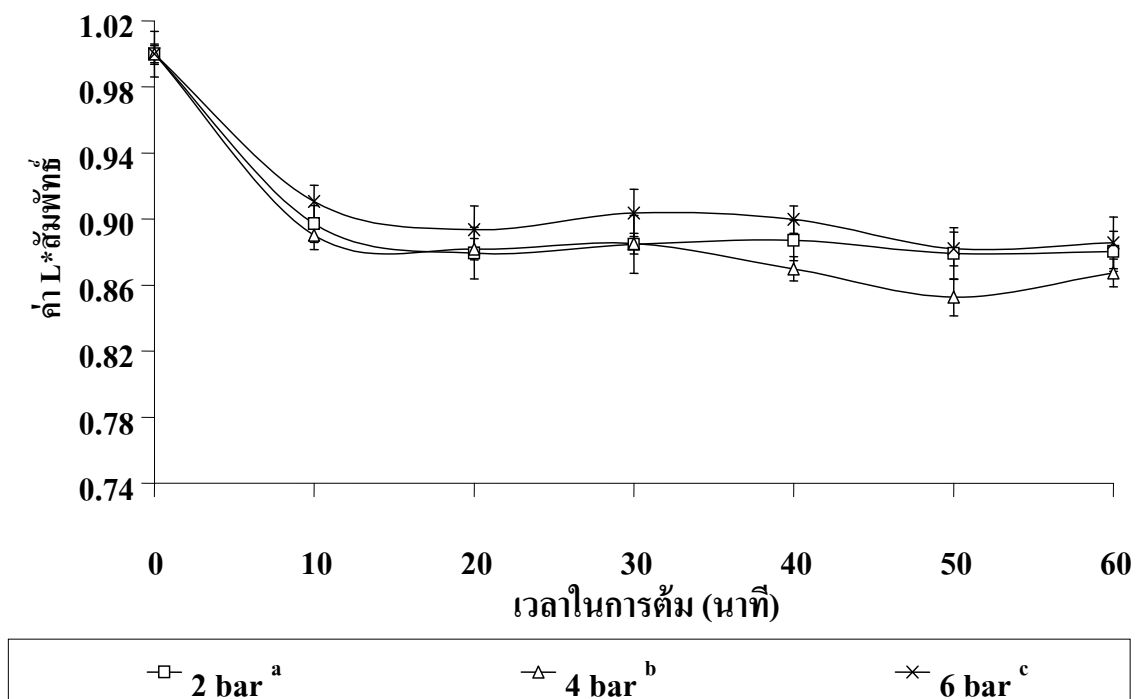
จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันในการต้มต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของแครอทโดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมพัทธ์ของค่าสีของแครอทที่ได้จากการต้มที่ความดันต่างๆ (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันในช่วงเวลาการต้ม 60 นาที โดยรูปที่ 5.36 - 5.39 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง (L^*) รูปที่ 5.40 - 5.43 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง (a^*) รูปที่ 5.44 - 5.47 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลือง (b^*) จากผลการศึกษาเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสีต่างๆของแครอทที่ต้มภายใต้สภาวะความดันที่แตกต่างกัน (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ที่สภาวะการต้มภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดปกติ (80 และ 100 องศาเซลเซียส) ความแตกต่างของความดันในการต้มไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี (ทั้งค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลือง) ของแครอท อย่างมีระดับนัยสำคัญ โดยค่าสีที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดเนื่องจากผลของระยะเวลาในการต้ม อย่างไรก็ตามเมื่อแครอทที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดปกติ (120 และ 140 องศาเซลเซียส) พบว่าความดันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ซึ่งผลการทดลองมีความคล้ายกับผลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น เมื่อความดันในกระบวนการต้มมากขึ้นส่งผลให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปในเซลล์ได้เพิ่มขึ้น ค่าความสว่างของแครอทจึงมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.38 และ 5.39



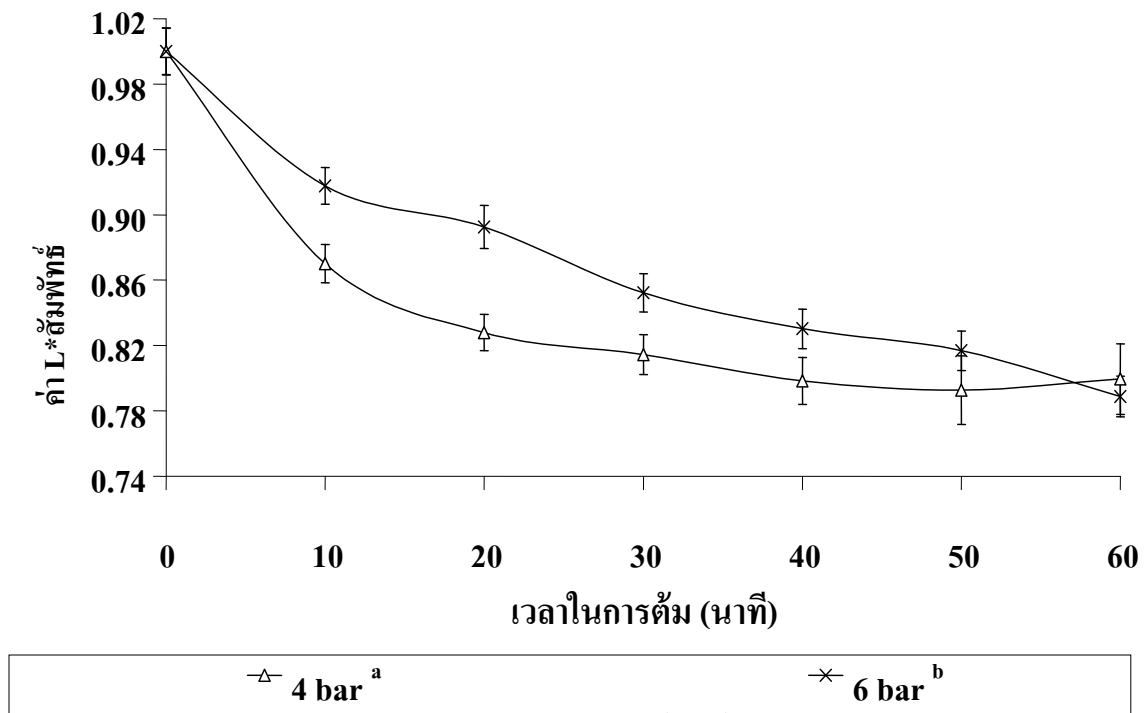
รูปที่ 5.36 ค่า L^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



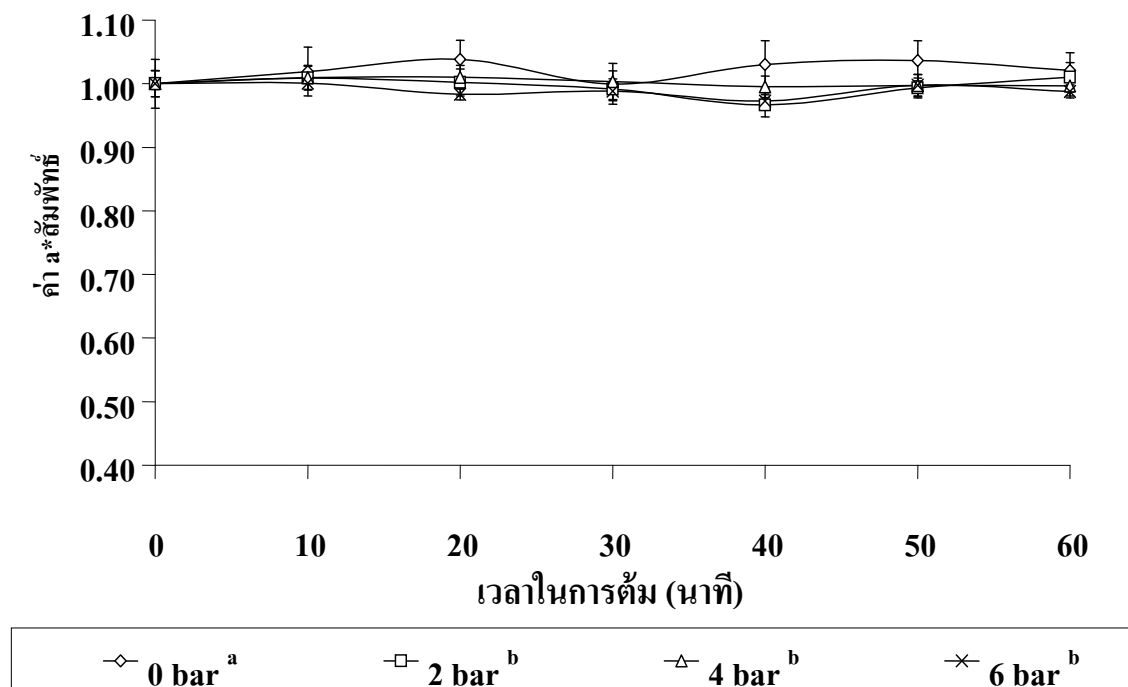
รูปที่ 5.37 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



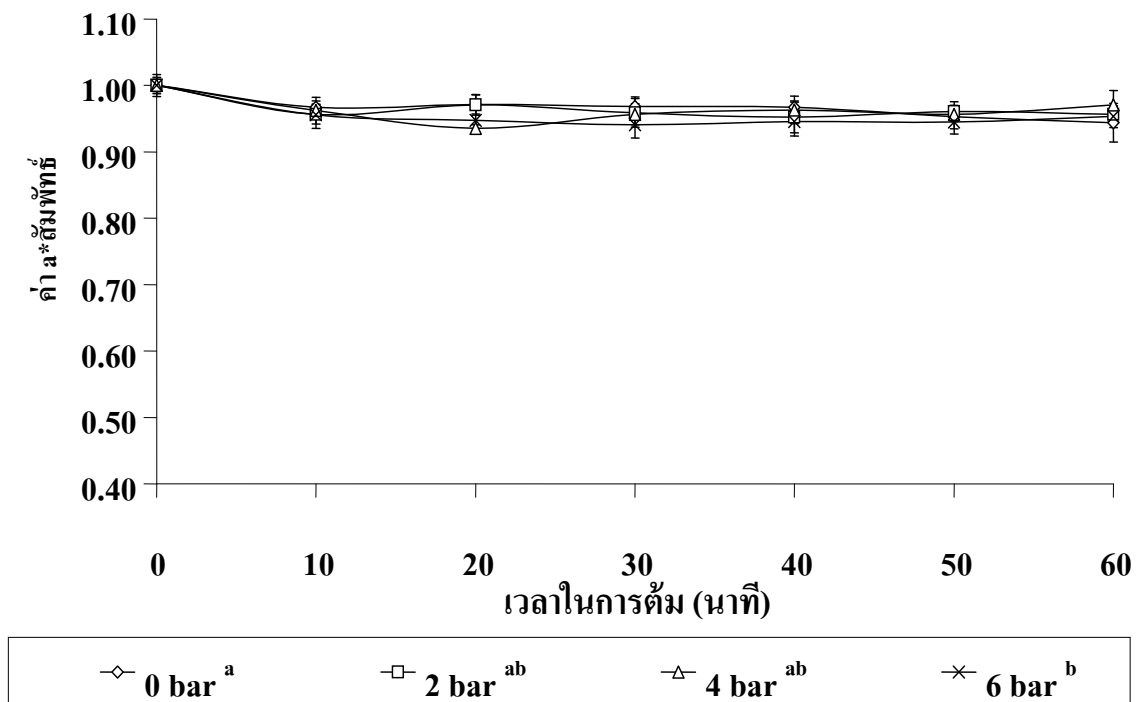
รูปที่ 5.38 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



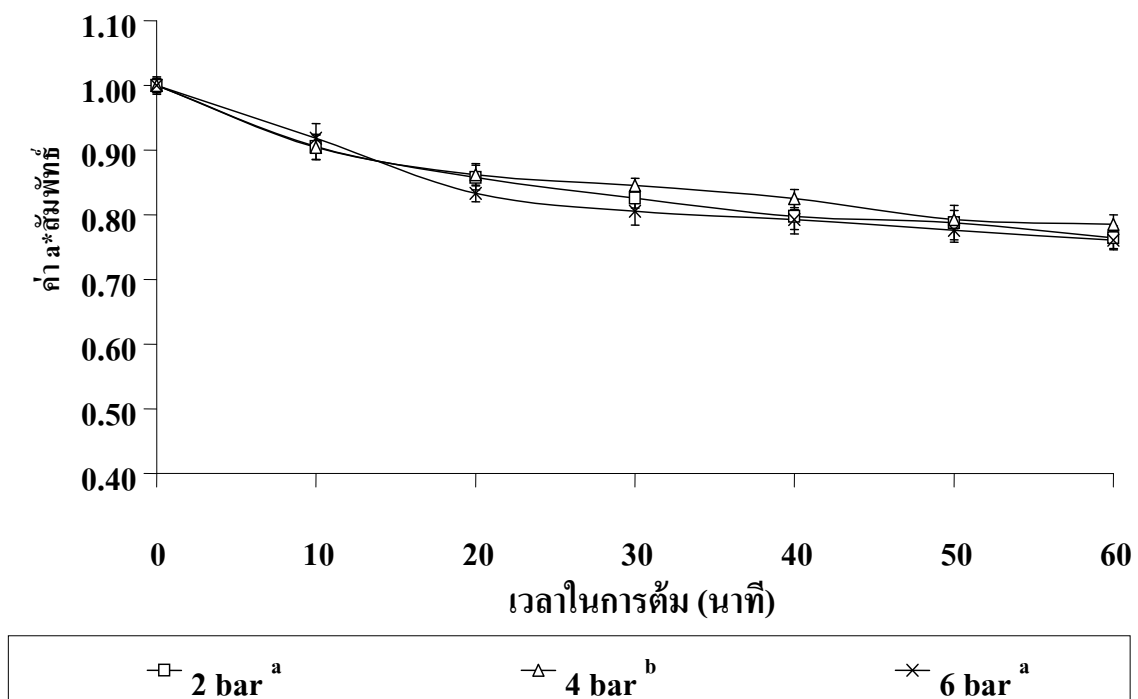
รูปที่ 5.39 ค่า L* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



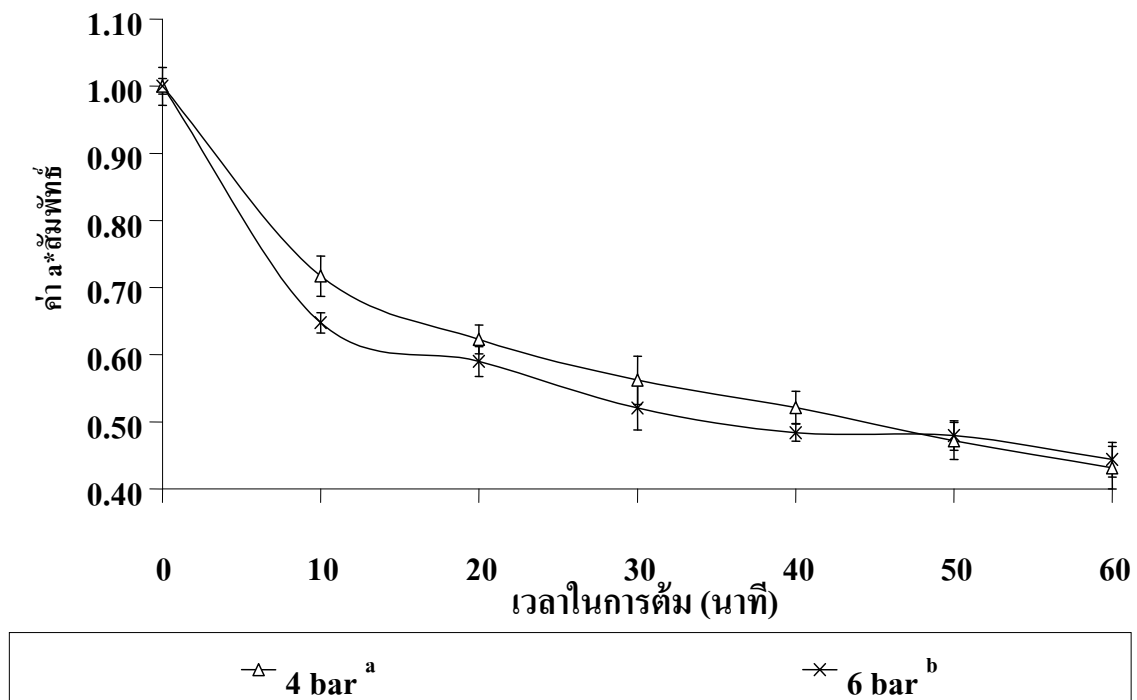
รูปที่ 5.40 ค่า a* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



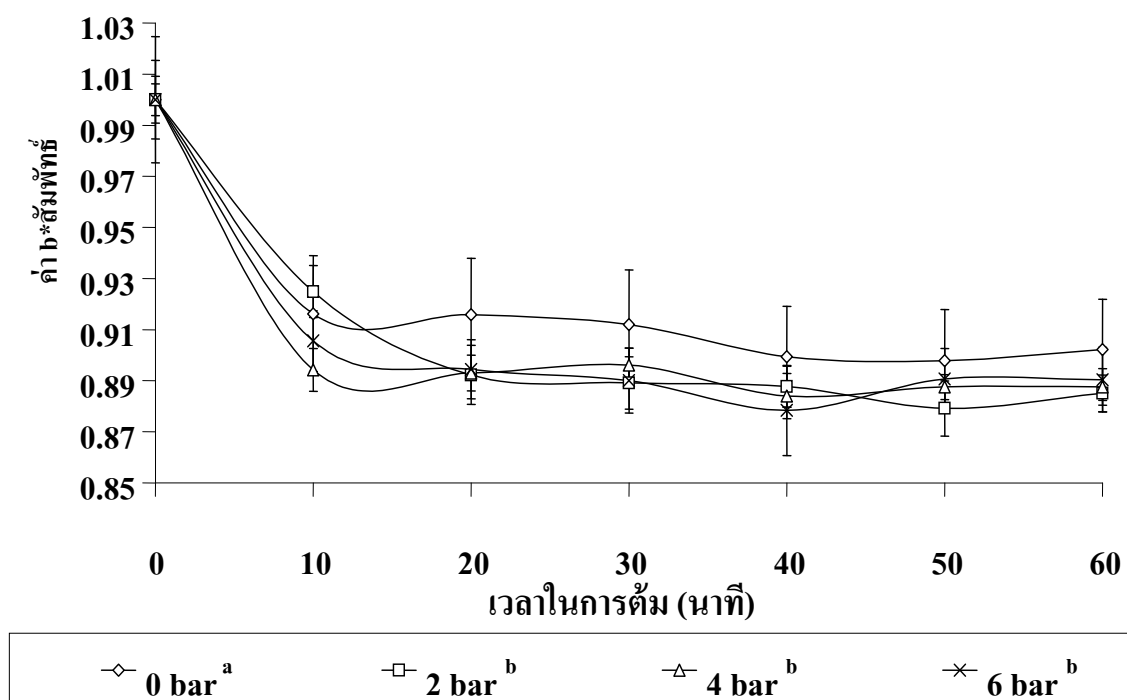
รูปที่ 5.41 ค่า a^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



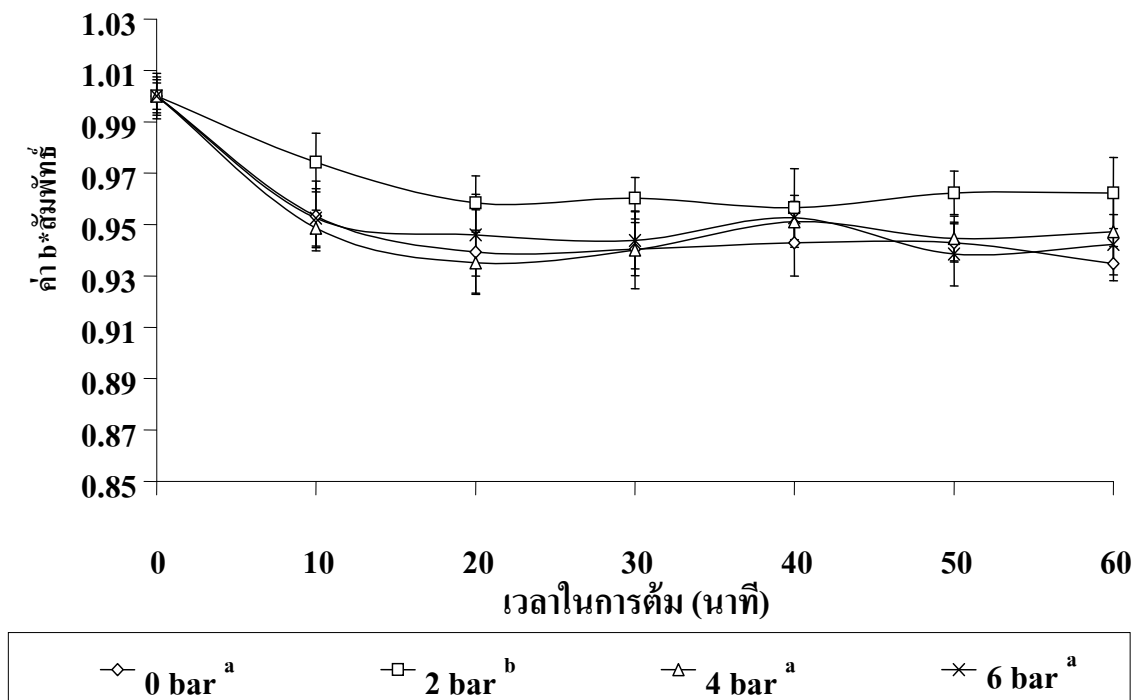
รูปที่ 5.42 ค่า a^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



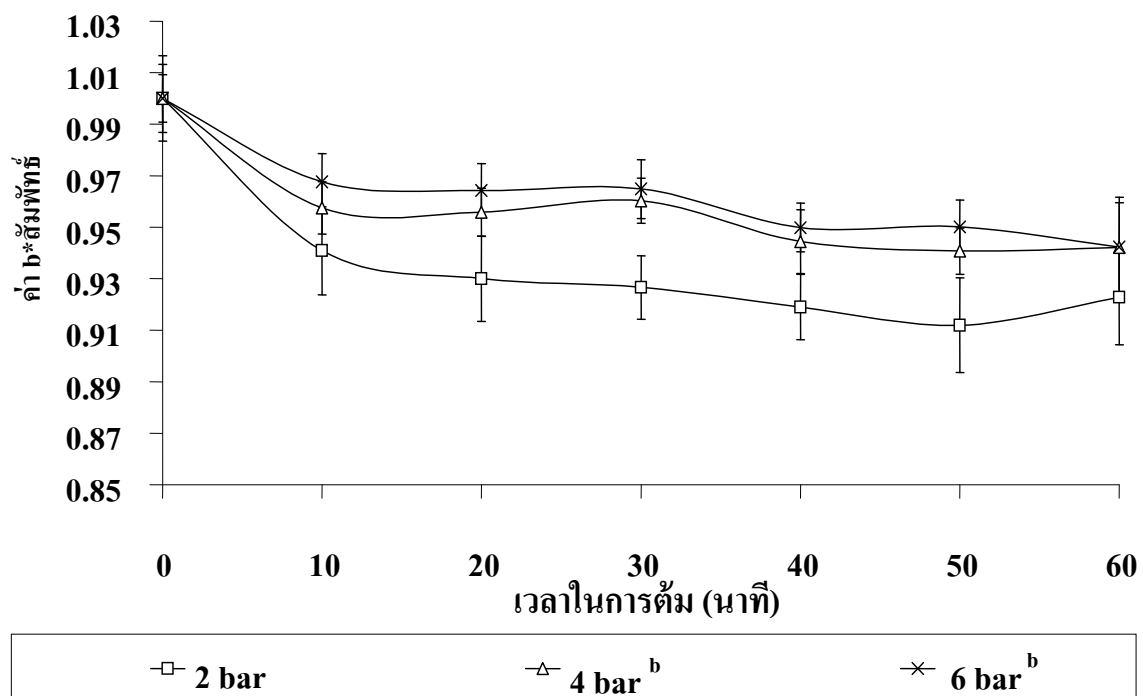
รูปที่ 5.43 ค่า a^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



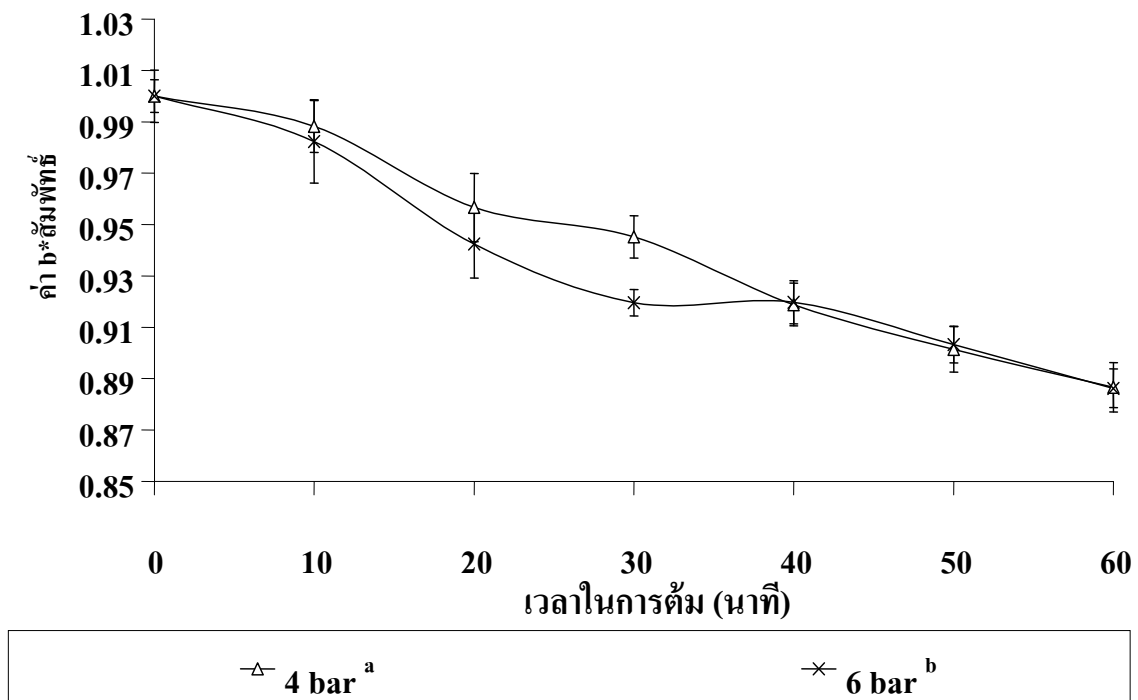
รูปที่ 5.44 ค่า b^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.45 ค่า b^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.46 ค่า b^* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.47 ค่า b* สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่าง ๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)

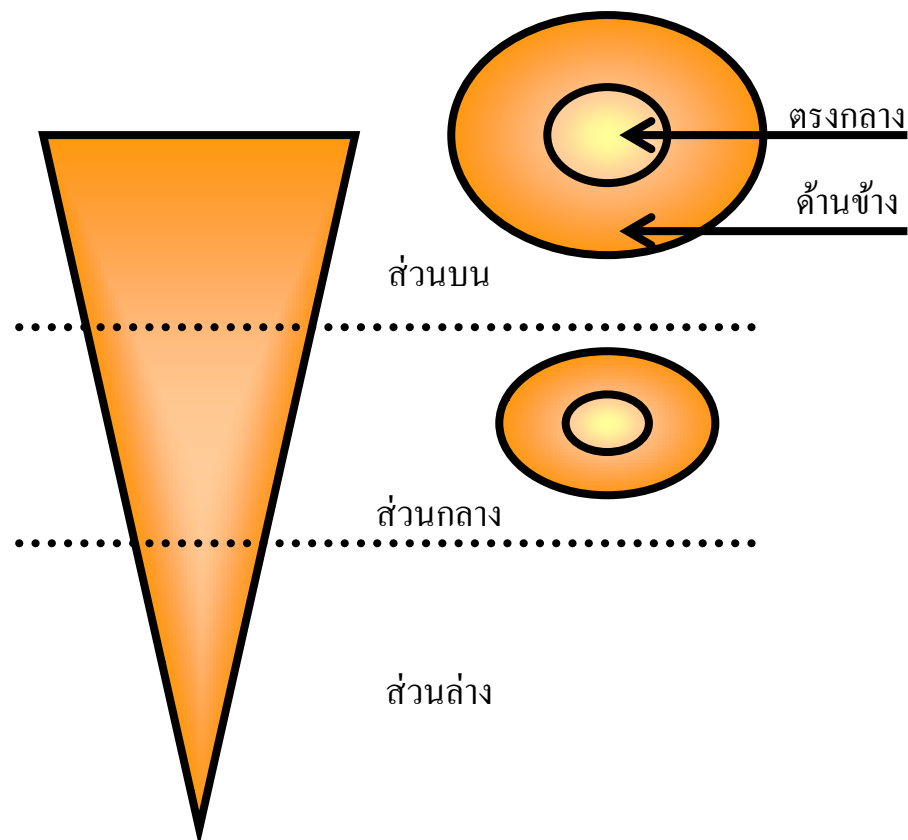
5.2.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด

ในการทดลองนี้ทำการหาปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Total Carotenoids) โดยใช้วิธีของ Howard และคณะ (1996) จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในส่วนต่างๆของแครอท และทำการศึกษาผลของสภาวะการต้มต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแครอทที่ต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส และความดัน 0, 2, 4 และ 6 บาร์ โดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

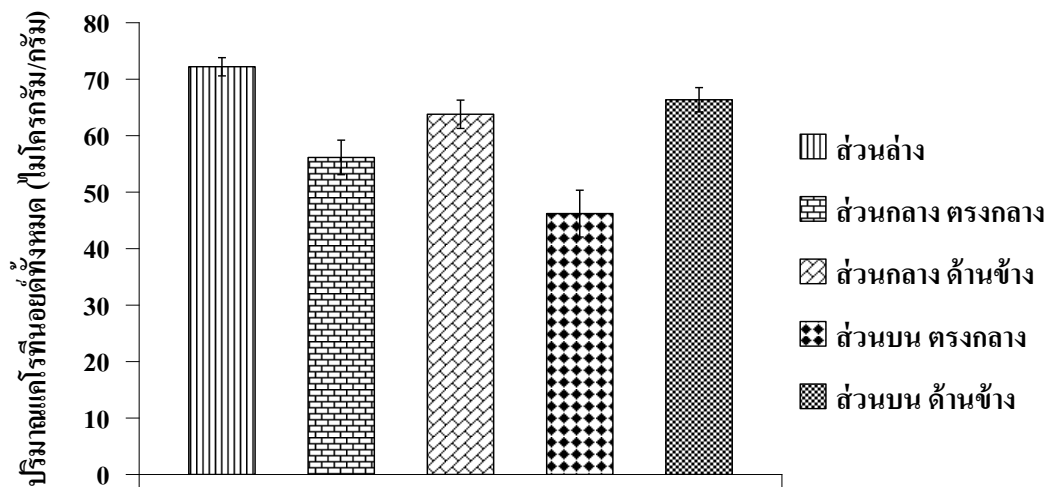
5.2.2.1 ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในส่วนต่างๆของแครอท

ในการศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดในส่วนต่างๆของแครอทเริ่มจากการแบ่งแครอทออกเป็น 5 ส่วนซึ่งประกอบด้วย ส่วนบน-ด้านข้าง ส่วนบน-ตรงกลาง ส่วนกลาง-ตรงกลาง ส่วนกลาง-ด้านข้าง และส่วนล่าง แสดงดังรูปที่ 5.48 เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณ แคโรทีนอยด์ในส่วนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.49

จากผลการทดลองพบว่า บริเวณตรงกลางของทั้งส่วนบนและส่วนล่างของแครอทมีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดน้อยกว่าบริเวณด้านข้าง ส่วนบน และส่วนกลาง และด้านล่าง ซึ่งที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์ใกล้เคียงกัน สาเหตุที่บริเวณตรงกลางมีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยเนื่องจากบริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยท่อลำเลียงน้ำและอาหาร จากการสังเกตในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างพบว่า ในบริเวณนี้ของแครอทบางลูกมีลักษณะใส ไม่มีสี หรือมีสีส้มอ่อน จึงมีปริมาณแคโรทีนอยด์น้อยกว่าบริเวณอื่น ซึ่งมีสีส้ม-แดง แสดงถึงปริมาณแคโรทีนอยด์ที่มีมากกว่า จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณแคโรทีนอยด์ในส่วนต่างๆของแครอทมีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีระดับนัยสำคัญ (ที่ช่วงระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์) ดังนั้นในการทดลองในส่วนต่อไปคือการศึกษาผลของสภาวะกระบวนการต้มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์จึงได้ทำการตัดบริเวณตรงกลางออก และใช้เฉพาะบริเวณด้านข้างและด้านล่างในการศึกษาเท่านั้น



รูปที่ 5.48 ส่วนต่างๆ ของแครอทที่ใช้วิเคราะห์แคโรทีนอยด์ทั้งหมด



รูปที่ 5.49 ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในส่วนต่างๆของเครื่องยนต์

5.2.2.2 ผลของความดันและอุณหภูมิในกระบวนการต้ม

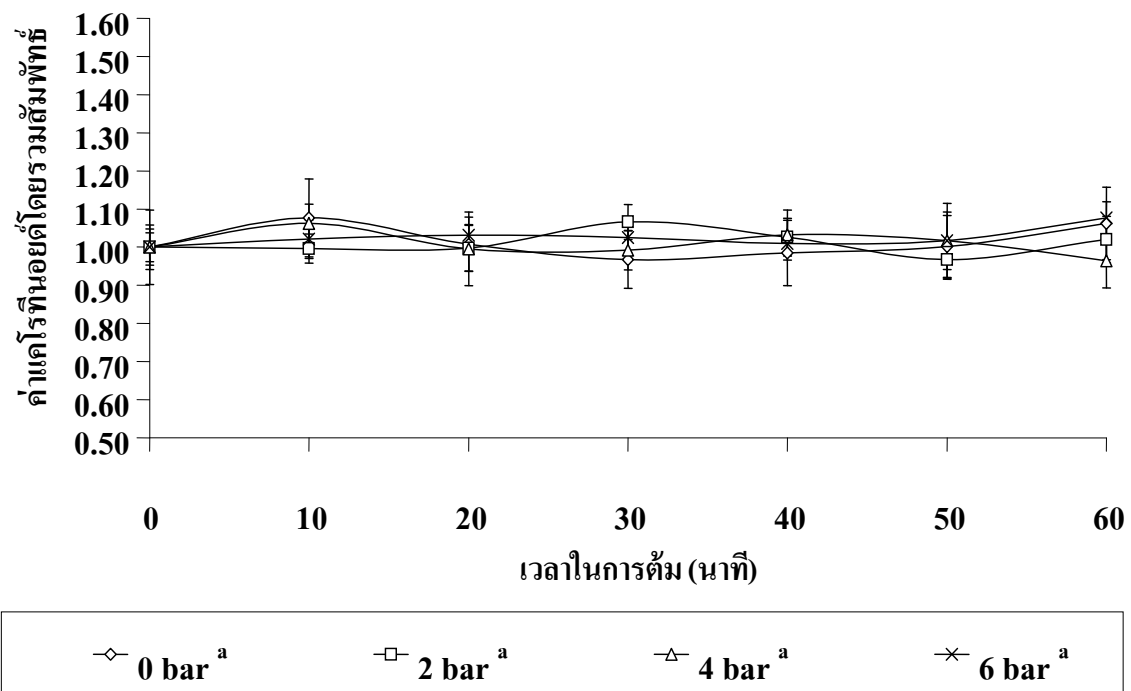
จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิในการต้มต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งหมดของเครื่องยนต์โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมพัทธ์ของค่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเครื่องยนต์ที่ได้จากการต้มที่ความดันต่างๆ (0, 2, 4 และ 6 บาร์) ภายใต้อุณหภูมิเดียวกันในช่วงเวลาการต้ม 60 นาที แสดงดังรูปที่ 5.50 - 5.53 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัมพัทธ์ของค่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ของเครื่องยนต์ที่ได้จากการต้มที่อุณหภูมิต่างๆ (80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส) ภายใต้ความดันเดียวกันแสดงดังรูปที่ 5.54 - 5.57

จากผลการทดลองทุกสภาวะแสดงให้เห็นว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเครื่องยนต์มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ซึ่งเกิดเนื่องจากการสุมชิ้นเครื่องยนต์จากตำแหน่งและส่วนที่แตกต่างกัน และเครื่องยนต์ต่างกัน (จำนวน 5 หัว) เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งหมดเนื่องจากผลของความดันและอุณหภูมิในการต้มพบว่า ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้งหมดไม่แตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในเครื่องยนต์ เนื่องจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารที่ทนความร้อนได้สูง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเท่านั้น ไม่เกิดการสลายตัว

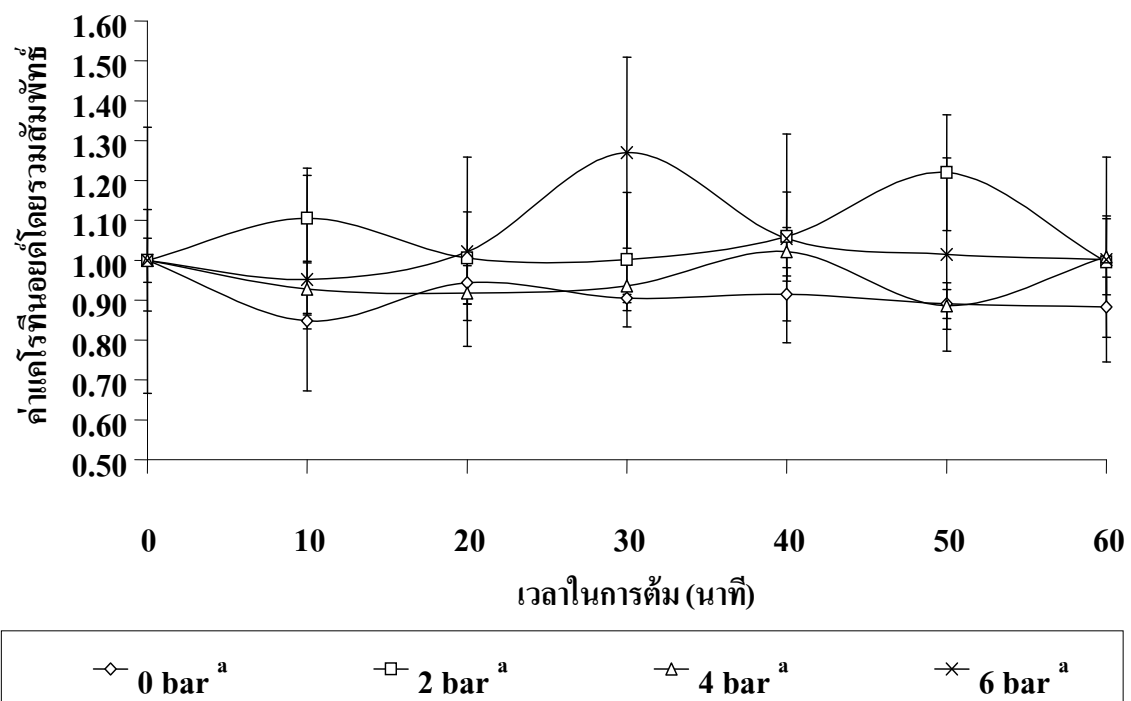
ผลของกระบวนการให้ความร้อนต่อปริมาณแคโรทีนอยด์เป็นที่ซับซ้อน ปริมาณแคโรทีนอยด์อาจจะเพิ่มขึ้น ลดลงหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Park, 1987; Chandler and Schwartz, 1988; Gross, 1991; Khachik et al., 1992; Lessin et al., 1997) food color 209, กระบวนการผ่านความร้อนบางประเภทเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของแคโรทีนอยด์ซึ่งนำไปสู่การลดลงของปริมาณแคโรทีนอยด์ ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอาจเกิดขึ้น ขึ้นกับระยะเวลาและวิธีการให้ความร้อน (Park, 1987; Chandler and Schwartz, 1988; Gross, 1991; Khachik et al., 1992; Lessin et al., 1997)

จากงานวิจัยของ Howard และคณะ (1996) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิในหม้อฆ่าเชื้อ (Retort) ต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ในแครอท โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดของแครอทที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ (118.3, 121.1, 123.9 องศาเซลเซียส) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด

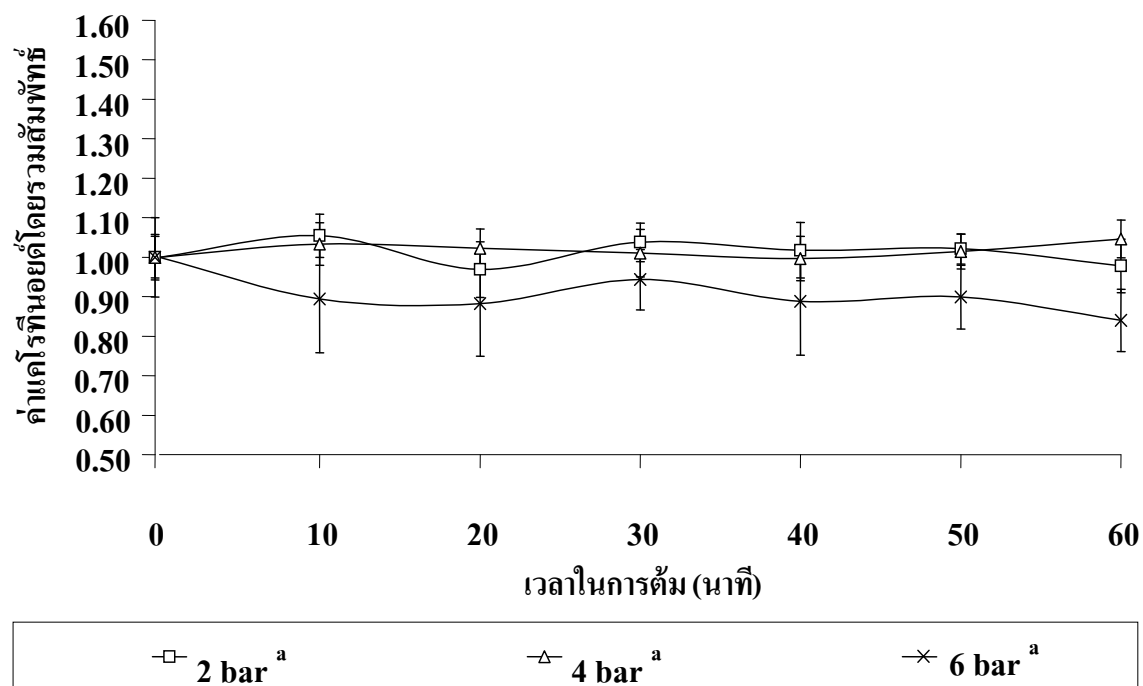
นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการต้มผ่านไป ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากแคโรทีนอยด์เป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นการต้มจึงไม่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนในแครอท (Hutchings, 1994; Birch, 1986) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความแตกต่างของความดัน 0 ถึง 6 บาร์ และความแตกต่างของอุณหภูมิ 80 ถึง 140 องศาเซลเซียส ในกระบวนการต้ม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของแครอทที่ผ่านการต้ม



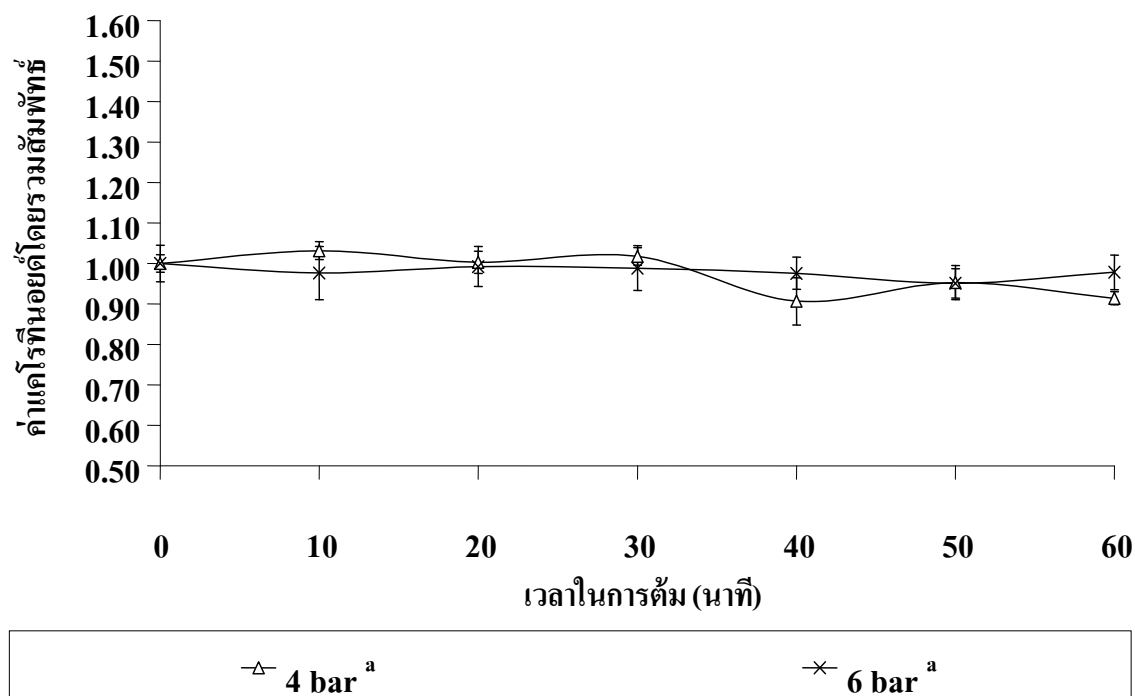
รูปที่ 5.50 ค่าแคโรทีนอยด์สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



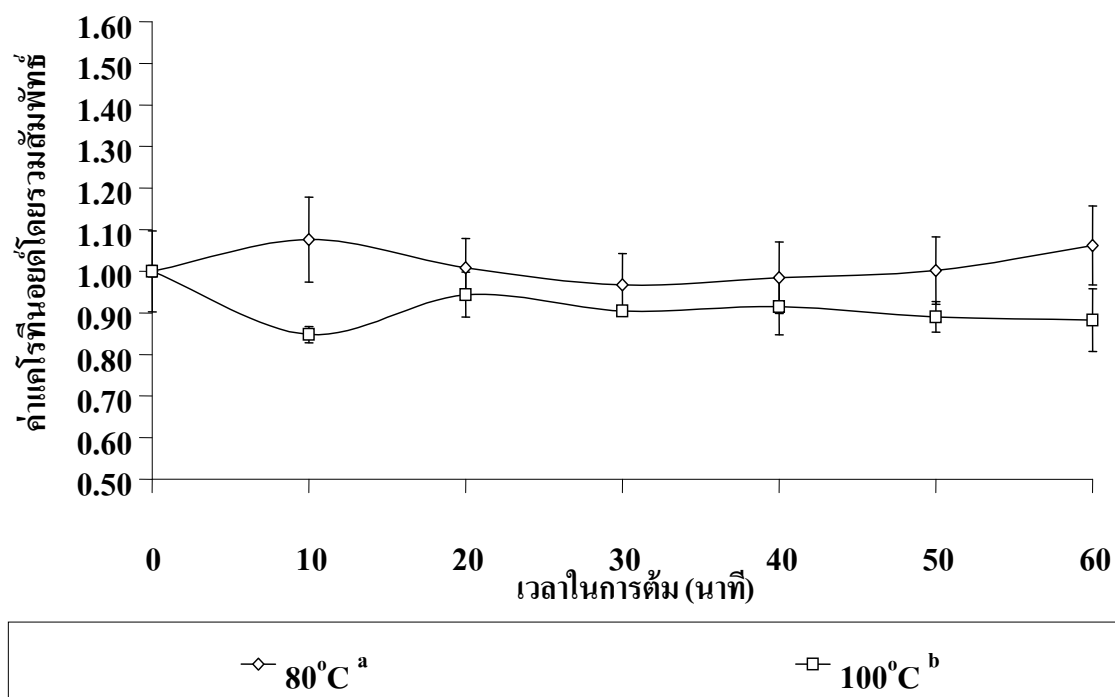
รูปที่ 5.51 ค่าแคโรทีนอยด์สัมพัทธ์ของแครอทภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



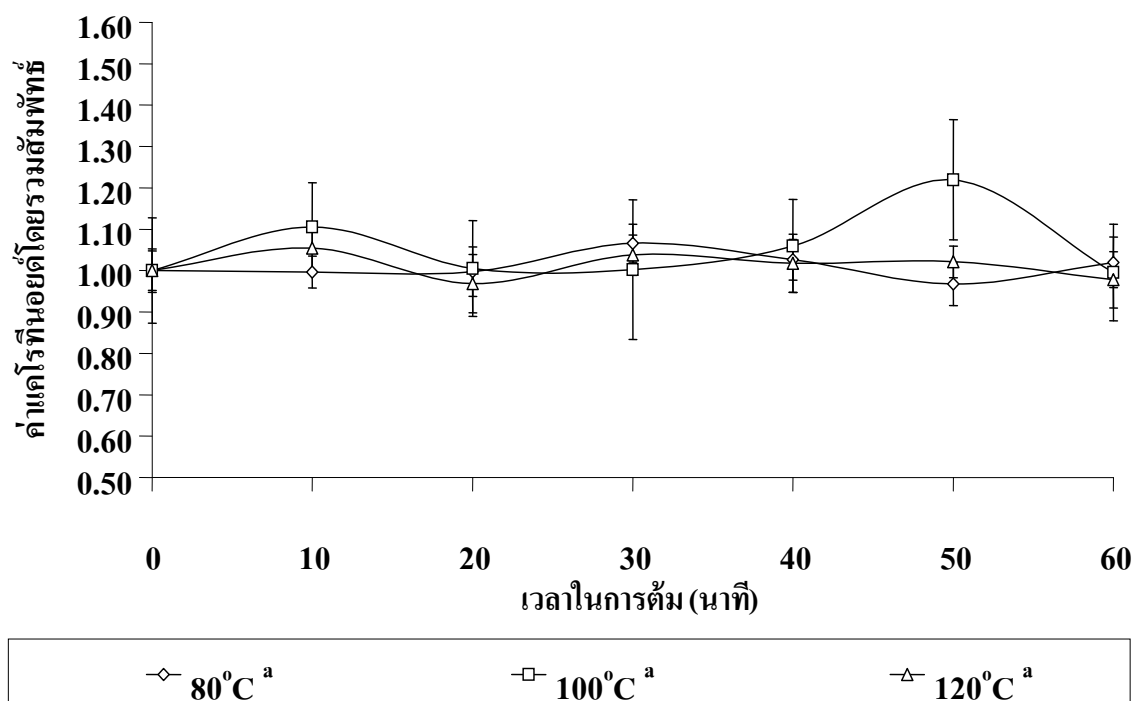
รูปที่ 5.52 ค่าเฉลี่ยโดยรวมน้อยของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



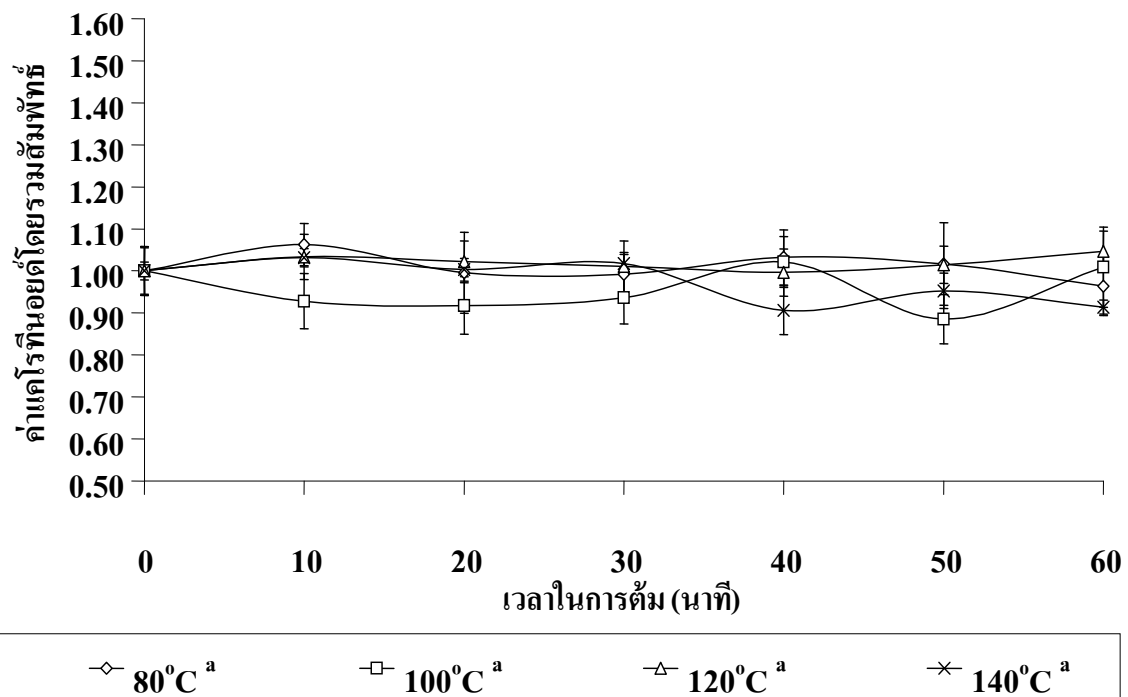
รูปที่ 5.53 ค่าเฉลี่ยโดยรวมน้อยของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดันต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



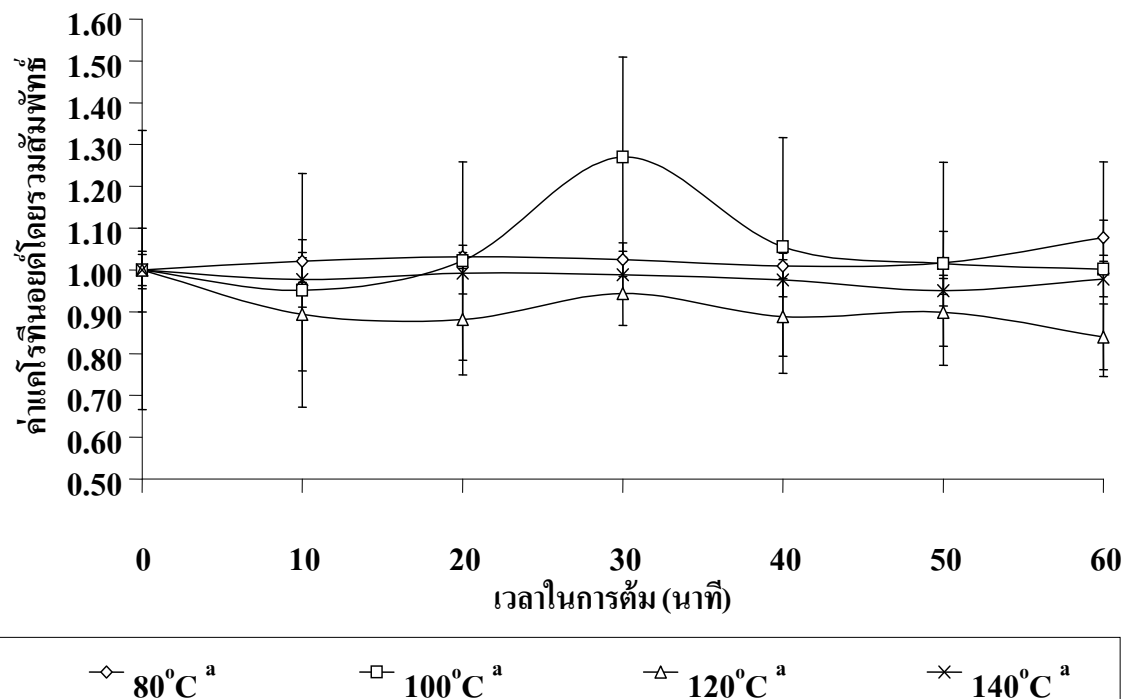
รูปที่ 5.54 ค่าเคโรทีนอยด์สัมพัทธ์ของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 0 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.55 ค่าเคโรทีนอยด์สัมพัทธ์ของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.56 ค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนจุลินทรีย์ของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 4 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)



รูปที่ 5.57 ค่าเฉลี่ยโดยรวมของจำนวนจุลินทรีย์ของเครื่องภายใต้สภาวะการต้มที่ความดัน 6 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ (Turkey's test, $p < 0.05$)

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลทดลอง

การต้มแครอทภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงทำให้ปริมาณความชื้นของของแครอทเพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าการต้มแครอทภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่าที่ระดับความดันเดียวกัน เนื่องจากภายใต้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของแครอท ทำให้น้ำที่ใช้ในการต้มแพร่เข้าไปในช่องว่างระหว่างเซลล์ของแครอทได้เร็วกว่าการต้มแครอทที่อุณหภูมิต่ำกว่า อย่างไรก็ตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของแครอทที่ผ่านการต้ม 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.0155, 0.0193, 0.0305 และ 0.0365 ตามลำดับ ส่วนการศึกษาอิทธิพลของความดันต่อค่าความชื้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นขณะทำการต้มมีอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น โดยการต้มที่อุณหภูมิสูงเหนือจุดเดือดปกติ เมื่อความดันในการต้มเพิ่มขึ้นค่าความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มแครอทมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสของแครอท แครอทที่ต้มภายใต้อุณหภูมิสูงมีการลดลงของค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสมากกว่าแครอทที่ต้มภายใต้อุณหภูมิต่ำภายใต้สภาวะความดันเดียวกัน โดยค่าความแข็งสัมพัทธ์ของเนื้อสัมผัสของแครอทมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาดำ 2 นาทีแรก และหลังใช้เวลาในการต้ม 5 นาทีค่าความแข็งสัมพัทธ์มีแนวโน้มที่จะคงที่ ค่าความแข็งสัมพัทธ์เมื่อใช้เวลาในการต้ม 15 นาที ที่อุณหภูมิ 140, 120, 100 และ 80 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 0.010, 0.015, 0.053 และ 0.507 ตามลำดับ ในขณะที่การต้มแครอทภายใต้อุณหภูมิต่ำเท่ากัน ความแตกต่างของความดันในการต้มไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสของแครอทอย่างมีระดับนัยสำคัญ

ลักษณะโครงสร้างของแครอทต้มที่ได้จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งแสดงให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของแครอทเนื่องจากผลของเวลาในการต้มผ่านไป ซึ่งพบว่าแครอทดิบมีลักษณะโครงสร้างเป็นช่องว่างขนาดเล็ก เป็นร่างแหคล้ายรังผึ้ง เมื่อขึ้นแครอทได้รับความร้อนเกิดการแยกตัวของผนังเซลล์ออกจากกันและช่องว่างภายในโครงสร้างมีการขยายใหญ่ขึ้น ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปได้ ค่าความชื้นจึงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการต้มพบว่าอุณหภูมิสูง โครงสร้างของแครอทมีการแยกตัวของผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างโครงสร้างมีขนาดใหญ่กว่าการต้มที่อุณหภูมิต่ำ รูปพรุนของโครงสร้างที่มีขนาด

ใหญ่จะส่งผลให้ค่าความแข็งของแครอทที่ต้มที่อุณหภูมิสูงจึงมีค่าลดลง ขณะที่ลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กของแครอทดิบจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับแครอท

อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสีของแครอท การต้มที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าสีแดงของแครอทลดลงมากกว่าการต้มที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ค่าสีเหลืองมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูง แต่ลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับค่าสีเริ่มต้น เมื่อแครอทได้รับความร้อน แคโรทีนอยด์ซึ่งเป็นรงควัตถุจะเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงเป็นสีเหลือง อย่างไรก็ตามการต้มแครอทที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสค่าสีเหลืองของแครอทมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องขณะที่น้ำที่ใช้ในการต้มมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น อุณหภูมิและความดันในการต้มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแคโรทีนอยด์โดยรวม

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของแครอทที่ผ่านกระบวนการต้มภายใต้สภาวะการต้มเหนือจุดเดือด ควรมีการศึกษาถึงชนิดและปริมาณของแข็งที่ละลายออกมาในน้ำระหว่างกระบวนการต้ม นอกจากนี้การศึกษถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นใยอาหารเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิในการต้ม ซึ่งอาจทำให้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของแครอทขณะต้ม และสามารถนำความรู้ที่ได้มาปรับปรุงเทคโนโลยีของกระบวนการต้มให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภคมากขึ้น

6.2.2 จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของแครอทที่ต้มภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่างๆ พบว่าค่าความแข็งสัมพัทธ์ของแครอทลดลงเหลือ 0.010 หรือร้อยละ 1 ของค่าความแข็งเริ่มต้น ในช่วงระยะเวลาการต้มเพียง 5 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าถ้าต้องการต้มแครอทเพื่อให้ได้เนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม ไม่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาดมการต้มนานภายใต้อุณหภูมิสูง เพราะผลจากการทดลองพบว่าการต้มแครอทเป็นระยะเวลานานจะส่งผลให้สีของแครอทเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

6.2.3 การปรับปรุงเทคโนโลยีการต้มโดยการใช้สภาวะการต้มที่อุณหภูมิเหนือจุดเดือดปกติในงานวิจัยนี้ เหมาะสำหรับนำไปใช้แปรรูปวัสดุอาหารที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งโดยธรรมชาติ อุดมด้วยคุณค่าทางอาหารในกระบวนการต้ม โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความอ่อนนุ่มของเนื้อสัมผัส และง่ายต่อการย่อย มีคุณค่าทางโภชนาการ ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย เช่นอาหารเหลว

สำหรับผู้ป่วย อาหารเสริมสำหรับเด็กอ่อน หรือแม้กระทั่งนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตอาหาร
ต่างๆ เพื่อลดระยะเวลาในการให้ความร้อน เช่น การต้มเนื้อสัตว์ หรือผักต่างๆ เพื่อให้ได้ลักษณะ
เนื้อสัมผัสที่เปื่อย ภายใต้ระยะเวลาการต้มไม่นาน

เอกสารอ้างอิง

ขวัญหญิง เวียงนาค, 2546, ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณภาพทุเรียนอบแห้งแบบระเหิด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 128 หน้า.

นิธิยา รัตนปนนท์, 2545, เคมีอาหาร, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ไชยมงคล, 2545, แครอท [Online], Available : http://www.agric-prod.mju.ac.th/vegetable/File_link/carrot2002.pdf [2005, June 12].

พงษ์ธร ลีละยุทธสุนทร, 2547, ผลของอุณหภูมิและความดันในการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิสุก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 97 หน้า.

Adam, J.B., 1991, "Review: Enzyme Inactivation During Heat Processing of Food-stuffs", **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 26, pp. 1-20.

A.O.A.C., 1984, **Association of Official Analytical Chemistry**, 16th ed., Washington D.C., USA.

Barreiro, J.A., Milano, M. and Sandoval, A.J., 1997, "Kinetics of Colour of Double Concentrated Tomato Paste During Thermal Treatment", **Journal of Food Engineering**, Vol. 33, pp. 359-371.

Birch, G.G., Cameron, A.G. and Spencer, M., 1986, **Food Science**, 3rd ed., Pergamon Prss, Oxford, pp. 110-122.

Bourne, M.C., 1982, **Food Texture and Viscosity**, Academic Press, New York, 325 p.

Bourne, M.C., 1987, "Effect of Blanch Temperature on Kinetics of Thermal Softening of Carrots and Green Beans", **Journal of Food Science**, Vol. 52, No. 3, pp. 667-668.

Chang, C.Y., Liao, H.J., Wu, T.P., 1996, "Relationships between Texture Changes and the Contents of Calcium, Magnesium ions, and Non-freezing Water in the Alcohol-insoluble Solids of Snap Bean Pods during Cooking Processes", **Food Chemistry**, Vol. 55, No. 1, pp.406 – 416.

Charley, H., 1982, **Food Science**, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 564 p.

Chen, H.E., Peng, H.Y and Chen, B.H., 1996, "Stability of Carotenoids and Vitamin A During Storage of Carrot Juice", **Journal of Food Chemistry**, Vol. 57, No. 4, pp. 497-503.

Fellows, P., 2000, **Food processing technology : principles and practice**, 2nd ed., Boca Raton : CRC Press, p. 274

Fennema, O.R., 1996, **Food Chemistry**, 3rd ed., Marcel Dekker, New York, 1069p.

Georget, D.M.R., Ng, A., Smith, A.C., Waldron, K.W., 1999, "The Thermomechanical Properties of Carrot Cell Wall Material", **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Vol. 78, No. 1, pp.73-80.

Greve, L. C., McArdle, R. N., Gohlke, J. and Labavitch, J. M., 1994, "The Impact of Heating on Carrot Firmness: Changes in Cell Wall Components", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 42, pp.2900–2906.

Hou, W.C., Chang, W.H., 1996, "Pectinesterase-catalyzed Firming Effects during Precooking for Vegetables", **Journal of Food Biochemistry**, Vol. 20, No. 5, pp. 397- 416.

Hutchings, J.B., 1994, **Food Colour and Appearance**, Blackie Academic & Professional, London, 513 p.

Howard, L.R., Braswell, D.D. and Aselage, J., 1996, "Chemical Composition and Color of Strained Carrots as Affected by Processing", **Journal of Food Science**, Vol. 61, No. 2, pp. 327-330.

Kato, N., Teramoto, A. and Fuchigami, M., 1997, "Pectin Substance Degradation and Texture of Carrots as Affected by Pressurization", **Journal of Food Science**, Vol. 62, No. 2, pp. 359-362.

Klockeman, D.M., Pressey, R. and Jen, J.J., 1991, "Characterization of Cell Wall Polysaccharides of Jicama (*Pachyrhizus*) and Chinese Water Chestnut (*Eleocharis dulcis*)", **Journal of Food Biochemistry**, Vol. 15, pp. 317-329.

MacDougall, D.B., 2002, **Colour in Food : Improving Quality**, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 378 p.

Ni, L., Lin, D. and Barrett, D.M., 2005, "Pectin Methylesterase Catalyzed Firming Effects on Low Temperature Blanched Vegetables", **Journal of Food Engineering**, Vol. 70, pp. 546-556.

Okitani, A., Kim, S.Y., Hayase, F., Chung, T.Y. and Kato, H., 1983, "Heat Induced Changes in Free Amino Acid on Manufacturing Heated Pulps, Purees and Pastes from Potatoes", **Journal of Food Science**, Vol. 48, p. 1366.

Petropakis, H.J. and Montgomery, M.W., 1984, "Improvement of Colour Stability of Pear Juice Concentrate by Heat Treatment", **Journal of Food Technology**, Vol. 19, p. 91.

Ramesh, M.N., Sathyanarayana, K. and Girish, A.B., 1998, "Biphasic Model for the Kinetics of Vegetable Cooking at 100°C", **Journal of Food Engineering**, Vol. 35, pp. 127-133.

Scaman, C.H., Jin Wai Jim, V., Hartnett, C., 2004, "Free Galactose Concentrations in Fresh and Stored Apples (*Malus Domestical*) and Processed Apple Products", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 52, pp. 511-517.

Serkat, F. and Luh, B.S., 1976, "Quality Factors of Tomato Pastes Made at Several Break-Temperature", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 24, p.1155.

Shin, S. and Bhowmik, S., 1995, "Thermal Kinetics of Color Changes in Pea Puree", **Journal of Food Engineering**, Vol. 24, pp. 77-86.

Stolle-Smits, T., Beekhuizen, J. G., Recourt, K., Voragen, A. G. J. and Van Dijk, C., 1997, "Changes in Pectic and Hemicellulosic Polymers of Green Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) during Industrial Processing", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 45, pp. 4790–4799.

Smout, C., Sila, D.N., Vu, T.S., Van Loey, A.M.L. and Hendrickx, M.E.G., 2005, "Effect of Preheating and Calcium Pre-treatment on Pectin Structure and Thermal Texture Degradation: A Case Study on Carrots", **Journal of Food Engineering**, Vol. 67, pp. 419-425

Talcott, S.T., Howard, L.R. and Brenes, C.H., 2000, "Antioxidant Changes and Sensory Properties of Carrot Puree Processed with and without Periderm Tissue", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 48, pp. 1315-1321.

Taylor, J.R., 1982, **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**, University Science Books Oxford University Press, USA, pp. 40-74.

ThinkQuest, 2005, **Cell Wall** [Online], Available: http://library.thinkquest.org/C004535/cell_wall.html [2005, November 18].

Van Buren, J.P., 1979, "The Chemistry of Texture in Fruits and Vegetables", **Journal of Texture Studies**, Vol. 10, pp 1-23.

Vora, H.M., Kyle, W.S.A. and Small, D.M., 1999, "Activity, Localization and Thermal Inactivation of Deteriorative Enzymes in Australian Carrot (*Daucus Carota* L) Varieties", **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Vol. 79, pp. 1129-1135.

Vu, T.S., Smout, C., Sila, D.N., LyNguyen, B., Van Loey, A.M.L. and Hendrickx, M.E.G., 2004, "Effect of Preheating on Thermal Degradation Kinetics of Carrot Texture", **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Vol. 5, pp. 37-44.

Xu, S., 2004, "Studies on The Texture and Tissue of Carrot Processed by High Pressure", **Nature and Science**, Vol. 2, No. 3, pp. 62-65.

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์

การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์จากการบวกและลบ

ถ้าค่า $x, \dots, w$ เป็นค่าที่ถูกรวบรวมได้ และมีค่าความเบี่ยงเบนเท่ากับ $\delta x, \dots, \delta w$ และถูกนำไปคำนวณต่อโดยสมการ

$$q = x + \dots + z - (u + \dots + w)$$

ถ้าค่าความเบี่ยงเบนของ $x, \dots, w$ เป็นอิสระ และมาจากการสุ่ม ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนของค่า q สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}$$

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนโดยพื้นฐาน ในทุกกรณีแล้ว δq จะมีค่าไม่มากกว่า ผลรวมของเทอมทั่วไป

$$\delta q \leq \delta x + \dots + \delta z + \delta u + \dots + \delta w$$

การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนทางคณิตศาสตร์จากการคูณและหาร

ถ้าค่า $x, \dots, w$ เป็นค่าที่ถูกรวบรวมได้ และมีค่าความเบี่ยงเบนเท่ากับ $\delta x, \dots, \delta w$ และถูกนำไปคำนวณต่อโดยสมการ

$$q = \frac{x \times \dots \times z}{u \times \dots \times w}$$

ถ้าค่าความเบี่ยงเบนของ $x, \dots, w$ เป็นอิสระ และมาจากการสุ่ม ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนของค่า q สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta z}{z}\right)^2 + \left(\frac{\delta u}{u}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta w}{w}\right)^2}$$

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนโดยพื้นฐาน ในทุกกรณีแล้ว δq จะมีค่าไม่มากกว่า ผลรวมของเทอมทั่วไป

$$\frac{\delta q}{q} \leq \frac{\delta x}{x} + \dots + \frac{\delta z}{z} + \frac{\delta u}{u} + \dots + \frac{\delta w}{w}$$

อ้างอิง Taylor (1982)