

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะได้กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกล้วย ได้แก่ ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ และการสุกของกล้วย เนื่องจากระยะเวลาการสุกมีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสนี้ลงระหว่างการสุกที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีระยะเวลาการเก็บรักษาสั้น ดังนั้นจึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า ซึ่งเทคนิคการแปรรูปมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การพuffing ด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ การพuffing ด้วยการใช้อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาด้าน และการทอดด้วยสุญญากาศ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการแปรรูปที่แตกต่างกันดังกล่าวอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการแปรรูปต่างกัน ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่กล่าวถึงได้แก่ การหดตัว สี และเนื้อสัมผัส เป็นต้น นอกจากนี้ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาสภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) โดยรายละเอียดทุกส่วนที่กล่าวมามีดังนี้

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกล้วย

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีการปลูกกันมาก เนื่องจากเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานกันเป็นประจำ อีกทั้งยังรับประทานง่ายมีประโยชน์ มีคุณค่าทางอาหารสูง และยังมีราคาถูก ซึ่งการปลูกกล้วยมีการลงทุนต่ำกว่าพืชอื่นๆ และยังให้ผลผลิตได้ตลอดปี สามารถปลูกได้ทั้งในเขตร้อน และเขตกึ่งร้อน โดยกล้วยเป็นพืชที่ชอบอากาศร้อนชื้น ถิ่นแรกของกล้วยจะอยู่ในแถบเอเชียตอนใต้ ซึ่งประกอบด้วยทางตอนเหนือของอินเดีย พม่า เขมร ไทย ลาว และจีนตอนใต้ กล้วยถือเป็นพืชเก่าแก่สำหรับประเทศไทย ซึ่งผลใช้รับประทาน ส่วนใบนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย และประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นถิ่นกำเนิดของกล้วยป่า (*Musa acuminata Colla*) ดังนั้นจึงพบกล้วยป่าในประเทศไทยซึ่งมีอยู่ 4 sub species คือ

Musa acuminata Colla ssp. malaccensis (Ridl) Simmonds

Musa acuminata Colla ssp. microcarpa (Beccari) Simmonds

Musa acuminata Colla ssp. burmanica Simmonds

Musa acuminata Colla ssp. siamea Simmonds

นอกจากนี้ยังพบกล้วยทางภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเกิดจากกล้วยป่าที่มีโครโมโซม AA และ AAA หรือที่เรียกว่า acuminate cultivars ซึ่งได้แก่ กล้วยไข่ทองร่วง กล้วยเล็บมือนาง เป็นต้น สำหรับกล้วยลูกผสมระหว่างกล้วยป่า และกล้วยตานี จัดอยู่ในกลุ่ม *Musa musaceae* ซึ่งประกอบด้วย 2 กลุ่มคือ acuminate และ balbisiana ซึ่งกล้วยทั้งสองกลุ่มมีการผสมข้ามพันธุ์ ทำให้เกิดกล้วยพันธุ์ต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยมีโครโมโซมและโครโมโซมแตกต่างกันไป

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกล้วยหอม

กล้วยหอมทองเป็นกล้วยพันธุ์หนึ่งที่ได้รับคานิยมจากผู้บริโภค กล้วยหอมทองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ (*Musa Sapientum* L. 'Kluai Hom Thong' กลุ่มย่อย Gross Michel) กล้วยหอมทองหวีหนึ่งจะมี 12-16 ผล และปลายผลมีจุก มีเปลือกผลบาง เมื่อผลสุกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทองแต่ที่ปลายจุกจะมีสีเขียว แล้วเปลี่ยนสีในภายหลัง เนื้อผลจะมีสีเหลืองเข้ม มีกลิ่นหอม และมีรสหวาน กล้วยหอมทองมีปริมาณโปรตีน และน้ำตาลมากกว่ากล้วยชนิดอื่นๆ และกล้วยหอมทองยังมีโคลเลอเจน ซึ่งเป็นสารอาหารที่ช่วยกระตุ้นกระบวนการเมตาบอลิซึมของกลูโคส และช่วยสังเคราะห์กรดไขมัน และคลอเรสเตอรอล นอกจากสารต่างๆ ที่อยู่ในเนื้อกล้วยแล้ว กล้วยยังมีสารเพคติน (Pectin) ซึ่งทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้ดี (เบญจมาศ ศิลาชัย, 2545)

2.1.2 การสุกของกล้วย

กล้วยจัดว่าเป็นผลไม้ประเภท Climacteric fruit คือมีการแบ่งประเภทตามการเปลี่ยนแปลงของอัตรา การหายใจที่แตกต่างกัน เมื่อผลสุก (Fruit ripening) จะมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น และมีการสังเคราะห์ เอทิลีนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเอทิลีนจะช่วยกระตุ้นให้ผลไม้สุกเร็วขึ้น ขณะที่ระยะกล้วยดิบ เกิดการสังเคราะห์เอทิลีนน้อยมาก ระยะการสุกของกล้วยสังเกตได้จากการเปลี่ยนสี การอ่อนตัวของเนื้อเยื่อ การสังเคราะห์น้ำตาล ก๊าซเอทิลีน และมีอัตราการหายใจที่เปลี่ยนไป ผลไม้สุกส่วนมาก เนื้อจะนิ่มเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลต่างๆ ภายในผนังเซลล์ โดยเฉพาะเพคติน นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งเริ่มเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเกิดการสูญเสียน้ำออกไปจากผลผลิต (เบญจมาศ ศิลาชัย, 2545) การแบ่งขั้นตอนการสุกของกล้วย แสดงดังรูปที่ 2.1 หลังจากตัดมาบ่มดังนี้

ระยะที่ 1 เปลือกเขียว ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 เริ่มเปลี่ยนสีจากสีเขียวออกเหลืองเล็กน้อย

ระยะที่ 3 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

ระยะที่ 4 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองแต่มีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

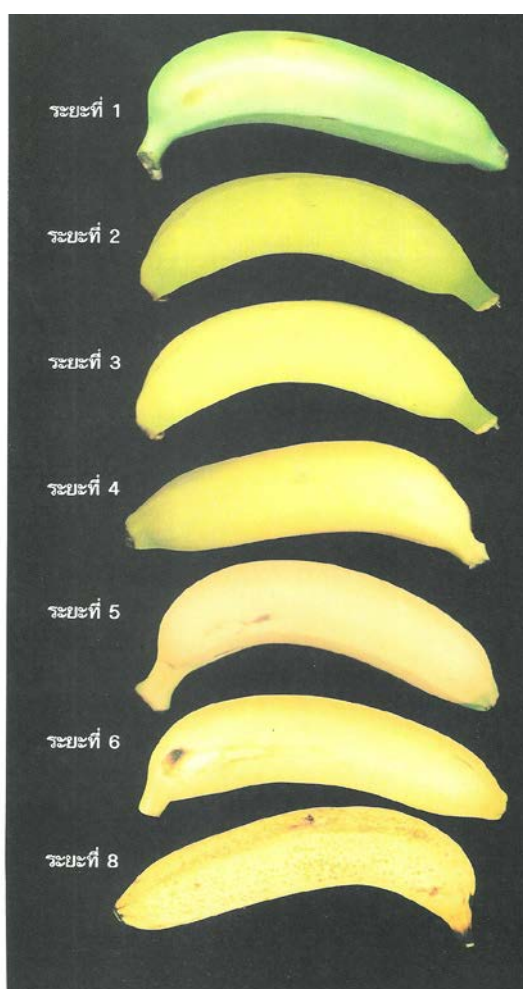
ระยะที่ 5 เปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว

ระยะที่ 6 ทั้งผลมีสีเหลือง (ผลสุก)

ระยะที่ 7 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล (สุกเต็มที่ มีกลิ่นหอม)

ระยะที่ 8 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไป, เนื้อเริ่มอ่อนตัวและมีกลิ่น

แรง)



รูปที่ 2.1 ระยะการสุกของผลกล้วย (เบญจมาศ ศิลาชัย, 2545)

การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในผลกล้วยระหว่างระยะเวลาการสุก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเฉพาะปริมาณของน้ำตาลที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผลกล้วยสุกงอมเต็มที่ (เบญจมาศ, 2545) และผลการศึกษาของ Lii et al. (1982) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของกล้วยที่ระยะการสุกต่างๆ โดยบ่มกล้วยด้วยก๊าซเอทิลีน และได้แบ่งระยะของการสุกออกเป็น 8 ระยะ เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนสีของเปลือกกล้วย พบว่าแต่ละระยะของการสุกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีเพียงเล็กน้อย ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเส้นใย ส่วนปริมาณเถ้ามีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ปริมาณน้ำตาลจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในระยะแรกที่ 0 ลักษณะของเปลือกกล้วยยังคงมีสีเขียว และผลของกล้วยยังไม่สุก เนื่องจากยังไม่มีการสังเคราะห์เอทิลีนมากกระตุ้นให้เกิดการสุก โดยระยะดังกล่าวมีปริมาณน้ำตาลร้อยละ 61.74 และค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเหลือร้อยละ 2.58 ในระยะที่ 8 ซึ่งเป็นระยะที่ลักษณะของเปลือกกล้วยเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเริ่มมีจุดสีน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ระยะการสุกต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกล้วยที่ระยะการสุกต่างๆ แสดงการเปลี่ยนแปลง
ส่วนประกอบต่างๆของกล้วย (หน่วย: ร้อยละ) Lii et al. (1982)

ระยะการสุก	น้ำตาลรีดิวิซ์	ซูโครส	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	น้ำตาล	เถ้า
0	0.34	1.23	5.30	0.78	0.49	61.74	3.28
1	1.30	6.01	5.62	0.80	0.49	58.58	3.31
2	10.76	18.42	4.88	0.75	0.60	42.42	3.53
3	11.45	21.35	4.93	0.73	0.62	39.78	3.54
4	12.39	27.88	5.38	0.74	0.68	37.59	3.58
5	25.00	53.07	5.77	0.76	0.78	9.70	3.90
6	31.22	51.89	5.65	0.71	0.49	6.30	3.73
7	33.82	51.98	5.60	0.83	0.30	3.33	4.05
8	33.57	53.22	5.52	0.68	0.30	2.58	4.09

2.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมขบเคี้ยว

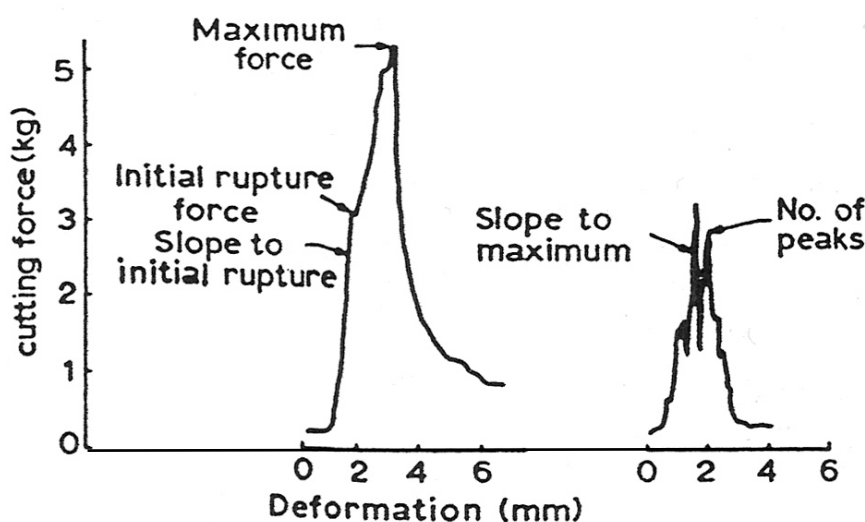
ขนมขบเคี้ยวจัดเป็นอาหารว่างหรืออาหารที่บริโภคระหว่างมื้อหลัก บริโภคเพื่อความเพลิดเพลิน บริโภคได้ง่าย และสะดวก ส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต และไขมันปริมาณมาก นอกจากนี้แล้วขนมขบเคี้ยวยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ขนมขบเคี้ยวที่มีขายตามท้องตลาดได้แก่ มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวเกรียบ ลูกเกด ข้าวโพดคั่ว ขนมอบกรอบปรุงรสต่างๆ อาหารขบเคี้ยวส่วนใหญ่ทำมาจากแป้ง เช่น แป้งจากปลายข้าว หอมมะลิ แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งมันฝรั่ง แป้งกล้วย เป็นต้น ขนมขบเคี้ยวที่ได้จากการนำผักและผลไม้มาแปรรูปโดยตรง เช่น กล้วย มันฝรั่ง แครอท เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษา และพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อปรับปรุงคุณภาพของขนมขบเคี้ยวให้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอด โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่นี้เหมาะกับผู้บริโภคทั่วไปหรือผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพหรือมีปัญหาเกี่ยวกับอาหารที่มีไขมัน

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมขบเคี้ยว โดยเฉพาะความกรอบเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผู้บริโภคใช้เป็นเกณฑ์หลักเพื่อพิจารณาตัดสินใจการยอมรับ และมีผลอย่างยิ่งต่อความชอบและความกรอบของขนมขบเคี้ยวมีความสัมพันธ์กับความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งความกรอบจะลดลง เมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้น ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่กรอบจะต้องเนื้อแน่น และแตกง่าย ทันทีที่ทำให้ผิวดูโปร่ง และเกิดเสียงดังกรอบเมื่อเคี้ยว (Crunchy sound) เสียงดังกล่าวเกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในที่ค่อนข้างเปราะ และแตกง่าย ดังนั้นเมื่อผนังของโพรงหรือช่องว่างถูกทำลายไประหว่างการเคี้ยวจึงเกิดเสียงดังขึ้น ซึ่งการวัดประเมินความกรอบของอาหารมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วัดจากระดับความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นในขณะที่เคี้ยวอาหาร ถ้ามีระดับความถี่สูงกว่า 1.9 kHz (Vickers, 1979) แสดงว่าอาหารนั้นมีความกรอบ การวัดโดยการทดสอบประสาทสัมผัส (Sensory Test) ซึ่งสามารถทำได้โดยให้ผู้ทดสอบเป็นผู้ประเมินและตัดสินใจโดยใช้ประสาทสัมผัส และวัดด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) สำหรับการศึกษาเลือกใช้วิธีการวัดเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องมือ (Texture Analyzer) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการทดสอบการวัดความกรอบโดยอาศัยเครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัส ซึ่งแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลิตภัณฑ์ขณะทดสอบตัวอย่าง โดยแสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงแรงกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 2.2 กราฟที่ได้สามารถนำมาพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะพิจารณาจากความชันเริ่มต้น (Initial Slope) ของเส้นกราฟระหว่างแรงกับระยะทาง (Force-Distance Curve) หรือเป็นความชันของเส้นกราฟจนถึงจุดที่ให้แรงสูงสุด (Maximum Force) ซึ่งความชันจะแสดงถึงความต้านทานต่อการโค้งงอของอาหาร โดยอาหารที่มีความกรอบมากจะมีความต้านทานต่อการโค้งงอมาก และอาหารที่มีความกรอบน้อยก็จะมีแรงต้านต่อการโค้งงอต่ำ (Jackson et al., 1996)

นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีจำนวนยอด (Number of Peak) มากด้วย เนื่องจากจำนวนยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชันเกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีจำนวนยอดมาก และมีค่าความแข็งแรงน้อย

โดยปกติแล้วอาหารที่ผ่านการแปรรูปด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อคุณภาพด้านต่างๆ เช่น ทางด้านกายภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก รูปร่าง และเนื้อสัมผัส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังกล่าว ส่งผลต่อความพึงพอใจ และการยอมรับของผู้บริโภค และปัจจุบันนี้มีการพัฒนาเทคนิคการแปรรูปขนมขบเคี้ยว เพื่อพัฒนาคุณลักษณะด้านความกรอบของผลิตภัณฑ์ และให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Nath et al. (2007) ซึ่งศึกษาคุณลักษณะความกรอบของมันฝรั่งอบกรอบด้วยวิธีการย่าง (Toasting) พบว่า หลังผ่านกระบวนการมันฝรั่งมีความกรอบเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาได้ในเทอมของจำนวนยอดที่เพิ่มขึ้น และส่งผลต่อค่าการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสที่สูง และการพัฒนาขนมอบกรอบด้วยวิธีเอกทฤษฎี ซึ่งปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ มีผลต่อการขยายตัวของวัสดุได้มากหรือน้อย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเนื้อสัมผัสด้านความกรอบของขนมขบเคี้ยว (Qing et al., 2005)

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสดังที่กล่าวแล้วเบื้องต้น สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินคุณลักษณะความกรอบของขนมขบเคี้ยวประเภทต่างๆ ได้ นอกจากนี้แล้วกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ อาจมีผลต่อเนื้อสัมผัสของวัสดุที่ได้แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในส่วนต่อไป



รูปที่ 2.2 กราฟการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงกดกับระยะทาง (Aguilera, 1999)

2.3 วิธีการแปรรูปขนมขบเคี้ยว

สมบัติด้านความกรอบ และความแข็งเป็นอีกสมบัติหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม และปัจจุบันนี้มีวิธีการแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ มากขึ้น เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน วิธีการ และหลักการแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. การทอดเป็นการแปรรูปด้วยความร้อน โดยอาศัยการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางก็คือน้ำมัน ในการให้ความร้อนไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว โดยในระหว่างการทอด อาหารจะได้รับความร้อน โดยมีน้ำมันเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งอุณหภูมิของน้ำมันที่สูง จะทำให้น้ำที่อยู่ภายในอาหารเดือด และระเหยจากภายในออกสู่ภายนอก ทำให้ความชื้นของอาหารลดลง ส่งผลให้เนื้อสัมผัสที่ผิวหน้าแห้งกรอบ นอกจากนี้แล้วระหว่างการทอดน้ำมันได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสัมผัสกับออกซิเจน และน้ำที่ระเหยออกจากชิ้นอาหาร ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น การเกิดสารประกอบที่ระเหยได้ เช่น สารคาร์บอนิล กรดไฮดรอกซี กรดคีโต และกรดอิมิดิกซ์ ทำให้อาหารมีกลิ่นผิดปกติ และน้ำมันมีสีคล้ำ (Zhang et al., 2012)

2. Extrusion cooking กระบวนการ Extrusion เป็นกระบวนการที่ใช้หลักการทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัวด้วยความร้อนจากขดลวด และความดันสูงจากการขับเคลื่อนของแท่งเกลียว เมื่อแป้งเหลวเคลื่อนที่ออกสู่บรรยากาศความดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิภายในก้อนแป้งเหลวระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว และดันก้อนแป้งให้พองตัว ทำให้เกิดรูพรุนกระจายทั่ว และเมื่อเย็นลงจะคงความกรอบของผลิตภัณฑ์ไว้ วัตถุดิบที่เหมาะสมในการทำขนมกรอบได้แก่ ประเภทที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบสูง โดยเฉพาะพวก ธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า พืชหัว และแป้งชนิดต่างๆ สมบัติของขนมกรอบ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความชื้นของส่วนผสมก่อนผ่านเครื่อง Extruder ระยะเวลาทำให้อสุก (Cooking time) ความดัน และอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการ Extrusion ผลิตภัณฑ์เหล่านี้อาจมีการเติมสารปรุงรส วิตามิน แร่ธาตุ โปรตีนหรือธาตุชนิดอื่นมาผสมหรือเติมสารอาหารเพื่อเสริมคุณค่าทาง

3. การพuffing โดยใช้ไมโครเวฟ ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุ (Radio wave) กับอินฟราเรด (Infrared) โดยมีความถี่ระหว่าง 300-30000 MHz และมีแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นส่วนประกอบหลักในการทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟที่นำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น การอบแห้งผัก ผลไม้ และอาหาร โดยมีความถี่อยู่ในช่วง 915 ถึง 2450 MHz และการพuffing อาหารด้วยไมโครเวฟ ปัจจุบันนี้มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย (Mascan, 2001 and Sham et al., 2001) การพuffing ด้วย

ไมโครเวฟแตกต่างจากการพффฟงด้วยวิธีการอื่นๆ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถแทรกเข้าสู่เนื้ออาหาร ทำให้โมเลกุลของน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นสะเทือน โมเลกุลชนกันเกิดความร้อนขึ้น มีผลให้น้ำเดือด และระเหยกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว จึงทำให้โครงสร้างผลิตภัณฑ์เกิดการขยายตัว และมีความพรุนขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว อาจส่งผลเสียต่อคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ไหม้ได้ ด้วยข้อจำกัดของไมโครเวฟดังกล่าว จึงนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการพффฟงด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรด และการพффฟงด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นต้น

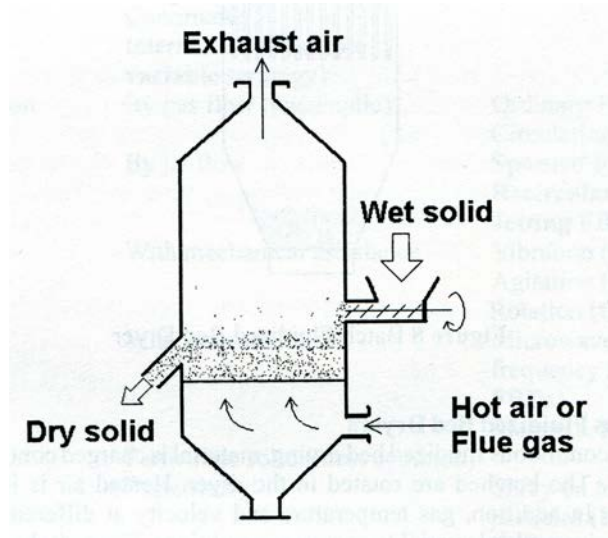
4. การพффฟงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาดสั้น เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีความกรอบได้ โดยมีปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ ได้แก่ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ อุณหภูมิของตัวกลาง และเวลาที่ใช้ เป็นต้น โดยหลักการของกระบวนการพффฟงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาดสั้นนั้น เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากตัวกลางจะทำให้ น้ำที่อยู่ในวัสดุเดือด และระเหยกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันสูง ส่งผลให้เนื้อวัสดุขยายตัวและมีรูพรุนขึ้น โดยทั่วไปในการทำวัสดุมีการพองตัวนี้จะใช้อุณหภูมิสูง และเวลาดสั้นมาก หากอุณหภูมิต่ำวัสดุจะไม่พอง เพราะอุณหภูมิไม่สูงพอจะทำให้ น้ำในวัสดุเดือดกลายเป็นไอน้ำได้อย่างรวดเร็ว และหากความชื้นของวัสดุต่ำเกินไปจะทำให้การเดือดของน้ำในวัสดุเกิดขึ้นได้น้อย โดยกลไกการพффฟงประกอบด้วย 3 ส่วนคือ การลดความชื้นวัสดุลงในระดับที่เหมาะสม จากนั้นนำไปพффฟงด้วยอุณหภูมิสูง ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้วัสดุเกิดการพองตัว เนื่องจากความร้อนที่สูงจะทำให้ น้ำที่อยู่ในวัสดุเดือดอย่างรุนแรง จนกระทั่งดันให้วัสดุเกิดการพองตัวได้ หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปอบแห้งต่อด้วยอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากความชื้นหลังพффฟงยังมีปริมาณสูง ซึ่งทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ ดังนั้นจึงต้องลดความชื้นให้เหลือในปริมาณน้อยประมาณ 4% d.b.

2.4 การพื้ฟ้งโดยใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน

สำหรับการศึกษานี้จะแปรรูปกล้วยอบกรอบไร้น้ำมันด้วยการพื้ฟ้งโดยใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน ซึ่งข้อดีของเครื่องอบแห้งฟลูอิดเซชันมีดังนี้

1. เนื่องจากเม็ดของแข็งเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็ว และสม่ำเสมอ ดังนั้นอุณหภูมิภายในเบจะมีค่าคงที่ เนื่องจากการผสมผสานของวัสดุภายในเบเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
2. เนื่องจากวัสดุถูกทำให้ลอยตัวระหว่างการอบแห้ง จึงทำให้วัสดุภายในเบมีโอกาสสัมผัสกับของไหลมากกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่ามาก ทำให้การถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงสูงกว่าเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ
3. การเคลื่อนที่ของวัสดุมีการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล จึงสามารถนำมาใช้ทำงานแบบต่อเนื่องได้
4. อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งชนิดอื่นๆ ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าชนิดอื่น และสามารถเพิ่มอุณหภูมิของของไหลที่ซ้อบได้สูงกว่าโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุ
5. วัสดุมีการผสมผสานกันระหว่างการอบแห้งทำให้คุณภาพของวัสดุหลังการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

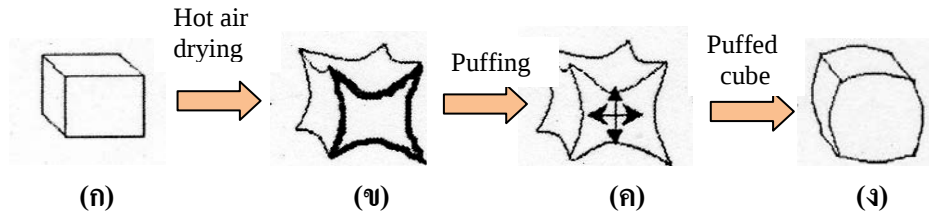
เทคนิคฟลูอิดเซชันเป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล จากนั้นให้ของไหลที่เป็นก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง และไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งออกทางส่วนบนของหอทดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน พฤติกรรมของเม็ดของแข็งในลักษณะนี้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล จึงเรียกของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดเซชัน แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Law and Mujumdar, 2004)

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัว ได้แก่ อาหารว่างประเภทข้าวพอง (Puffed rice หรือ Expanded rice) รวมทั้งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทอด ขนมอบที่นิยมรับประทานเป็นอาหารว่าง เช่น ข้าวเกรียบ มันฝรั่ง โดยทั่วไปจะมีลักษณะสมบัติที่คล้ายคลึงกันคือ มีความกรอบ (Crispy or Crunchy) และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสมบัติเหล่านี้นอกจากจะขึ้นกับวัตถุดิบที่นำมาผลิตแล้วยังขึ้นกับกระบวนการและสภาวะในระหว่างการผลิตด้วย โดยการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของตัวกลาง และเวลาที่ใช้ ตามหลักการนั้นเมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากตัวกลาง จะทำให้น้ำในวัสดุเดือดระเหยจนกลายเป็นไอก่อให้เกิดความดันขึ้น ดันให้เนื้อวัสดุขยายตัว โดยทั่วไปในการทำวัสดุมีการพองตัวนี้จะใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้นมาก หรือที่เรียกว่า High Temperature Short Time (HTST) หากอุณหภูมิต่ำวัสดุจะไม่พอง เพราะอุณหภูมิต่ำจะไม่สูงพอจะทำให้น้ำในวัสดุเดือดและกลายเป็นไอกได้อย่างรวดเร็ว และหากความชื้นของวัสดุต่ำเกินไป จะทำให้การเดือดของน้ำในวัสดุเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้แรงดันลดลง ส่งผลให้เกิดการพองตัวน้อยเช่นกัน และในทางตรงกันข้าม หากความชื้นของวัสดุสูงเกินไปการเดือดของน้ำในวัสดุจะรุนแรงจนทำให้ขึ้นของผลิตภัณฑ์แตกได้จากงานวิจัยของ Vanalis et al. (2001) ได้ศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งและพัพฟิงด้วยอุณหภูมิสูง และใช้เวลาสั้น ซึ่งได้อธิบายกลไกของการพัพฟิง แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยเริ่มจากการลวกมันฝรั่งด้วยน้ำร้อนเพื่อให้สตาร์ชที่ผิวของมันฝรั่งเกิด gelatinization ขึ้นก่อนนำไปอบแห้ง ซึ่งช่วยให้โครงสร้างที่บริเวณผิวของวัสดุแข็ง ทำให้เป็นอุปสรรคขัดขวางต่อการเคลื่อนตัวของความชื้นจากภายในวัสดุออกสู่ภายนอก จากนั้นนำตัวอย่างมาอบแห้งในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 90°C จนเหลือความชื้นในระดับที่เหมาะสม ซึ่งช่วงนี้ปริมาตรของมันฝรั่งจะเกิดการหดตัวลง เนื่องจากการลดลงของความชื้นระหว่างการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2.4 (ข) และในช่วงต่อมานำมันฝรั่งไปผ่านการพัพฟิงด้วยอุณหภูมิสูง 200°C ทำให้น้ำภายในวัสดุเดือด และกลายเป็นไอกได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดแรงดันไอกกระทำต่อ

โครงสร้างภายในตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.4 (ค) มีผลให้ตัวอย่างเกิดการขยายตัวดังรูปที่ 2.4 (ง) หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาอบแห้งต่อด้วยลมร้อนจนกระทั่งปริมาณความชื้นเหลือน้อยมาก จนถึงระดับที่สามารถลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในวัสดุได้



รูปที่ 2.4 กลไกแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแป้งรูปทรงลูกบาศก์ระหว่างการพuffing: (ก) ปริมาตรของแป้งเริ่มต้นก่อนอบแห้ง (ข) ปริมาตรหลังอบแห้งในขั้นตอนแรกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C (ค) ปริมาตรระหว่างพuffing และ (ง) ปริมาตรหลังพuffing (Vanalís et al., 2001)

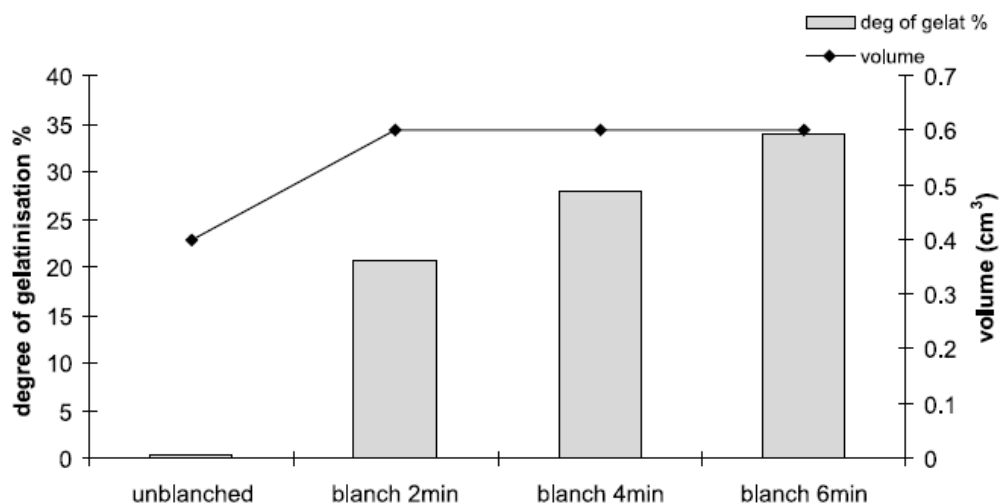
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพuffingโดยใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น

การพuffing เป็นวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อพัฒนาสมบัติด้านความกรอบและการพองตัว โดยใช้ อุณหภูมิสูงด้วยระยะเวลาสั้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าวมีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนพuffing อุณหภูมิพuffing เวลาพuffing ขนาดของวัสดุ การลวก และลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งมีผลต่อระดับการหดตัวของวัสดุ ซึ่งสามารถแยกรายละเอียดแต่ละประเด็นได้ดังต่อไปนี้

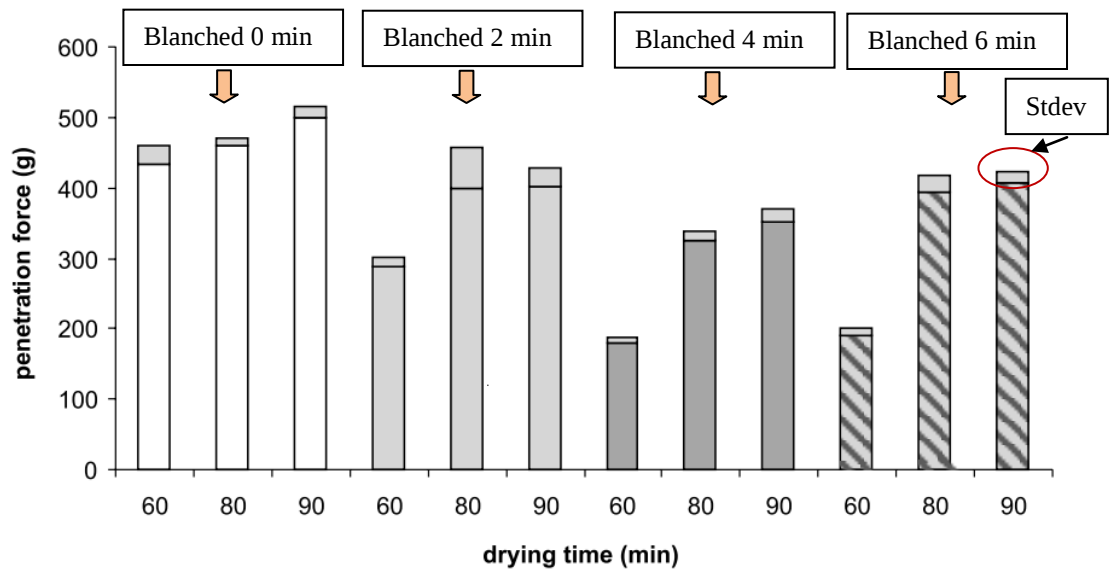
2.4.1.1 การพuffing กระทบต่อการลวก

ความร้อนที่ใช้ในการลวกอาหารมีผลต่อสมบัติด้านโภชนาการ และกลิ่นรสของอาหาร โดยทั่วไปจะมีการควบคุมเวลา และอุณหภูมิในการลวกให้สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้อย่างเพียงพอ เพื่อให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสหรือลักษณะเนื้อสัมผัสน้อยที่สุด โดยการลวกวัสดุจะใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100°C และเวลาในการลวกจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของผลไม้ นอกจากนี้แล้ว การลวกวัสดุบางชนิดอาจมีผลต่อระดับการหดตัวที่ต่างกัน เนื่องมาจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี จากผลการศึกษาระยะเวลาในการลวกที่มีต่อการขยายตัวของแป้ง Varnalis et al. (2001) พบว่า การลวกช่วยลดความแข็งของแป้ง ทำให้แป้งนุ่ม และอ่อนตัวลงได้มากกว่าไม่ลวก ซึ่งขนาดปริมาตรเริ่มต้นของแป้งคือ 1 cm^3 จากนั้นนำตัวอย่างไปลวกเป็นเวลา ระหว่าง 2-6 นาที และนำไปอบแห้งต่อในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 90°C จากนั้นนำตัวอย่างมาพuffing

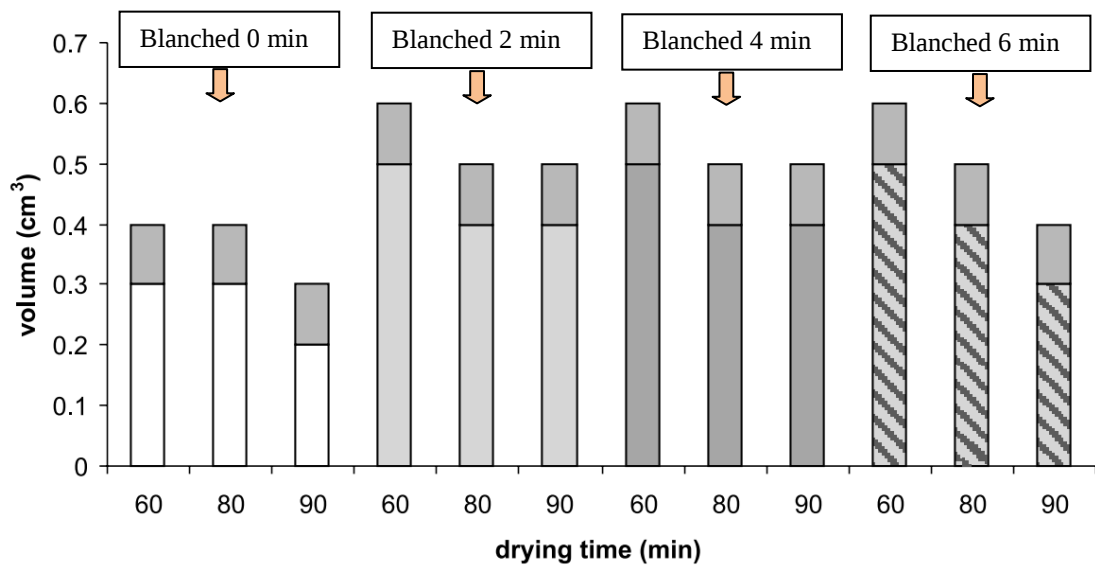
ด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 40 วินาที แสดงผลดังรูปที่ 2.5 พบว่า ระยะเวลาในการลวกนานประมาณ 6 นาที ทำให้แป้งเกิดเจลาติไนเซชันสูงสุดประมาณ 35% ซึ่งระยะเวลาการลวกดังกล่าวส่งผลให้มันฝรั่งเกิดการขยายตัวได้ดีกว่ามันฝรั่งที่ผ่านการลวกด้วยเวลา 2-4 นาที ส่วนผลการวิเคราะห์แรงต้านที่บริเวณผิวของมันฝรั่งหลังจากลวกตัวอย่างแล้วนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C แสดงดังรูปที่ 2.6-2.7 พบว่า มันฝรั่งทั้งในกรณีผ่านการลวก และไม่ผ่านการลวก หากใช้เวลาอบแห้งนานประมาณ 80-90 นาที ทำให้ความชื้นของตัวอย่างเหลือน้อยประมาณ 38% w.b. ส่งผลต่อแรงต้านที่บริเวณผิวของวัสดุสูง ซึ่งมีผลต่อระดับการขยายตัวลดลงอยู่ในช่วง 0.4-0.5 cm³ ขณะที่ใช้เวลาอบแห้งสั้นประมาณ 60 นาที ทำให้เกิดแรงต้านที่บริเวณผิวของวัสดุต่ำ มีผลให้ตัวอย่างขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 0.6 cm³ ซึ่งการขยายตัวจะเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุมีปริมาณที่เพียงพอต่อการเดือด และระเหยกลายเป็นไอ จนกระทั่งดันให้วัสดุเกิดการขยายตัว ดังนั้นการลดความชื้นในขั้นตอนแรกก่อนนำไปผ่านการพuffing ด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นจึงเป็นอีกตัวแปรที่ต้องศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมของแต่ละผลิตภัณฑ์ และผลการศึกษาของ Shilton et al. (1998) พบว่า การลดความชื้นในขั้นตอนแรกก่อนนำไปพuffing มีผลต่อระดับการขยายตัว ซึ่งอบแห้งในขั้นตอนแรกเป็นเวลา 90 นาที มีระดับความชื้นประมาณ 1.12% w.b. พบว่า ปริมาตรของมันฝรั่งเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นประมาณ 1.57 เท่า แสดงดังรูปที่ 2.8 เมื่ออบแห้งในขั้นตอนแรกเป็นเวลานานขึ้นประมาณ 100 นาที ระดับการขยายตัวจะลดต่ำลง เนื่องการอบแห้งเป็นเวลานาน ทำให้ความชื้นก่อนการพuffing เหลือน้อย ดังนั้นปริมาณน้ำที่อยู่ภายในวัสดุจึงมีไม่เพียงพอต่อการเดือด และระเหยจนกระทั่งกลายเป็นไอ จึงส่งผลให้มีการขยายตัวได้น้อย



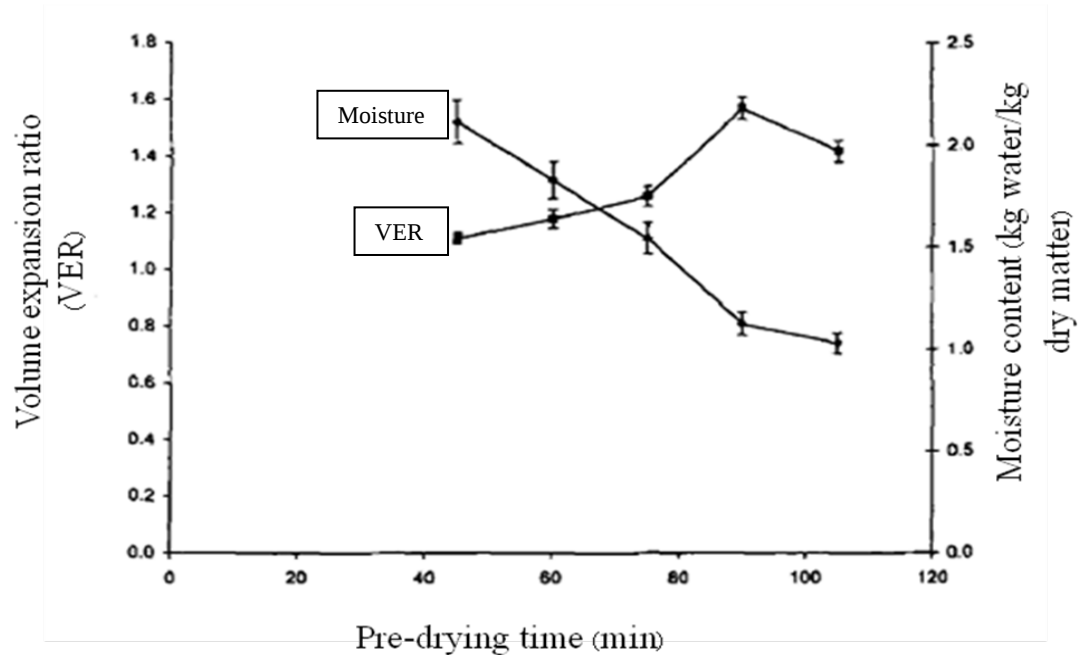
รูปที่ 2.5 ระดับการเกิด gelatinization ของมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ที่ลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และนำมาอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 40 นาที โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวหลังจากพuffing ที่ อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 40 วินาที (Varnalis et al., 2001)



รูปที่ 2.6 ผลของการลวกและเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อแรงต้านบริเวณผิวของ
มันฝรั่งภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90°C (Varnalis et al., 2001)



รูปที่ 2.7 ผลของการลวกและเวลาในการอบแห้งที่มีผลต่อปริมาตรของมันฝรั่งที่ผ่านการลวกและนำ
ตัวอย่างมาอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลาระหว่าง 60-90 นาที จากนั้นนำตัวอย่าง
ไปฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 50 วินาที (Varnalis et al., 2001)

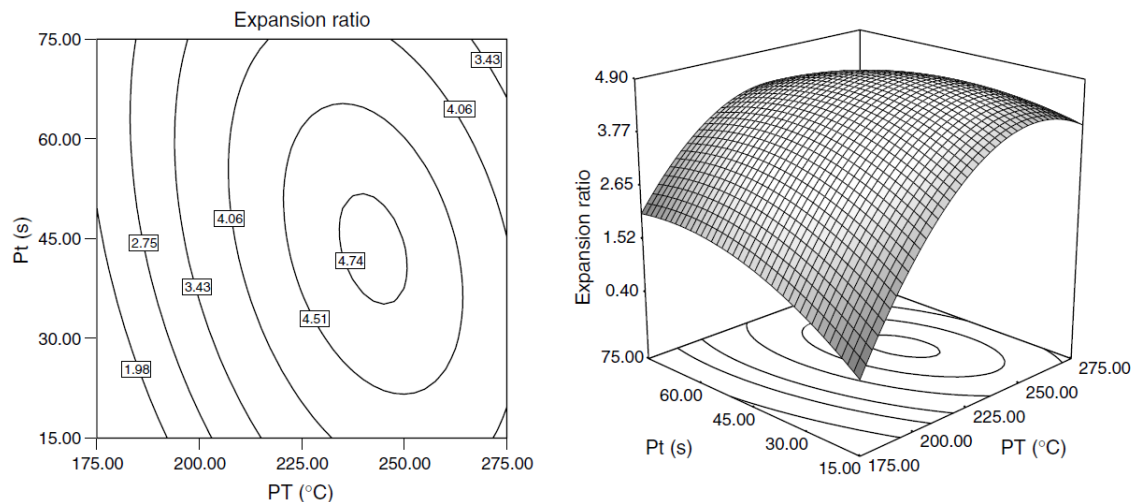


รูปที่ 2.8 อิทธิพลของ Pre – drying time ที่มีผลต่อการขยายตัวของมันฝรั่งระหว่างการพффฟง ที่อุณหภูมิ 130°C (Shilton et al., 1998)

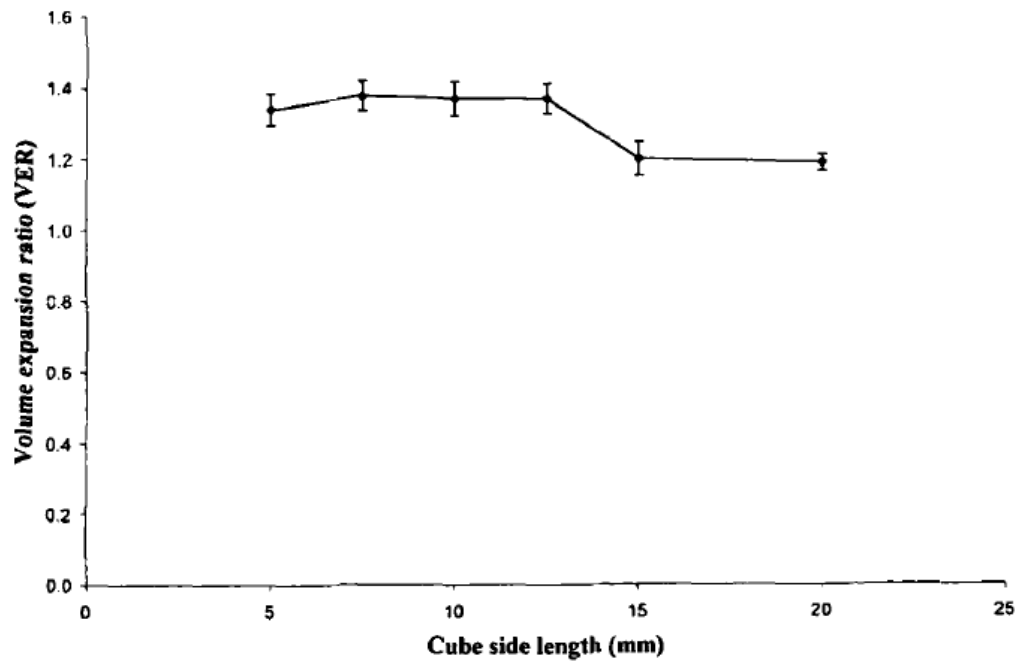
2.4.1.2 อุณหภูมิ และเวลาในการพффฟง

สำหรับอุณหภูมิพффฟงเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการขยายตัวของวัสดุ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์กับอัตราการระเหยของน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ โดยอุณหภูมิพффฟงสูงจะช่วยเร่งอัตราการระเหยของไอน้ำได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันไอน้ำสูงขึ้น ดังนั้นวัสดุจึงขยายตัวได้มาก นอกจากปัจจัยของอุณหภูมิพффฟงแล้ว ระยะเวลาในการพффฟงยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเช่นกัน เนื่องจากระยะเวลาพффฟงที่สั้นมาก อาจส่งผลต่อการพองตัวได้น้อย และถ้าอุณหภูมิสูงมาก และพффฟงเป็นเวลานาน อาจส่งผลต่อคุณภาพด้านสีของวัสดุได้ จากผลการศึกษาของ Shilton et al. (1998) โดยใช้อุณหภูมิพффฟงระหว่าง 120-130°C เป็นเวลา 90-270 วินาที พบว่า พффฟงด้วยอุณหภูมิสูง 130°C เป็นเวลา 90 วินาที จะให้ระดับการขยายตัวประมาณ 1.22 และเพิ่มเวลาพффฟงเป็น 270 วินาที ส่งผลต่อระดับการขยายตัวสูงขึ้นเป็น 1.37 เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Nath et al. (2007) โดยใช้อุณหภูมิพффฟงระหว่าง 175-275°C เป็นเวลา 15-75 วินาที พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และพффฟงเป็นเวลานาน แนวโน้มการขยายตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แสดงดังรูปที่ 2.9 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการขยายตัวสูงสุดของ potato snack คือ อุณหภูมิในการพффฟงประมาณ 235.46°C และเวลาในการพффฟงคือ 51.11 วินาที ที่ความชื้นก่อนการพффฟง 36.74% w.b. นอกจากปัจจัยของอุณหภูมิ และเวลาพффฟงแล้ว ปัจจัยระดับความหนาของวัสดุ และขนาดของรูปทรงที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมีผลต่อระดับการขยายตัวได้มากหรือน้อยแตกต่างกัน

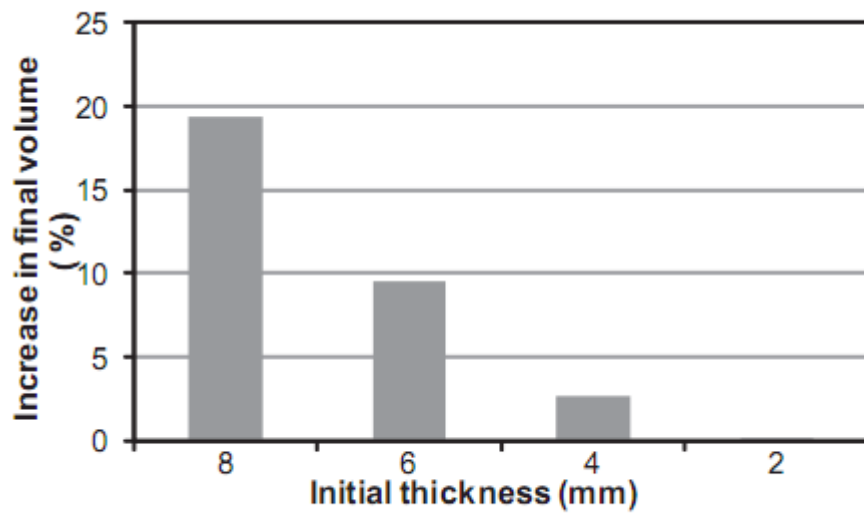
จากงานวิจัยของ Shilton et al. (1998) ดังกล่าวเบื้องต้น พบว่า ขนาดของมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ที่เหมาะสมต่อการฟัฟฟิงด้วยฟลูอิดไฮเซนคือ 7.5-12.5 mm และฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 130°C จะให้อัตราการขยายตัวสูงประมาณ 1.37-1.38 เท่า แต่หากตัวอย่างมีขนาดระหว่าง 15-20 mm และฟัฟฟิงด้วยอุณหภูมิเดียวกัน โครงสร้างเกิดการขยายตัวลดลง และเกิดการหดตัวลงในขั้นตอนต่อมา เนื่องจากขนาดของวัสดุที่หนามาก พื้นที่สำหรับการขยายตัวจะมาก จึงทำให้ขยายตัวได้ค่อนข้างดีในขั้นตอนการฟัฟฟิง แต่หลังจากผ่านกระบวนการฟัฟฟิงปริมาณความชื้นยังคงเหลืออยู่มาก ดังนั้นเมื่อนำมาอบแห้งต่อในขั้นตอนต่อมาวัสดุจึงเกิดการหดตัวลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนผลการศึกษาของ Rakesh and Datta, (2011) โดยใช้มันฝรั่งรูปทรงแบบแผ่นที่ขนาดความหนาระหว่าง 2-8 mm พบว่าระดับความหนาของมันฝรั่งที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อระดับการขยายตัวได้มากกว่าระดับความหนาที่บาง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวอย่างที่มีขนาดบาง ความชื้นที่บริเวณผิวระเหยได้เร็วกว่าที่ขนาดความหนามาก ทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุเหลือน้อยไม่เพียงพอที่จะทำให้น้ำภายในวัสดุเดือด และระเหย จึงทำให้วัสดุขยายตัวได้น้อย จากผลการศึกษากล่าวนี้แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยของรูปทรงของวัสดุที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อระดับการขยายตัวได้ต่างกัน



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของเวลาฟัฟฟิง (Pt) อุณหภูมิฟัฟฟิง (PT) ที่มีต่อ potato snack (Nath et al., 2007)



รูปที่ 2.10 อิทธิพลขนาดของน้ำมันฝรั่งที่มีผลต่อการขยายตัวของน้ำมันฝรั่งระหว่างการพффิงที่อุณหภูมิ 130 °C (Shilton et al., 1998)



รูปที่ 2.11 อิทธิพลขนาดความหนาของตัวอย่างที่มีต่อการขยายตัว (Rakesh and Datta, 2011)

2.5 ผลของการพัฟฟิงที่มีต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

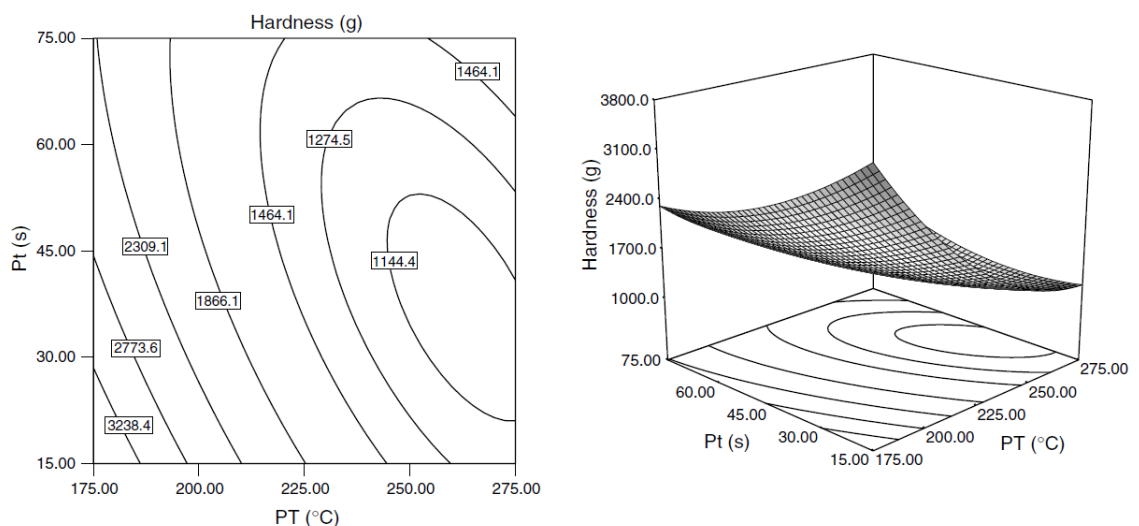
ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารกรอบมีความสำคัญ และเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารกรอบพิจารณาได้หลายตัวแปร เช่น ความกรอบ (Crispness) และความแข็ง (Hardness) เป็นต้น การวัดค่าเนื้อสัมผัสของอาหารด้วยเครื่องมือเป็นการวัดทางกลด้วยการทดสอบแรงกด (Compression test) โดยใช้หัววัดรูปทรงต่างๆ เพื่อกดลงบนอาหาร โดยใช้หลักการเพิ่มแรง (Force) หรือความเค้นกดอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ จากนั้นวัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ เนื่องมาจากเกิดความเค้น (Stress) เพราะการถูกแรงภายนอกมากระทำ หากวัสดุที่นำมาทดสอบมีความเปราะจะเกิดการแตกหัก ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้จะบอกลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture property) โดยแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) พร้อมแรงดันของตัวอย่างอาหาร ซึ่งค่าตัวแปรสำคัญที่ได้จากกราฟได้แก่ ความแข็งแสดงถึงแรงสูงสุดที่กดจนกระทั่งตัวอย่างแตก (Maximum force) ส่วนความกรอบแสดงได้จากความชันเริ่มต้น และจำนวนยอด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (Anton et al., 2007) นอกจากนี้แล้ววิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง ซึ่งทำให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อสัมผัสได้ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจุบันนี้มีวิธีการแปรรูปที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของวัสดุ ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายวิธีการแปรรูปผลไม้แบบต่างๆ ได้แก่ การพัฟฟิงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น การพัฟฟิงด้วยไมโครเวฟ และการทอด ที่มีผลต่อเนื้อสัมผัส ซึ่งพิจารณาจากความชันเริ่มต้น (Initial Slope) ของเส้นกราฟระหว่างแรงกับระยะทาง (Force-Distance Curve) หรือความชันของเส้นกราฟก่อนถึงจุดที่ให้แรงสูงสุด (Maximum Force) ซึ่งความชันจะแสดงถึงความต้านทานต่อการโค้งงอ

2.5.1 ผลของการพัฟฟิงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยลมร้อนต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

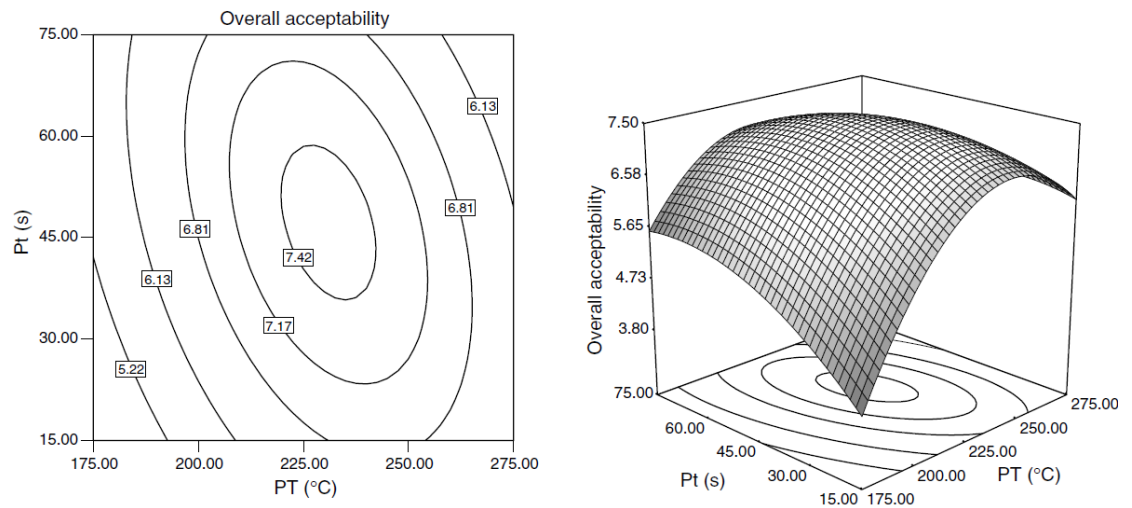
สำหรับวิธีการพัฟฟิงโดยใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้น พบว่ามีด้วยกันหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการพัฟฟิงได้แก่ ความชันเริ่มต้น อุณหภูมิพัฟฟิงเวลาพัฟฟิง และการลวกนํ้าร้อนก่อนนำไปพัฟฟิง เป็นต้น Nath et al. (2007) ศึกษาการพัฟฟิงมันฝรั่ง โดยมีขอบเขตการศึกษาคือ ความชันเริ่มต้นของมันฝรั่งอยู่ในช่วงระหว่าง 30-40% w.b. อุณหภูมิพัฟฟิงระหว่าง 175-275°C และเวลาพัฟฟิง 15-75 วินาที ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของอุณหภูมิพัฟฟิงที่สูงขึ้น ส่งผลต่อค่าความแข็งของมันฝรั่งที่ลดลงทุกเงื่อนไขของเวลา

ในการพффิง นอกจากน้ีการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของตัวอย่างก่อนการพффิง มีผลต่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และผลจากการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ด้วย Response surface methodology (RSM) พบว่าความชื้นเริ่มต้นของมันฝรั่งประมาณ 34.8% w.b. และพффิงด้วยอุณหภูมิประมาณ 235.5°C เป็นเวลา 51.1 วินาที ซึ่งสภาวะดังกล่าว ทำให้มันฝรั่งมีค่าความแข็งลดลง แสดงดังรูปที่ 2.12 นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมไปทดสอบการยอมรับประสาทสัมผัสแสดงดังรูปที่ 2.13 พบว่า มีค่าการยอมรับสำหรับการทดสอบประสาทสัมผัสค่อนข้างสูงประมาณ 7.42

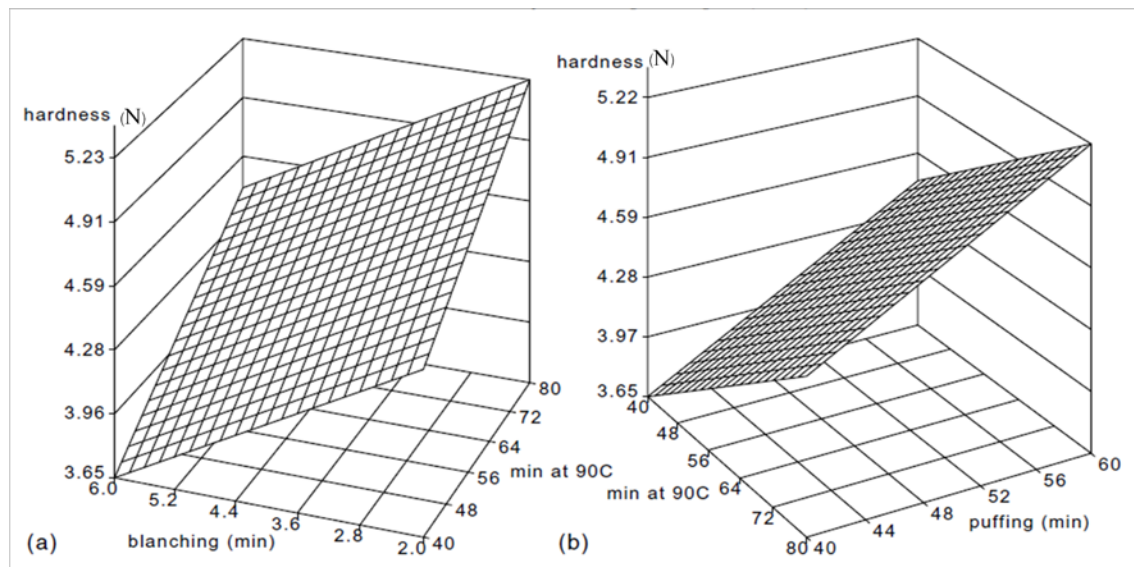
นอกจากปัจจัยดังกล่าวเบื้องต้นแล้ว การลวกเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความแข็งของผลิตภัณฑ์ Varnalis et al. (2004) ศึกษาการพффิงมันฝรั่ง โดยศึกษาปัจจัยของเวลาอบแห้งในขั้นตอนแรก 90°C เป็นเวลา 40 60 และ 80 นาที และเวลาในการลวกระหว่าง 2-6 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปพффิงด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 40 50 และ 60 วินาที แสดงดังรูปที่ 2.14 พบว่า การลวกน้ำร้อนมีส่วนช่วยลดความแข็งของมันฝรั่งได้ และช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้าง และยังลดการซึมผ่านของแรงดันไอน้ำขณะพффิง ซึ่งการลวกตัวอย่างเป็นเวลานานขึ้น มีผลให้ความแข็งของมันฝรั่งลดลง และหลังจากลวกตัวอย่างแล้วนำไปอบแห้งต่อในขั้นตอนแรกก่อนพффิงเป็นเวลานาน ทำให้เนื้อสัมผัสมีความแข็งมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบแห้งในขั้นตอนแรกเป็นเวลานาน ทำให้โครงสร้างแข็ง เนื่องจากปริมาณความชื้นเหลือน้อย ซึ่งมีผลต่อการขยายตัวลดลงขณะพффิง ส่งผลให้มันฝรั่งมีความแน่นเนื้อสูง



รูปที่ 2.12 อิทธิพลของเวลาพффิง (Pt), อุณหภูมิพффิง (PT) ที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของ potato snack ด้านความแข็งโดยวิเคราะห์ด้วย RSM (Nath et al., 2007)



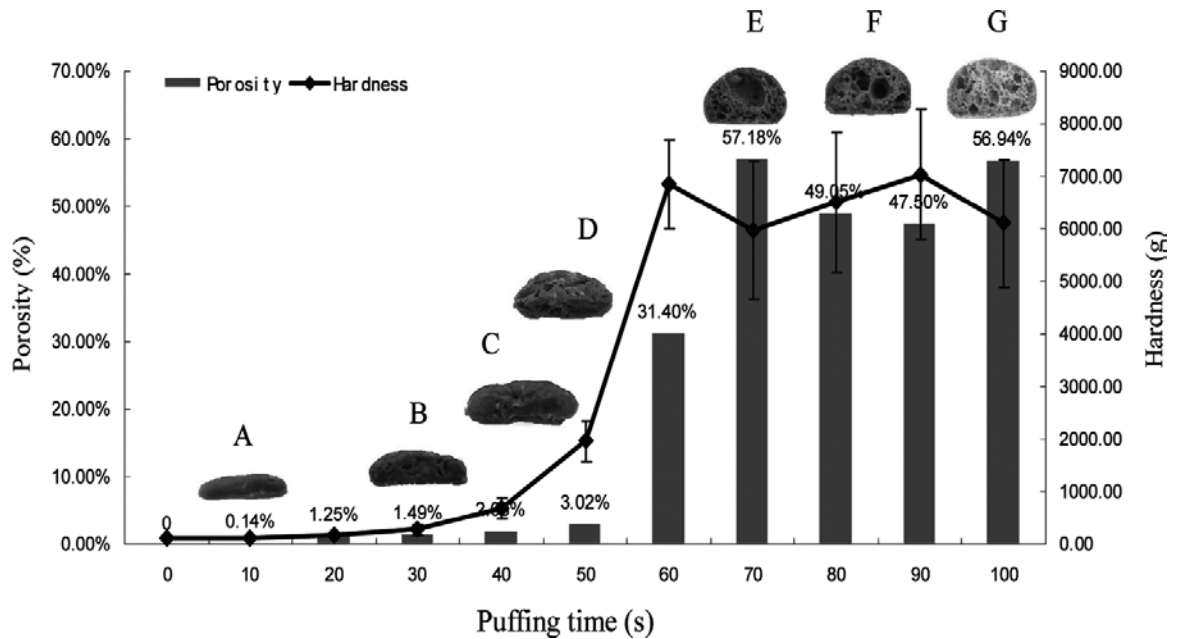
รูปที่ 2.13 อิทธิพลของ เวลาพффฟ (Pt), อุณหภูมิพффฟ (PT) ที่มีผลต่อ potato snack ด้านการทดสอบ
ประสาทสัมผัสโดยวิเคราะห์ด้วย RSM (Nath et al., 2007)



รูปที่ 2.14 (a) อิทธิพลของเวลาลวกน้ำร้อน (Blanching) เวลาการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C
และ (b) อิทธิพลของเวลาการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และเวลาพффฟต่อความ
แข็งของมันฝรั่ง (Varnalis et al., 2004)

2.5.2 ผลของการฟุ้งด้วยไมโครเวฟต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

การฟุ้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยไมโครเวฟ สามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จากผลการศึกษาของ Zheng et al. (2012) ซึ่งได้ศึกษาเงื่อนไขการฟุ้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ โดยให้กำลังไมโครเวฟระหว่าง 1.34 2.68 และ 4.02 kW และระดับสุญญากาศระหว่าง 15 30 และ 45 kPa และความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 25-45 % w.b. และฟุ้งเป็นเวลา 0-100 วินาที ที่มีผลต่อระดับการขยายตัว และเนื้อสัมผัสด้านความแข็งของ Raspberry snack พบว่า Raspberry snack มีระดับการขยายตัวสูงภายใต้เงื่อนไขของความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20% w.b. ที่ระดับสุญญากาศ 30 kPa และกำลังไมโครเวฟ 28 W/g ส่วนผลด้านเนื้อสัมผัสพิจารณาจากค่าความแข็ง และความพรุนของตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขเวลาฟุ้งระหว่าง 0-100 วินาที แสดงดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าฟุ้งเป็นเวลา 50 วินาที มีผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เป็น 2000 g และมีความพรุนน้อยอยู่ในช่วงระหว่าง 3.02% คูได้จากสัญลักษณ์ (A, B, C) ซึ่งช่วงนี้เป็นขั้นตอนของการดูดซับความร้อน โดยพลังงานจากไมโครเวฟจะแทรกเข้าไปในตัวอย่าง ทำให้โมเลกุลของน้ำสั่น และเกิดการเสียดสี จึงทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้น้ำเดือด และกลายเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้าง ส่งผลให้วัสดุเกิดการขยายตัว เมื่อเวลาฟุ้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 วินาที ตัวอย่างมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 7000 g หลังจากนั้นค่าความแข็งเริ่มลดลง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยระหว่างเวลาฟุ้ง 70-100 นาที ซึ่งมีความพรุนเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 47.5-56.9% แสดงดังสัญลักษณ์ (E, G, F) ทั้งนี้เนื่องจากฟุ้งเป็นเวลานานขึ้น ส่งผลต่อแรงดันไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นภายในวัสดุ ทำให้โครงสร้างมีรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งกลับมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องฟุ้งเป็นเวลานานขึ้น ส่งผลให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณผิวของตัวอย่างเริ่มแข็งมากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ตัวอย่างมีเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Lin et al. (1998) เปรียบเทียบกรอบแห้งแครอทด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีผลต่อเนื้อสัมผัส พบว่า อบแห้งด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ ลักษณะของเนื้อสัมผัสที่ได้มีความกรอบมากกว่าอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

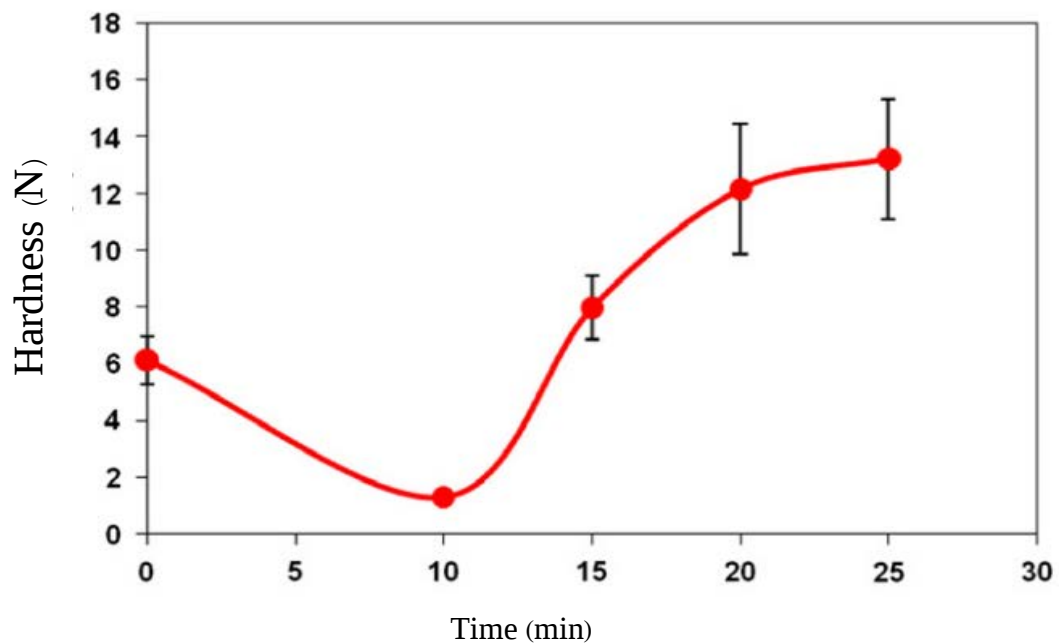


รูปที่ 2.15 ความเป็นรูพรุนและความแข็งของ Raspberry snack ระหว่างกระบวนการพuffing ด้วยสุญญากาศภายใต้เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 2.68 kW และระดับสุญญากาศ 70 kPa และความชื้นเริ่มต้น 20% w.b. (Zheng et al., 2012)

2.5.3 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดสุญญากาศต่อเนื้อสัมผัส

นอกจากการแปรรูปด้วยกระบวนการพuffing แล้ว การแปรรูปด้วยการทอดเป็นอีกวิธีการที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนน้อย และอาหารกรอบส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทอดที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงและทอดเป็นเวลานาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเข้ม นอกจากนี้ยังมีการดูดซับน้ำมันในปริมาณสูงอีกด้วย ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคนิคการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งเป็นการลดจุดเดือดของของเหลวภายในอาหาร ทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการดูดซับน้ำมันลดลง และการทอดภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้เกิดออกซิเดชันต่ำ จึงทำให้มีระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น สำหรับการทอดภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศ จากงานวิจัยของ Yamsaengsung et al. (2011) โดยใช้กล้วยระดับความสุกที่ 6 และหั่นตามขวางขนาด 3.5-4.5 mm จากนั้นนำไปทอดด้วยอุณหภูมิ 110°C ที่ความดัน 8 kPa เป็นเวลาระหว่าง 10-25 นาที ซึ่งผลการทดลองด้านเนื้อสัมผัสพิจารณาจากค่าความแข็งของกล้วยแผ่นแสดงดังรูปที่ 2.16 พบว่ากล้วยแผ่นที่ทอดเป็นเวลาประมาณ 0-10 นาที มีเนื้อสัมผัสด้านความแข็งลดลงมีค่าระหว่าง 6.14-1.29 N ทั้งนี้เนื่องจากระหว่างการทอดในช่วงแรกเป็นเวลาประมาณ 10 นาที อุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของน้ำ จากนั้นจะเกิดการระเหยของน้ำออกจากชิ้นตัวอย่างอย่างรวดเร็ว และมีการฟอรั่มตัวของเม็ดแป้งเกิดเจลลิตในเซชันภายในตัวอย่าง ทำให้โครงสร้างมี

ความแข็งแรงลดลง เมื่อเพิ่มเวลาทอดให้นานขึ้นเป็น 15-25 นาที กล้วยแผ่นมีเนื้อสัมผัสแข็งมากขึ้นเป็น 12.17 N ซึ่งเนื้อสัมผัสที่แข็งมากขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากความชื้นที่อยู่ภายในตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ 6% w.b. ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่าง (T_g grass transition) สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างที่มีลักษณะนุ่มยืดหยุ่นเปลี่ยนเป็นเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



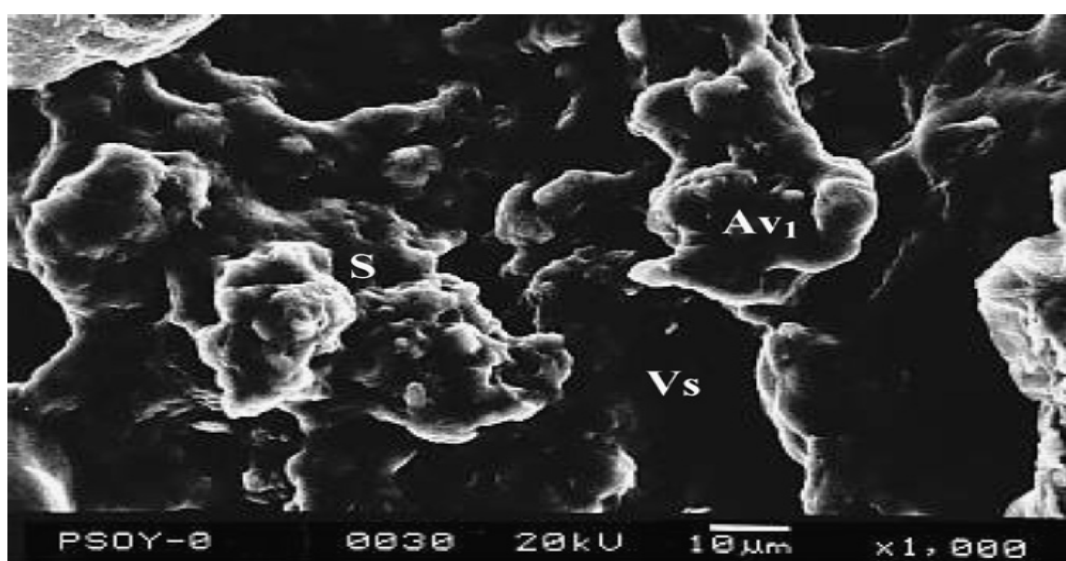
รูปที่ 2.16 ค่าความแข็งแรงของกล้วยแผ่นที่ผ่านการทอดด้วยสุญญากาศที่อุณหภูมิ 110°C ที่ความดัน 8 kPa และทอดด้วยเวลาต่างๆ (Yamsaengsung et al., 2011)

2.6 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอณูฐานวิทยาหลังการฟัฟฟิง

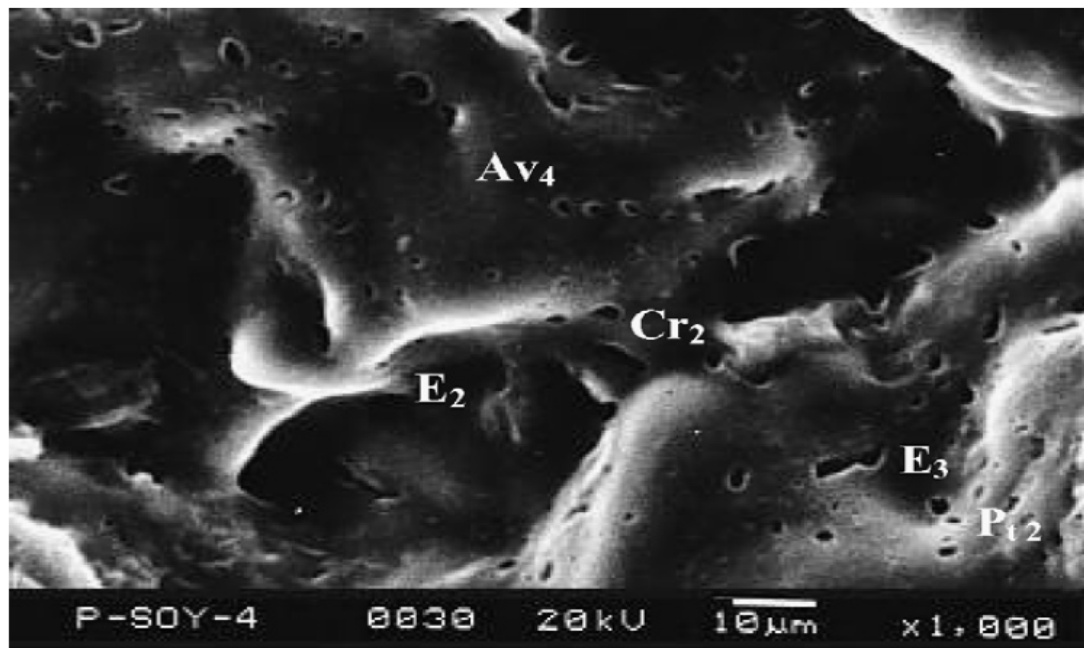
ในระหว่างการอบแห้ง อาหารสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะที่ปรากฏ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏต่างๆ เช่น การหดตัว การเปลี่ยนรูป การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อสัมผัส เป็นต้น ดังนั้นการทดสอบด้านอณูฐานวิทยาของวัสดุอบแห้งด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อดูรายละเอียดในระดับจุลภาคของวัสดุที่ผ่านขั้นตอนการอบแห้งด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งสามารถนำมาอธิบายความสัมพันธ์ต่อความกรอบ และความแข็งแรงของวัสดุได้

2.6.1 ผลของการพuffingด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติ ด้านอณูฐานวิทยา

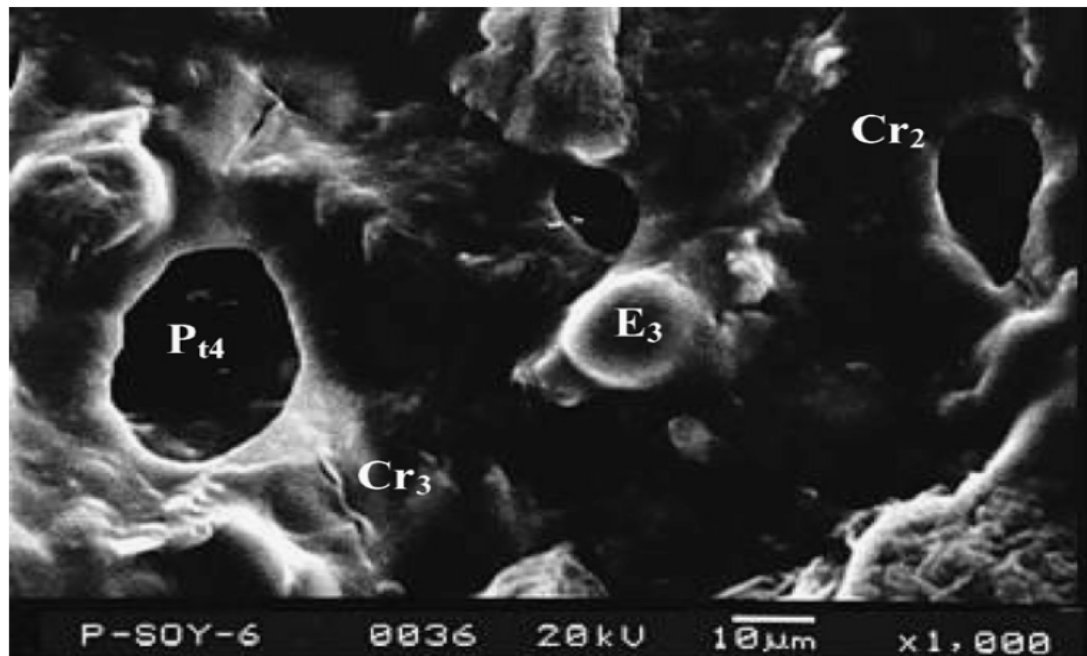
จากผลการศึกษาของ Nath et al. (2008) ด้วยวิธีการพuffingที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ระยะเวลาสั้นด้วยฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิ 185 - 255°C และพuffingเป็นเวลา 20 - 60 วินาที ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของ potato soy snack ที่เงื่อนไขการพuffingต่างๆ โดยแสดงผลการขยายตัวของตัวอย่าง ซึ่งอธิบายในเทอมของสัญลักษณ์ดังนี้ การขยายตัวของเม็ดแป้ง (S: intact starch granules) ขนาดของรูพรุน (A: air vacuoles) ขนาดของโพรง (V: void spaces) การขยายตัวของเม็ดแป้ง (E: expansion starch granules) การแตก (C: crack) และ (P: larger size pits) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.17-2.19 โดยโครงสร้างของ potato soy snack ก่อนนำไปพuffing พบว่า โครงสร้างของเม็ดแป้งเกาะตัวกันแน่น และยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากพuffingเป็นเวลา 5 วินาที จะเกิดการขยายตัวค่อนข้างน้อย และเมื่อเพิ่มเวลาพuffingเป็น 20 วินาที ดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการพองตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นดูได้จากสัญลักษณ์ E_2 และ E_3 และเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวของเม็ดแป้ง Cr_2 และเมื่อเพิ่มเวลาในการพuffingนานขึ้นเป็น 30 วินาที ดังรูปที่ 2.19 พบว่า โครงสร้างของเม็ดแป้งจะเกิดการขยายตัวมาก E_3 และบริเวณผิวจะเปราะแตกเพิ่มขึ้น แสดงสัญลักษณ์เป็น Cr_2 และ Cr_3 และยังเกิดโพรงขนาดใหญ่ P_4 ทั้งนี้เนื่องจากการพuffingเป็นเวลานาน ทำให้ความดันไที่เกิดจากการเดือดของน้ำภายในวัสดุมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่และแตกบริเวณผิวของวัสดุ



รูปที่ 2.17 ภาพจาก SEM ของ potato snack ก่อนการพuffing (Nath et al., 2008)



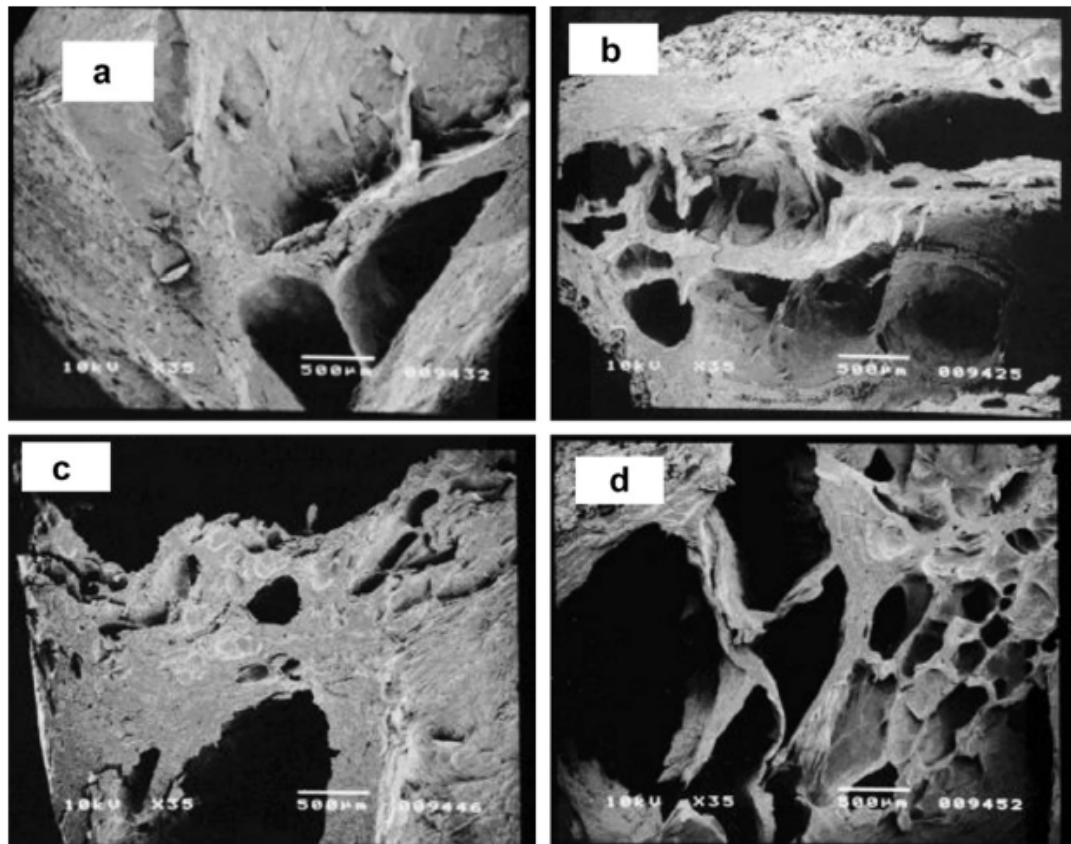
รูปที่ 2.18 ภาพจาก SEM ของ potato snack หลังการทอดเป็นเวลา 20 วินาที ที่อุณหภูมิ 230°C
(Nath et al., 2008)



รูปที่ 2.19 ภาพจาก SEM ของ potato snack หลังการทอดเป็นเวลา 30 วินาที ที่อุณหภูมิ 230°C
(Nath et al., 2008)

2.6.2 ผลของการฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอณูฐานวิทยา

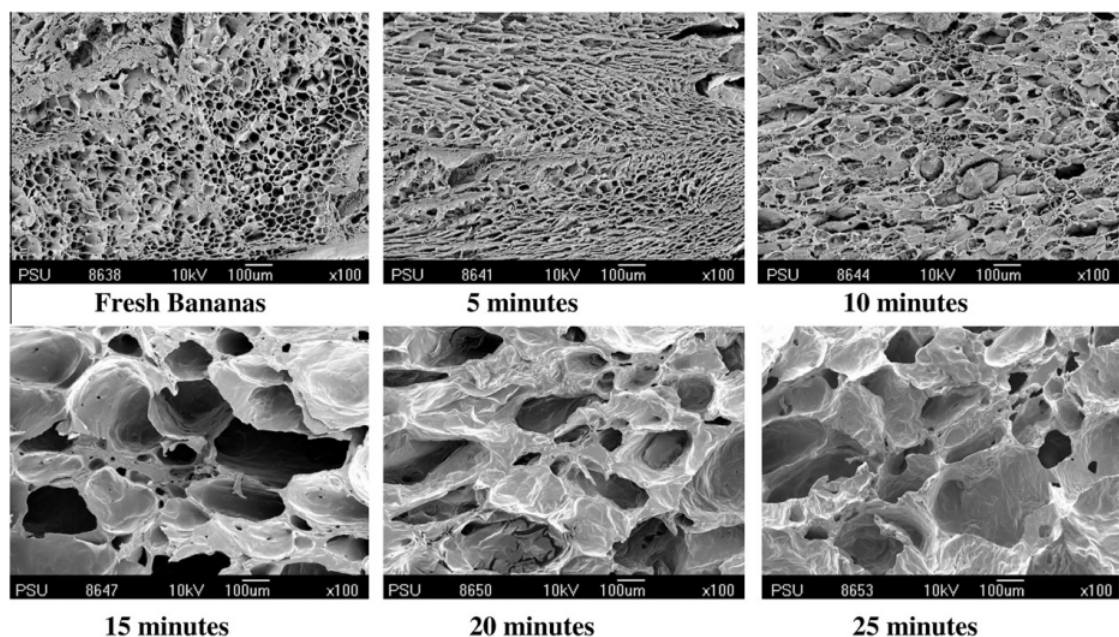
จากผลการศึกษาของ Bondaruk et al. (2007) ศึกษาคุณภาพของมันฝรั่งหลังผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ โดยมันฝรั่งรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10 mm จากนั้นนำไปลวกด้วยน้ำร้อนเป็นเวลา 4.5 นาที ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 4 kg water/kg d.b. และนำไปอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ ผลการทดลองด้านโครงสร้างระดับจุลภาค (SEM) โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ส่วนคือนำตัวอย่างที่ผ่านการลวก และไม่ลวกไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C และนำมาอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศที่ความดัน 6 และ 24 kPa แสดงดังรูปที่ 2.19 (a)-2.19 (d) โดยแสดงภาคตัดขวางของตัวอย่าง (Cross-section) ซึ่งจากรูปที่ 2.19 (a)-(b) แสดงตัวอย่างที่ผ่านการลวกและอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งสองกรณีทำให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อมีความแน่นเนื้อสูง ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศที่แรงดัน 6 และ 24 kPa แสดงดังรูปที่ 2.20 (c)-(d) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเกิดโพรงและมีรูพรุนมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งโพรงและรูพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของไอน้ำภายในวัสดุสูง ทำให้โครงสร้างเซลล์ถูกทำลาย



รูปที่ 2.20 ภาพจาก SEM ของมันฝรั่ง (a) มันฝรั่งที่ผ่านการลวกและอบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C (b) มันฝรั่งที่ผ่านการลวกและอบแห้งต่อด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C (c) อบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ความดัน 6 kPa (d) อบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ความดัน 24 kPa (Bondaruk et al., 2007)

2.6.3 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านอณูฐานวิทยา

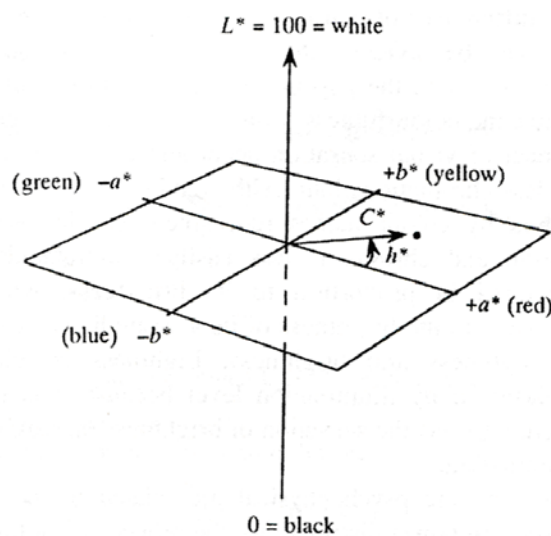
Yamsaengsung et al. (2011) ได้ศึกษากล้วยระดับความสุกที่ 6 และหั่นตามขวางขนาด 3.5-4.5 mm จากนั้นนำไปทอดที่อุณหภูมิ 110°C ความดัน 8 kPa เป็นเวลาระหว่าง 10-25 นาที ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกล้วยแผ่นแสดงดังรูปที่ 2.21 พบว่า กล้วยสดที่ไม่ผ่านการทอดมีความแน่นเนื้อสูง หลังจากทอดเป็นเวลา 5 นาที เริ่มมีรูพรุนขนาดเล็กภายในตัวอย่าง และระยะเวลาในการทอดระหว่าง 10-20 นาที รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นภายในตัวอย่าง เนื่องจากการขยายตัวของแรงดันไอลภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน โดยตัวอย่างที่ผ่านการทอดเป็นเวลา 10 และ 15 นาทีคือ 37.84 และ 84.92 μm ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 ภาพจาก SEM ของกล้วยแผ่นที่ผ่านการทอดที่เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 110°C ที่ความดัน 8 kPa (Yamsaengsung et al., 2011)

2.7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสี

ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดมักจะเกิดการเปลี่ยนสี เป็นสีเข้มหรือคล้ำมากขึ้นหรือกลายเป็นสีน้ำตาล ในระหว่างกระบวนการผลิตทั้งแบบที่มีเอนไซม์ และไม่มีเอนไซม์ การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว มีความสำคัญต่อคุณภาพอาหาร ซึ่งอาจทำให้อาหารมีคุณภาพดีขึ้นหรือเลวลงได้ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสี จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร ดังนั้นจึงต้องมีระบบที่ใช้ในการวัดสี โดยทั่วไปแล้วปัจจัยหลักที่ใช้ในการวัดสี ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง ตามนุษย์ และช่วงคลื่นแสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วง 380-770 นาโนเมตร โดยระบบที่นิยมใช้มี 3 ระบบ ได้แก่ ระบบ Munsell ระบบ CIE และระบบ Hunter สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Hunter ในการทดสอบ โดยบอกค่าสีเป็น L^* , a^* และ b^* (รูปที่ 2.22) โดยค่า L^* (Lightness) เปรียบเทียบได้กับค่า Y ในระบบ CIE ค่าที่อ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0-100 ซึ่งแสดงค่าจากมืดไปหาสว่าง ค่า a^* (redness/greenness) เป็นฟังก์ชันของค่า X และ Y มีค่าตั้งแต่ -60 ถึง +60 จากสีเขียวเป็นสีแดง และค่า b^* (yellowness/blueness) เป็นฟังก์ชันของค่า Y และ Z มีค่าตั้งแต่ -60 ถึง +60 แสดงค่าจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง



รูปที่ 2.22 แผนภาพสีระบบ Hunter (MacDougall, 2002)

การเปลี่ยนแปลงของสีของอาหารซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาล มักเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต เช่น เมื่อปอกผักและผลไม้ เช่น แอปเปิ้ลหรือกล้วย แล้ววางทิ้งไว้จะเกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บริเวณที่ปอก เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลในอาหารส่วนใหญ่ไม่เป็นที่ต้องการ เพราะบางครั้งอาจทำให้รสชาติไม่ดี และทำให้ลักษณะภายนอกของอาหารไม่น่าดู และไม่น่ารับประทาน การเกิดสีน้ำตาลในอาหารมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่อาศัย

เอนไซม์ และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (นิธิยา รัตนานนท์, 2544) แสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.7.1 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ (Enzymatic browning Reaction)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชเมื่อเซลล์ถูกทำลาย เช่น การปอกเปลือกหรือการหั่นชิ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารประกอบโมโนโพลีฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชันได้เป็นออร์โท-ไดฟีนอล (o-diphenol) สารนี้จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นออร์โท-ควิโนน (o - quinone) ควิโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ PPO นี้จะรวมตัวกันและเกิดปฏิกิริยามัลดาร์ดกับสารประกอบฟีนอลอื่นๆ หรือกับกรดอะมิโนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาล

2.7.2 ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ (Non - Enzymatic browning Reaction)

ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ เกิดขึ้นเมื่ออาหารได้รับความร้อน จะมีการรวมตัวกันของของหมู่อะมิโนกับสารประกอบรีดิวซ์ ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นสารเชิงซ้อนสีเหลืองจนกระทั่งเป็นสีน้ำตาลแดง ทำให้อาหารมีกลิ่น และรสชาติเฉพาะ ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. ปฏิกิริยาการคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) เป็นการให้ความร้อนสลายโมเลกุลของน้ำตาลให้แยกออก และเกิดพอลิเมอร์เซชันกลายเป็นสารสีน้ำตาล ปฏิกิริยานี้มีสารเริ่มต้นเป็นน้ำตาลเท่านั้น และปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับอาหารที่ไม่มีองค์ประกอบของไนโตรเจน และเกิดเมื่ออาหารที่มีน้ำตาลได้รับความร้อนซึ่งมีสภาพกรดหรือด่างเป็นตัวกระตุ้น
2. ปฏิกิริยามัลดาร์ด (Maillard Reaction) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อัลดีไฮด์และคีโตนของน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่กรดอะมิโน เปปไทด์ และโปรตีน ได้สารประกอบพอลิเมอร์ของเมลานอยดินส์ (Melanoidins) ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้ม โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่ออาหารได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน

2.8 การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผัก และผลไม้ได้แก่ กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก และสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ เป็นต้น โดยกลไกการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของสารละลายแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 สารละลายกรด

กรดเป็นที่รู้จัก และนำมาใช้กับอาหาร ซึ่งการใช้สารละลายกรดในผลไม้เพื่อช่วยปรับปรุงกลิ่นรส และยังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้เก็บผลิตภัณฑ์นั้นได้นานขึ้น ช่วยปรับปรุงสีของผัก และผลไม้ โดยการเลือกใช้กรดจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่มีอยู่มากในผลไม้หรือผักนั้นๆ ผลไม้โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะมีกรดซิตริก (กรดมะนาว) องุ่นมีกรดทาร์ทาริก เป็นต้น นอกจากนี้การพรีทรีทเมนต์โดยการแช่ในสารละลายกรด ยังสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ที่หั่นหรือตัดเป็นชิ้น และต้องสัมผัสกับอากาศได้ เช่น แอปเปิล และกล้วย เป็นต้น สารละลายกรดที่นิยมใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมได้แก่ สารละลายกรดแอสคอร์บิก สารละลายกรดซิตริก และสารละลายผสมระหว่างกรดแอสคอร์บิก และกรดซิตริก โดยกรดซิตริกเป็นสารที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และนิยมใช้กับผักและผลไม้แปรรูป โดยกรดซิตริกทำหน้าที่ในการจับโลหะทองแดงในเอนไซม์ PPO และสมบัติความเป็นกรดของซิตริกจะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ PPO โดยทำหน้าที่ลด pH ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าเอนไซม์ PPO ทำงานไม่ได้ ซึ่ง pH ในช่วงประมาณ 3.0 (นิริยา รัตนปณณท์, 2544) สำหรับกรดแอสคอร์บิกหรือวิตามินซี เป็นสารที่ไม่มีพิษ ไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการ รสชาติไม่แพง และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยกรดแอสคอร์บิกมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดสีน้ำตาลได้ และเป็นสาร reducing agent สามารถรีดิวซ์สารควิโนนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลให้กลับมาอยู่ในรูปของสารประกอบฟีนอลตามเดิม ก่อนที่สารควิโนนจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนกลายเป็นสารสีน้ำตาล ผลไม้ที่นิยมใช้กรดแอสคอร์บิกในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้แก่ ขึ้นฉะพล ห้วกะหล่ำเห็ด พืช และกล้วย เป็นต้น

2.8.2 สารประกอบพวกซัลไฟต์

สารประกอบซัลไฟต์เป็นสารที่รู้จักกันทั่วไป โดยสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผัก และผลไม้ระหว่างขั้นตอนการแปรรูปและการเก็บรักษาได้ เช่น โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO_3) โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) รวมทั้งเกลือในรูปแบบโพแทสเซียมด้วย

โดยนิยมเรียกสารประกอบในกลุ่มนี้ว่า Sulfiting agents ซึ่งสารเหล่านี้สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ทั้งที่เกิดจากเอนไซม์และไม่เอนไซม์ อีกทั้งยังสามารถใช้แทนสาร antioxidant เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งเอนไซม์ PPO และทำปฏิกิริยากับสารตัวกลางได้เป็น quinine-sulfur complex ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้ (Macheix et al., 1990) สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่เอนไซม์ สารประกอบพวกซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับสารตัวกลางที่มีหมู่คาร์บอนิลอิสระหรือสารประกอบคาร์บอนิลอื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถป้องกันไม่ให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้จนกระทั่งเกิดเป็นสีน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซัลไฟด์พบว่า มีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคทำให้เกิดอาการหอบหืด และอาการแพ้ ซึ่งจะรุนแรงในกลุ่มผู้บริโภคที่แพ้สารนี้ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้สารซัลไฟด์ขึ้น ด้วยเหตุนี้สำนักงานอาหาร และยาของสหรัฐอเมริกา (Food and Drug Administration; FDA) จึงได้กำหนดสารตกค้างของซัลไฟด์ในผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ผัก และผลไม้บางอย่างมีซัลไฟด์ตกค้างได้ไม่เกิน 1000 ppm และต้องบอกปริมาณซัลไฟด์บนฉลากอาหาร เมื่อตรวจพบตั้งแต่ 10 ppm (Saper, 1993)

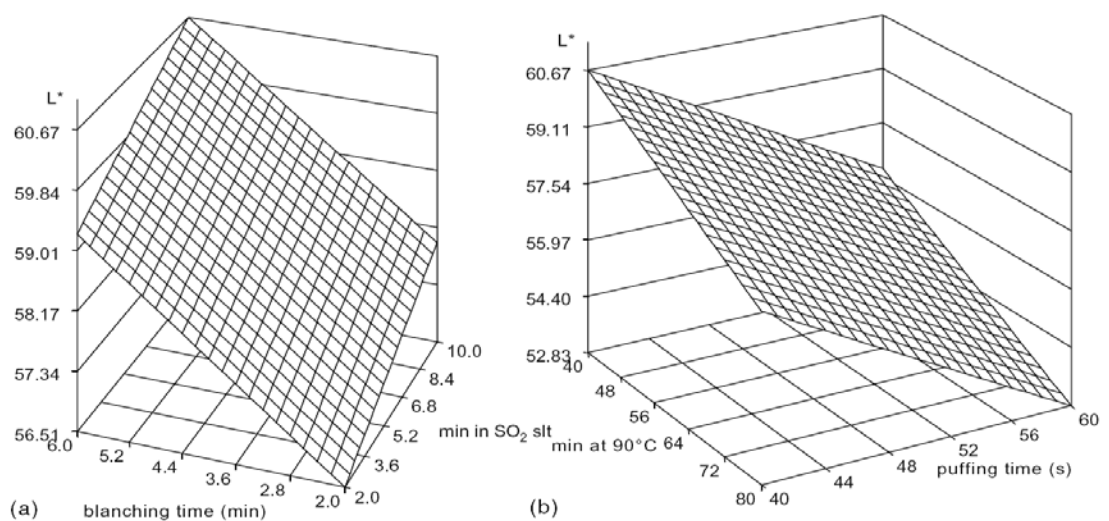
จากผลการศึกษางานวิจัยการใช้กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิก และสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในผัก และผลไม้สามารถสรุปได้ดังนี้ การใช้กรดซิตริกในแอปเปิลและพีชที่ความเข้มข้น 1-6 % w/v โดยแช่เป็นเวลา 2-5 นาที สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ 100% (Lee-kim and Hwang, 1994 และ Wakayama, 1995) รายงานว่าแช่แอปเปิลด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.02-1% w/v เป็นเวลา 5 นาที สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO ได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจากกรดซิตริกไม่ใช่ antioxidant แต่การยับยั้งของกรดซิตริกมีความสัมพันธ์กับโลหะทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็นต่อการทำงานของเอนไซม์ PPO โดยกรดซิตริกสามารถจับโลหะทองแดงได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดซิตริก และชนิดของผักและผลไม้ นอกจากนี้แล้วความแตกต่างในการใช้สารละลายกรดผสมระหว่างกรดซิตริก และแอสคอร์บิก พบว่า การพรีทรีทเมนต์ด้วยกรดดังกล่าว สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ โดยสีที่ได้จะมีความสว่างมากกว่า (Zhu et al., 2007) แต่อย่างไรก็ตามการใช้กรดแอสคอร์บิกสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้เพียงชั่วคราวเท่านั้น (Kopelman et al., 1977) นอกจากนี้การเลือกพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ส่งผลให้กล้วยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลน้อยกว่าการพรีทรีทเมนต์ด้วยกรด (Demiral et al., 2003)

จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้นนั้นเป็นการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เอนไซม์ด้วยการใช้สารละลายชนิดต่างๆ นอกจากนี้แล้วการเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เอนไซม์ สามารถเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ได้ในระหว่างกระบวนการแปรรูป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ มีสาเหตุหลักมาจากผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานานในระหว่างขั้นตอนการ

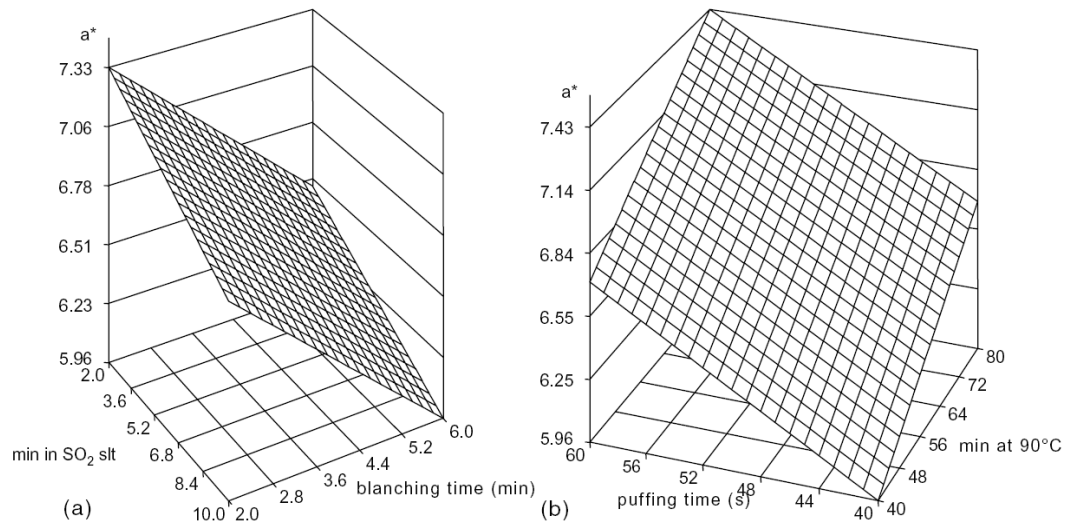
แปรรูป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ได้ โดยเนื้อหาในส่วนต่อไปจะสรุปวิธีการแปรรูปที่มีผลต่อคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

2.8.3 ผลของการพuffingด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาด้านต่อการเปลี่ยนแปลงสี

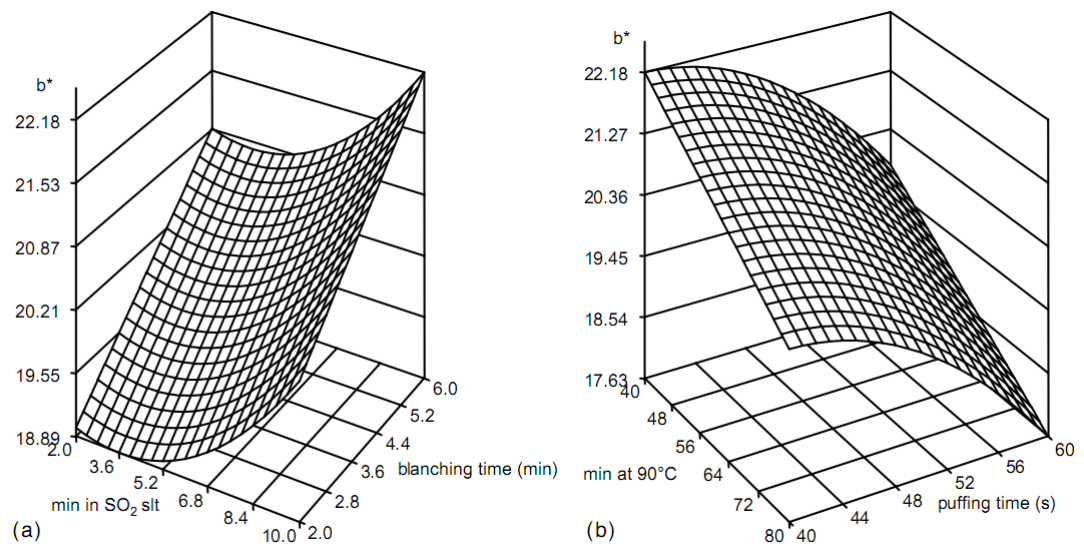
งานวิจัยของ Vanarlis et al. (2004) ศึกษาเวลาในการลวก เวลาในการแช่มนฝรั่งในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ การอบแห้งในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 40 และ 80 นาที จากนั้นนำมาพuffingด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 40 และ 60 วินาที ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมนฝรั่ง โดยแสดงในเทอมของค่า L^* , a^* และ b^* ดังรูปที่ 2.22-2.24 พบว่า การลวกมนฝรั่งเป็นเวลานาน ทำให้มีค่าความสว่างมากขึ้น เนื่องจากการลวกเป็นเวลานาน มีส่วนช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลที่กระตุ้นด้วยเอนไซม์ได้มากกว่า นอกจากนี้การเพิ่มเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ส่งผลให้ค่า (L^*) เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วยยับยั้งการปฏิกิริยาน้ำตาลได้ดีกว่าการลวก ซึ่งพิจารณาได้จากค่า L-value สูงขึ้นเป็น 59-67 เมื่อแช่เป็นเวลานานระหว่าง 2-10 นาที ดังรูปที่ 2.23 (a) และพuffing เป็นเวลานาน ทำให้ค่า (L^*) ลดลง เนื่องจากวัสดุสัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานาน ซึ่งกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่อาศัยเอนไซม์ และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.24-2.25 พบว่า การเพิ่มขึ้นทั้งเวลาในการลวก และเวลาในการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ส่งผลต่อความเป็นสีแดงที่ลดลง และความเป็นสีเหลืองที่เพิ่มขึ้นของมนฝรั่ง ขณะที่อิทธิพลของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C และพuffingเป็นเวลานาน ทำให้มนฝรั่งมีค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น และสีเหลืองลดลง



รูปที่ 2.23 (a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์
(b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C และเวลาในการพuffing ระหว่าง 40-60 วินาที และพuffing อุณหภูมิ 200 °C ที่มีผลต่อค่า L* (Vanarlis et al., 2004)



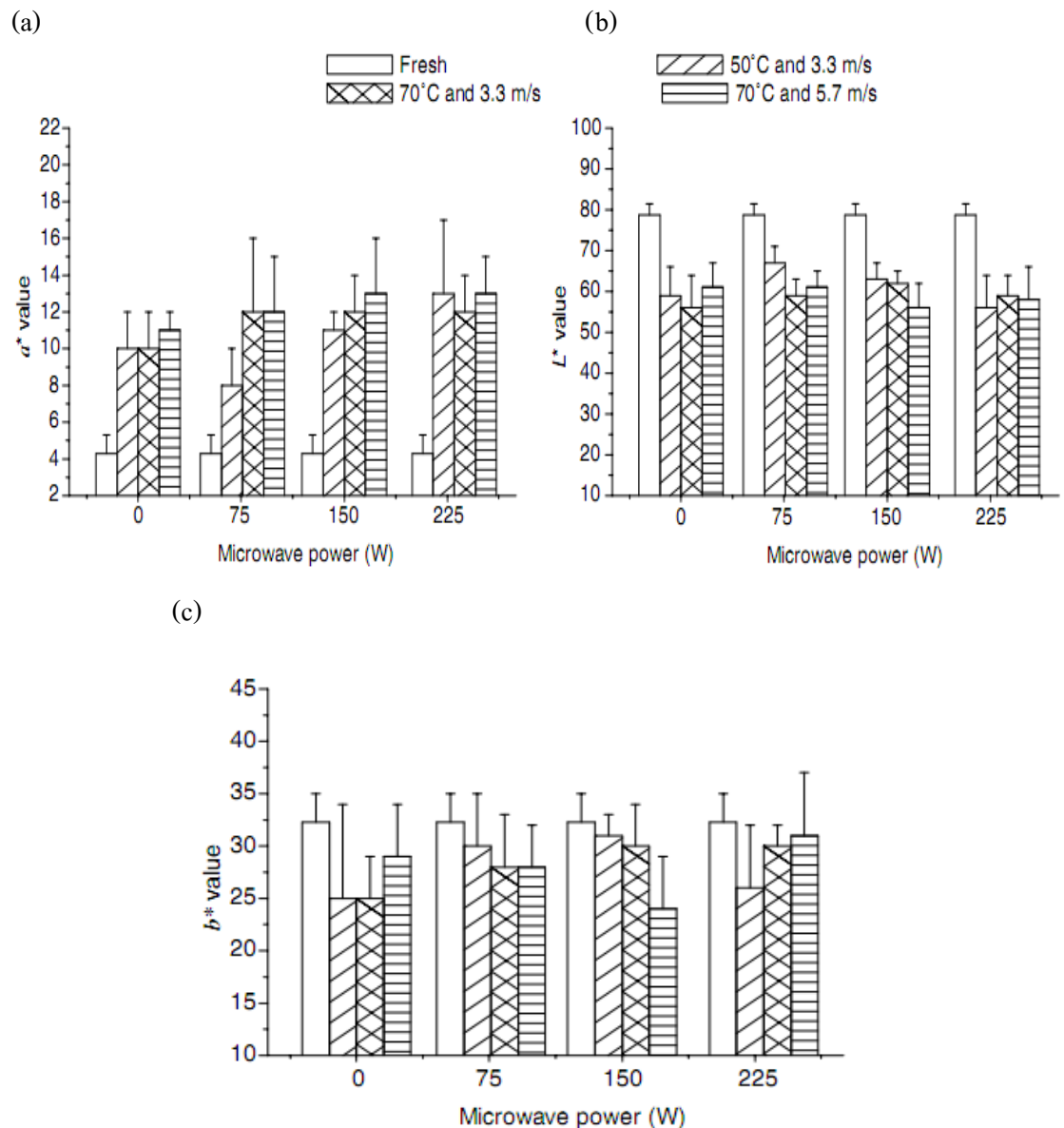
รูปที่ 2.24 (a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์
(b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C และเวลาในการพuffing ระหว่าง 40-60 วินาที และพuffing ด้วยอุณหภูมิ 200°C ที่มีผลต่อค่า a^* (Vanarlis et al., 2004)



รูปที่ 2.25 (a) ปัจจัยของเวลาในการลวกและเวลาในการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์
(b) ปัจจัยของเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90°C และเวลาในการพuffing ระหว่าง 40-60 วินาที และพuffing ด้วยอุณหภูมิ 200°C ที่มีผลต่อค่า b^* (Vanarlis et al., 2004)

2.8.4 ผลของการฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟต่อการเปลี่ยนแปลงสี

Perira et al. (2007) ศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟ ความเร็วลมของอากาศร้อนและอุณหภูมิที่มีต่อคุณภาพของกล้วยแผ่นด้านสี โดยกล้วยจะนำไปอบสโมคประมาณ 55°Brix ฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 40°C กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 1% และกรดแอสคอร์บิก 0.6% จากนั้นนำกล้วยไปเก็บที่อุณหภูมิ 5°C โดยอบแห้งด้วยไมโครเวฟซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงแรกใช้กำลังไฟฟ้า 760 W ความเร็วอากาศ 5.7 m/s เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นช่วงที่สอง ลดกำลังไฟฟ้าลงเหลือ 380 W โดยอุณหภูมิและความเร็วอากาศคือ $50^{\circ}\text{C}/3.3\text{ m/s}$ $70^{\circ}\text{C}/3.3\text{ m/s}$ และ $70^{\circ}\text{C}/5.7\text{ m/s}$ จนกระทั่งได้ความชื้นประมาณ $0.67\text{ kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry matter}}$ และในขั้นตอนสุดท้ายลดความชื้นของตัวอย่างลงให้เหลือ $0.17\text{ kg}_{\text{moisture}}/\text{kg}_{\text{dry matter}}$ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 0, 76, 150 และ 230 W ผลจากการศึกษาคุณภาพด้านสีแสดงดังรูปที่ 2.26a-c พบว่า ผลของกระบวนการส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีอย่างไม่มีนัยสำคัญในเทอมของ L^* a^* และ b^* ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการอบสโมค และการฟัฟฟิงที่อุณหภูมิ 40°C กรดซิตริก และกรดแอสคอร์บิกก่อนนำไปอบแห้งด้วยไมโครเวฟ สามารถช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ นอกจากนี้ผลการศึกษาของ Maskan, (2001) โดยศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟที่ 350-700 W และอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟ 350 W พบว่า วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟ สีของกล้วยที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากล้วยที่ผ่านการฟัฟฟิงไมโครเวฟเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าความสว่าง (L-value) สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟ ทำให้อุณหภูมิของกล้วยแผ่นไม่สูงมากนัก เนื่องจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟเฉพาะช่วงสุดท้ายเท่านั้น ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว มีการเปลี่ยนแปลงสีมากกว่ากล้วยที่ฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟทั้งสองวิธีดังกล่าว เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่ากล้วยที่ฟัฟฟิงด้วยไมโครเวฟทั้งสองวิธี



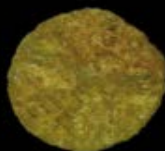
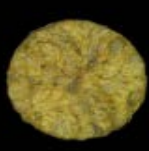
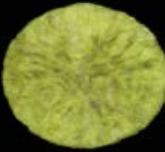
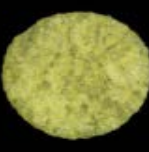
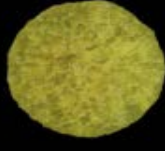
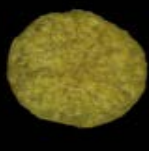
รูปที่ 2.26 อิทธิพลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่เงื่อนไขต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีในทอมของ L^* , a^* และ b^* (Perira et al., 2007)

2.8.5 ผลของการแปรรูปด้วยการทอดต่อการเปลี่ยนแปลงสี

Troncoso et al. (2009) ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพระหว่างการทอดด้วยสุญญากาศ และการทอดที่ความดันบรรยากาศที่มีต่อคุณภาพของมันฝรั่ง จากตารางที่ 2.2 พบว่า มันฝรั่งที่ทอดภายใต้ความดันสุญญากาศมีความสว่างมากกว่า และไม่คล้ำ ขณะที่การทอดภายใต้ความดันบรรยากาศจะเห็นได้ว่าสีที่ได้จะเป็นสีน้ำตาล และการฟritที่หมักด้วยสารละลายซัลไฟด์ก่อนนำไปทอดนั้นสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฟritที่หมัก โดยสีที่ได้มีความสว่างมากกว่า ส่วนความแตกต่างของสายพันธุ์ระหว่าง Panda

และ Desiree พบว่า สายพันธุ์ Panda มีค่าความเป็นสีแดงน้อยกว่า a^* และมีค่าความเป็นสีเหลือง b^* มากกว่ามันฝรั่งสายพันธุ์ Desiree โดยความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณน้ำตาลที่ลดลงระหว่างการทอด โดยสายพันธุ์ Panda มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือหลังจากการทอดน้อยกว่าสายพันธุ์ Desiree คือ 0.03 และ 0.3 kg/100 kg, wet basis ซึ่งปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของมันฝรั่งสายพันธุ์ Panda Desiree และ Desiree คือ 22.54 และ 21.79 kg/100 kg, wet basis ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 รูปถ่ายมันฝรั่งทอดกรอบที่ความแตกต่างของสายพันธุ์และภายใต้การทอดด้วย และกาทอดที่ความดันบรรยากาศ (Troncoso et al., 2009)

Potato Variety	Type of frying	Control	Pre-treatment Blanched and dried	Sulphite
Desiree	Atmospheric			
	Vacuum			
Panda	Atmospheric			
	Vacuum			

เทคนิคกระบวนการแปรรูปแบบต่างๆ นั้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกัน สำหรับการพффิงด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยอากาศร้อน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ที่คล้ำมากขึ้นคือ อุณหภูมิ และเวลาพффิง เนื่องจากผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานานมีส่วนช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ส่วนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟสุญญากาศนั้น สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่คล้ำ เนื่องจากดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ ขณะที่ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดภายใต้ความดันสุญญากาศมีความสว่าง และไม่คล้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทอดภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ สีที่ได้จะเริ่มเป็นสีน้ำตาล นอกจากนี้แล้วการพรีทรีทเมนต์ตัวอย่าง

ด้วยสารละลายซัลไฟต์ก่อนนำไปผ่านกระบวนการ สามารถช่วยยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสี เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้

2.9 ค่าดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index: GI)

ค่าดัชนีไกลซีมิก หรือ GI คือค่าดัชนีที่ใช้ตรวจวัดคุณภาพของอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตหลังจากที่รับประทานเข้าไปในร่างกายและถูกย่อย โดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีความสามารถในการเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากหรือน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานคือ น้ำตาลกลูโคส และขนมปังขาวที่มีค่า GI เท่ากับ 100 โดยอาหารที่มีค่า GI ต่ำจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 55 หรือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมาตรฐานอาหารที่มีค่า GI ปานกลางจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 55–70 และอาหารที่มีค่า GI สูงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตาลในเลือดเท่ากับ 70 หรือมากกว่า (Eliasson, C. A., 2004) จากเกณฑ์ดังกล่าว สามารถประเมินได้ว่าการรับประทานอาหารที่มีค่า GI สูง จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในกระแสเลือดอย่างรวดเร็วและเพิ่มสูงขึ้นมากหลังจากบริโภค ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอินซูลินที่ร่างกายผลิตออกมาเพื่อนำน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือด ในขณะที่รับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำระดับน้ำตาลในกระแสเลือดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่า ซึ่งการควบคุมระดับน้ำตาลในกระแสเลือดสามารถช่วยลดภาวะเสี่ยงต่อโรคร้ายต่างๆ ที่เกิดจากโรคเบาหวาน แต่อย่างไรก็ตามการรับประทานอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงร่วมกับอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลระดับกลางถึงต่ำ มีผลทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลโดยรวมอยู่ในระดับต่ำ เช่นการรับประทานอาหารที่มีส่วนประกอบจำพวกแป้ง (ดัชนีน้ำตาลต่ำ) เนื้อสัตว์(ดัชนีน้ำตาลต่ำ) และผัก (ดัชนีน้ำตาลต่ำ) ทำให้สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในกระแสเลือดได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการวางแผนในการรับประทานอาหารในแต่ละมื้อให้มีความหลากหลาย

ค่า GI สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การย่อยแป้งที่เวลาต่างๆ ซึ่งจำลองวิธีการมาจากการย่อยแป้งในร่างกายมนุษย์ และค่า GI ของอาหาร แต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงการแปรรูปอาหารที่มีความหลากหลาย และอาหารบางประเภทเมื่อแปรรูปแล้วอาจจะยังมีค่า GI ที่สูง ทั้งนี้เนื่องจากส่วนประกอบทั้งปริมาณแป้ง และน้ำตาลของอาหารแต่ละชนิดนั้นต่างกัน สำหรับกล้วยมีรายงานว่าระดับความสุกมีผลต่อค่า GI ซึ่งกล้วยดิบมีค่า GI ประมาณ 30 และขณะที่กล้วยเริ่มสุกจะมีค่าดัชนีน้ำตาลเพิ่มขึ้น จากต่ำเป็นปานกลางโดย GI ในกล้วยสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 60 และเมื่อกล้วยสุกมากๆ จนกระทั่งสุกงอม จะให้ค่า GI มากถึง 82 (Brand-Miller et al., 2001) ทั้งนี้เป็นเพราะใน

กล้วยดิบมีสตาร์ช เป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 80-90 ซึ่งเมื่อกล้วยสุกมากขึ้นสตาร์ชจะเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลอิสระมากขึ้น ทำให้การย่อยและการดูดซึมเกิดขึ้นได้เร็ว

กล้วยดิบมีระดับ Glycemic index ที่ต่ำเป็นผลมาจากมีปริมาณ Resistant starch (RS) ที่สูง ซึ่ง RS มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับใยอาหาร (Dietary fiber) หากบริโภคเป็นประจำจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อโรคต่างๆ ได้ เช่น โรคเบาหวาน โรคอ้วน โรคหัวใจ และโรคมะเร็ง เป็นต้น โดย RS จะไม่เกิดการย่อยในระบบทางเดินอาหารภายในร่างกาย เนื่องจากสตาร์ชชนิดนี้มีความต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก ซึ่งสตาร์ชชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้ในอาหาร เช่น มันฝรั่ง พืชตระกูลถั่ว จากสมบัติดังกล่าว RS จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร โดย RS นี้จะผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่ และถูกหมักโดยจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ ประกอบด้วย อะซิเตท (Acetate) โพรพิโอเนต (Propionate) และ บิวไทเรต (Butyrate) รวมทั้งยังมีแก๊สเกิดขึ้นร่วมด้วย โดยกรดไขมันทั้งสามชนิดจะเกิดขึ้นในสัดส่วนที่ต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของ RS ซึ่งกรดไขมันจะถูกดูดซึมในลำไส้ใหญ่ และยังช่วยให้สุขภาพของลำไส้ใหญ่ดีขึ้น โดยกรดไขมันจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค ปรับสภาวะของความเป็นกรดต่าง (pH) ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง บิวไทเรตที่เกิดขึ้นจะช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ และยับยั้งการเจริญของเซลล์ที่ผิดปกติ (Transformed cell) ในสิ่งมีชีวิตและยังช่วยป้องกันมะเร็งลำไส้ใหญ่ นอกจากนี้ยังช่วยลดคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด เนื่องจากมีปริมาณแคลอรีต่ำ รวมถึงมีผลในการลดค่า GI ของอาหารซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดโรคอ้วน จึงเหมาะสำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน ประโยชน์ของ RS สำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน (Diabetes mellitus) โรคเบาหวาน เกิดจากความผิดปกติของร่างกาย โดยตับอ่อนสร้างฮอร์โมนอินซูลิน (Insulin) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ควบคุมการใช้น้ำตาลให้เปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อใช้ในร่างกายได้น้อยหรือไม่ได้เลย เป็นผลให้ร่างกายไม่สามารถนำน้ำตาลไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูง นอกจากนี้หากปล่อยไว้ในระยะยาว จะมีผลในการทำลายหลอดเลือด และเกิดภาวะแทรกซ้อนต่างๆ ดังนั้นผู้ป่วยโรคเบาหวานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการจำกัดอาหาร หรือเพื่อจำกัดปริมาณน้ำตาลที่จะเข้าสู่ร่างกาย RS จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการพัฒนาเป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน

ตารางที่ 2.3 ค่า GI ของอาหารแต่ละประเภท Adapted from Foster-Powell et al. (2002)

Food	GI	Food	GI
Bread	70	Cookies	55
White bread		Digestive	
Whole-meal bread	69	Breakfast plain biscuit	49
Pumpernickel	41	Dairy foods	
Dark rye	76	Milk, full fat	27
Sourdough	57	Milk, skim	32
Heavy mixed grain	30-45	Ice cream	61
Breakfast cereals		Yogurt, low fat, fruit	33
Cornflakes	84	Fruits	
Rice Bubbles	82	Apple	38
Cheerios	83	Orange	44
Puffed Wheat	74	Peach	42
All Bran	42	Banana	55
Porridge	46	Watermelon	72
Cereal grains		Legumes	
Pearl barley	25	Lentils	28
Buckwheat	54	Soybeans	18
Sweet corn	53	Baked beans (canned)	48
Couscous	65	Pasta	
White rice	64	Fettucine, egg	40
Basmati rice	58	Instant noodles	48
Brown rice	55	Macaroni	47
Parboiled rice	47	Spaghetti	38
Bulgur wheat	48	Soft and sports drinks	
Crackers		Fanta	68
Cream cracker	65	Lucozade	95
Puffed rice cake	78	Coca cola	53
Rye crisp bread	64	Apple juice	40

Adapted from Foster-Powell et al. (2002) A limited number of food products have been selected. Within a same food group, products have been selected to show the diversity of GI the reference food used is glucose (GI = 100)

Tribess et al. (2009) ศึกษาคุณสมบัติของความร้อนและปริมาณ Resistant starch ของกล้วยดิบที่ความแตกต่างของเงื่อนไขการอบแห้ง โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 52 55 และ 58°C ที่ความเร็วลม 0.6 1.0 และ 1.4 m/s แสดงดังตารางที่ 2.4 พบว่า อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 55°C ที่ความเร็วลม 1.4 m/s และความชื้นของตัวอย่างประมาณ 4% w.b. มีผลต่อปริมาณ Resistant starch สูงกว่าเงื่อนไขอื่น ซึ่งมีค่าประมาณ 58.5 ± 5.4 (g/100g d.b.)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณ Moisture, Drying time และ Resistant starch ที่เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ (Tribess et al., 2009)

Drying conditions	Moisture (g/100g w.b.)	Drying time (h)	Resistant starch content (g/100g d.b.)
55°C/1.4 m/s	4.0 ± 0.1^{ab}	5.7	58.5 ± 5.4^a
55°C/1.0 m/s	5.3 ± 0.1^{ab}	5.7	56.0 ± 3.3^a
55°C/0.6 m/s	7.6 ± 0.4^a	6.8	43.8 ± 4.7^b
58°C/0.6 m/s	3.6 ± 0.1^{ab}	5.6	45.3 ± 1.3^b
52°C/0.6 m/s	1.6 ± 0.6^b	6.7	40.9 ± 0.4^b

Agama et al. (2012) ศึกษาการย่อยแป้งและระดับ glycemc index ของคุกกี้โดยใช้แป้งกล้วยดิบด้วยเงื่อนไขสัดส่วนของแป้งกล้วยดิบต่างๆ ได้แก่ 15 30 และ 50 g/100g พบว่า สัดส่วนของแป้งกล้วยดิบสูง ส่งผลต่ออัตราการย่อยได้ช้ากว่า เนื่องจากมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของ Resistant starch ของแป้งกล้วยดิบหรือเทียบได้ว่ามีปริมาณไฟเบอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ย่อยได้ช้ากว่าเงื่อนไขอื่น เมื่อพิจารณาค่า Glycemc index (GI) พบว่า มีระดับ GI ลดลงแปรผันตามสัดส่วนของแป้งกล้วยดิบที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 115.2 106.5 และ 98.6 ด้วยสัดส่วนของแป้งกล้วยดิบที่ 15 30 และ 50 g/100g ตามลำดับ

Goni et al. (1997) ศึกษาการย่อยของขนมขบเคี้ยวและอาหารประเภทต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หา Glycemic index ได้แก่ Cereal: white bread, spaghetti, rice, biscuits และ Legumes: lentils, chick-peas, beans และ Vegetables: peas, boiled potato, crisp potato ผลการศึกษาพบว่า ขนมขบเคี้ยวที่มีระดับ GI ต่ำซึ่งประมาณ 42 และ 46 คือ lentils และ chick-peas และขนมขบเคี้ยวที่มีระดับ GI ปานกลาง-สูง ซึ่งมีค่าประมาณ 60 74 79 78 81 และ 101 ได้แก่ beans, peas, biscuit, spaghetti, และ boiled potato ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้ววิธีการแปรรูปเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ Glycemic index จากผลการศึกษาของ Lin et al. (2012) ทำการแปรรูปมันฝรั่งด้วยวิธีแบบต่างๆ ได้แก่ การหั่นเป็นชิ้น การต้มในน้ำร้อน นำไปอบ การทอดในน้ำมันและการทำอาหารโดยใช้ไมโครเวฟ ซึ่งวิธีการแปรรูปอาหารดังกล่าวใช้เวลาประมาณ 10-60 นาที โดยวิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันมีความสัมพันธ์ต่อระดับการเกิดเจลลิตินในเซชันที่เพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดแป้งเกิดการขยายตัว ดังนั้นเอนไซม์จึงเข้าไปย่อยอาหารได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ระดับ GI เพิ่มขึ้น โดยมันฝรั่งที่ผ่านการแปรรูปด้วยวิธีการดังกล่าวทั้งหมด ส่งผลต่อระดับ GI ที่สูงขึ้น นอกจากสาเหตุดังกล่าวแล้ว การเก็บรักษามันฝรั่งด้วยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 8°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถลดระดับ GI ลงประมาณ 26% เมื่อเปรียบเทียบกับมันฝรั่งที่ผ่านการให้ความร้อนซึ่งมีค่า GI สูงถึง 100

2.10 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติที่นำมาใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งความแตกต่างระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลองคือ วิธีการทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูกหรือใช้การทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนค่าของกระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) เช่น ถ้าเราต้องการทราบว่าต้องใช้ใช้อุณหภูมิ และเวลาในการอบแห้งเท่าไร จึงจะทำให้วัสดุที่ได้มีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และสีที่เหมาะสม ดังนั้นแนวทางที่เรามักใช้กันทั่วไปคือ การลองปรับเปลี่ยนในส่วนของคุณสมบัติที่ใช้ในการอบ ขณะที่ให้เวลาคงที่ เมื่อทดลองจนได้ค่าอุณหภูมิที่เราต้องการแล้วค่อยไปปรับส่วนของเวลา จากนั้นสุดท้ายจึงไปทำการปรับตั้งความเหมาะสมระหว่างอุณหภูมิและเวลา เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ โดยการออกแบบดังกล่าว จะทำให้ได้ผลตอบเข้าสู่จุดหมายที่เราต้องการซ้ำ และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึง

ประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการ และระบบ ซึ่งหลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบการทดลองเป็นดังนี้

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบการทดลองคือ ทำให้การทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองและยังทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบได้
2. การสุ่ม (Randomization) การออกแบบการทดลองควรเรียงลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองได้

ดังนั้นข้อดีของการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ และมีความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยสามารถระบุออกมาเป็นตัวเลขทางสถิติซึ่งแสดงถึงระดับความสำคัญของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองได้อย่างรวดเร็ว และการทดลองส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยปัจจัยหลายตัว ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ กับผลตอบภายใต้ขอบเขตการศึกษาการวางแผนการทดลองจึงนำมาใช้กันมากร่วมกับการทดลอง เช่น การทดลองเชิงแฟกทอเรียล และการทดลองแบบประสมกลาง (Central composite design: CCD) เป็นต้น ซึ่งแสดงรายละเอียดดังนี้

2.10.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)

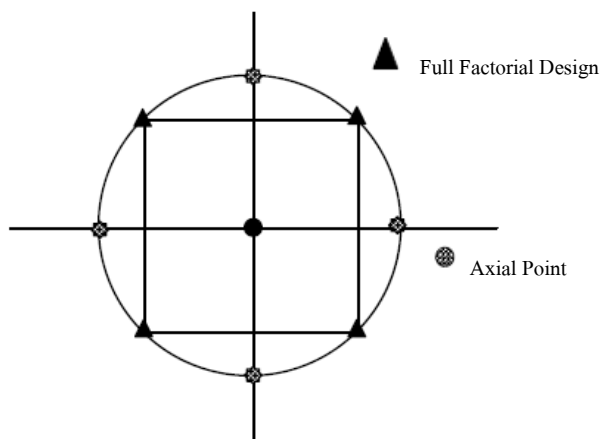
การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ซึ่งสามารถศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการ และยังสามารถวิเคราะห์อิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วย กล่าวคือหากมีผลของปัจจัยร่วมกัน (Interaction) ในหลายๆกระบวนการเกิดขึ้น ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียล อาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วมได้ชัดเจนมากนัก ซึ่งการออกแบบก็ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดปัจจัยที่เราสนใจ เช่น 2 หรือ 3 ปัจจัย โดยการออกแบบดังกล่าวมีความสำคัญต่อการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. การออกแบบ 2^k Factorial Design เป็นการกำหนดปัจจัยเพียง 2 ระดับ ซึ่งจะนำมาใช้สำหรับพิตแบบจำลองพื้นผิวผลตอบสนองลำดับหนึ่งเท่านั้น (First-order Response Surface Model) และยังสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างการทดลองต่อไป

2. การออกแบบ 3^k full factorial เป็นการออกแบบการทดลองที่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และจะต้องวิเคราะห์ผลกระทบต่อดัชนีตอบสนองทุกกรณี 3^k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยเปลี่ยนแปลงได้ 3 ระดับ ซึ่งเราจะต้องทำการทดลอง 3^k โดยที่ k คือจำนวน ปัจจัยหรือ Main effect และข้อดีของ Full factorial design สามารถวิเคราะห์ Main factor และ Interaction ได้ทั้งหมด ส่วนข้อด้อยของ Full factorial design ต้องทำการทดลองให้ครบทุก Run ทำให้ต้องสิ้นเปลืองการทดลอง และใช้เวลามาก เมื่อจำนวน Run มากๆ อาจเกิดปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆ ได้

2.10.2 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัย 3 ระดับ ซึ่งนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ $(-1, 0, +1)$ ซึ่งจะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาบางการทดลองเท่านั้นหรือเลือกบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดยสมการถดถอยที่ทำนายยังคงมีทั้ง Main Effect Interaction และ Quadratic Terms ซึ่งใช้จำนวน การทดลองไม่มากจนเกินไป สำหรับการออกแบบ Central Composite Design เป็นการกระจายระดับ ของข้อมูลออกจากจุดศูนย์กลาง เพื่อศึกษาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด ลักษณะ การวางตำแหน่ง และการกระจายระดับของปัจจัย แสดงดังรูปที่ 2.27 ภายใต้การกำหนด 2 ปัจจัย $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ และแต่ละปัจจัยมี 5 ระดับคือ $(-1.414, -1, 0, 1, 1.414)$ ซึ่งการออกแบบดังกล่าวจะ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ 1) เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง เพื่อใช้สำหรับประมาณสมการถดถอย (First order) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรในเทอมของ linear และ interaction 2) Axial Points จะอยู่นอกจุดของปัจจัยการออกแบบการทดลอง ซึ่งการเพิ่ม จุดแกน เพื่อใช้สำหรับประมาณสมการถดถอยในรูปแบบ Quadratic terms และระยะห่างของจุดแกน พิจารณาจากค่า Alpha (α) เป็นการกำหนดระยะจาก Axial Point ไปยัง Center Point โดยปกติค่า α จะขึ้นอยู่กับบริเวณหรือขอบเขตที่เราสนใจของการทดลอง ซึ่ง α มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง $\sqrt{k}$ (k คือ ปัจจัยที่ต้องการศึกษา) 3) Center Points เป็นการทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง (หรือค่า 0)



รูปที่ 2.27 ลักษณะการออกแบบการทดลอง Central Composite Design (CCD)

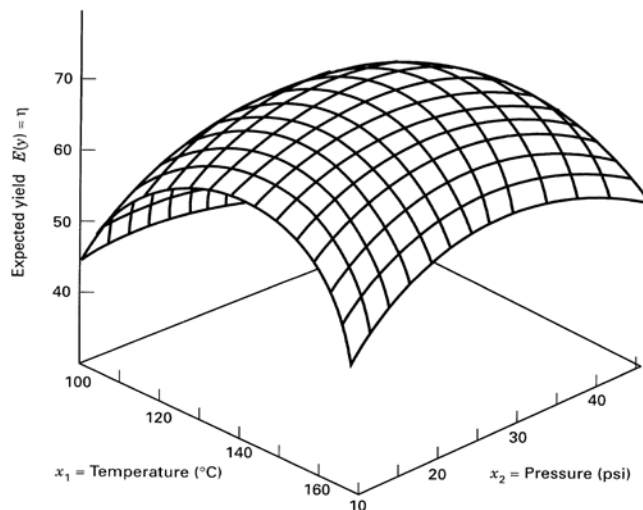
2.11 การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธี Response surface methodology

วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และสถิติ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหา โดยผลตอบที่เราสนใจจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ซึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารในระดับอุตสาหกรรมมีหลากหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัส ความกรอบ สี รสชาติ คุณค่าทางอาหาร เป็นต้น ดังนั้นการหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิต เพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการภายใต้ปัจจัยที่หลากหลายนั้น สามารถทำได้โดยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้หาภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Model) และวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ โดยผลตอบสนองของปัญหามีเป็นความสัมพันธ์หรือเป็นฟังก์ชันของหลายปัจจัย โดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าดีที่สุด การหาสถานะที่เหมาะสมจะประกอบไปด้วยกลุ่มของตัวแปร ซึ่งแสดงสัญลักษณ์ตามหลักคณิตศาสตร์ และสถิติ ซึ่งหลักการทางสถิติ และคณิตศาสตร์จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และตัวแปรอิสระ โดยประกอบขึ้นจากผลตัวแปรอิสระ ซึ่งอาจมีตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร และผลจากการวิเคราะห์ตัวแปรอิสระจากผลการทดลอง จะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปผลตอบสนองของพื้นผิวตอบสนอง โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบกับ y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย x_1 และ x_2 ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2, \dots) \quad (2.1)$$

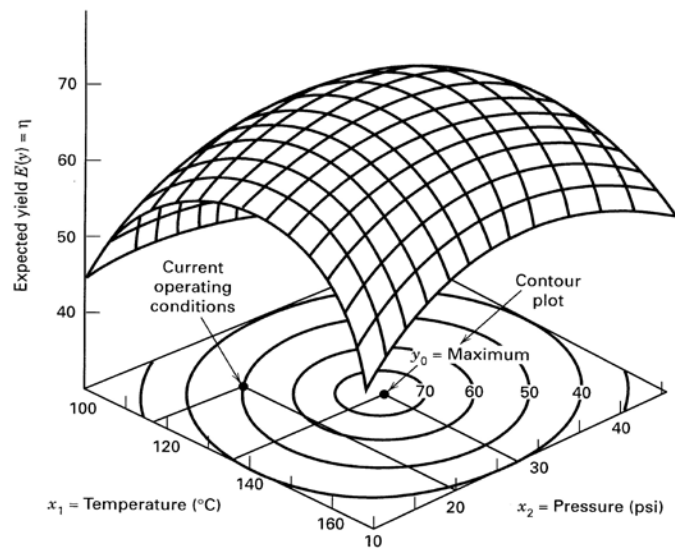
โดยที่	y	คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น
	$f(x_1, x_2)$	คือ ฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ
	n	คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

ถ้ากำหนด $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการพื้นผิวได้คือ $\eta = f(x_1, x_2)$ ซึ่งจะเรียกว่าพื้นผิวดตอบสนอง (Response surface) โดยส่วนใหญ่พื้นผิวดตอบสนองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.28 โดยเป็นการพล็อตระหว่าง η เทียบกับแต่ละระดับของปัจจัย x_1 และ x_2



รูปที่ 2.28 พื้นผิวดตอบสนอง (Montgomery, 2001)

และจะพล็อตเส้นระดับ (Contour) ของพื้นผิวการตอบสนอง ดังรูปที่ 2.29 โดยเส้นระดับที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกพล็อตลงในระนาบ x_1 และ x_2 โดยแต่ละเส้นระดับจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวดตอบสนอง



รูปที่ 2.29 เส้นระดับของพื้นผิวตอบสนอง (Montgomery, 2001)

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนอง เราจะไม่ทราบรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกในการหาพื้นผิวตอบสนอง คือ การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยต่างๆ โดยทั่วไปจะทำการประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการพหุนามกำลังสอง โดยมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.2)$$

โดยที่ y คือ ตัวแปรตาม

$(\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij})$ คือค่าสัมประสิทธิ์คงที่, ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear), ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic) และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (Interaction) ตามลำดับ ขณะที่ X_i และ X_j เป็นตัวแปรอิสระ และ k คือ จำนวนตัวแปร

2.12 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

สำหรับการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยต่างๆ โดยใช้รูปแบบของสมการพหุนามกำลังสองดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจำเป็นต้องตรวจสอบแบบจำลองที่ได้จากสมการว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากน้อยเพียงไร สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ ซึ่งพิจารณาจากค่า P-value โดยมีระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่กำหนดคือ 0.05 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า P-value น้อยกว่า (α) จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่า มีตัวแปรถดถอยอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบแทนแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีความสำคัญต่อการทำนายของค่าผลตอบแทน แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า P-value มากกว่า (α) จะยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่า ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรถดถอยกับผลตอบแทน
2. ทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูลการทดลอง เนื่องจากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเพียงอย่างเดียว ยังสรุปไม่ได้ว่าตัวแบบถดถอยที่ได้นั้นจะมีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองหรือไม่ โดยการทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูลการทดลอง สามารถพิจารณาได้จากค่า P-value โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) คือ 0.05 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า P-value น้อยกว่าค่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ซึ่งแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า P-value มากกว่าหรือเท่ากับ α จะยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

2.13 การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimum condition)

เมื่อทราบสถานะที่เหมาะสมของแต่ละผลตอบแทนจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ดังกล่าวแล้ว จะเห็นได้ว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมประกอบไปด้วยหลายตัวแปร เช่น คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส ด้านการหดรัด และสี ดังนั้นเพื่อทราบสถานะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ภายใต้คุณภาพที่หลากหลาย สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมคือ แต่ละผลตอบแทนจะมีระดับสเกลไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงค่าทุกผลตอบแทนให้มีขนาดของสเกลเท่ากัน ก่อนที่จะนำมารวมกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability value: d_k) โดยระดับความพึงพอใจจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 ถ้าหากระดับความพึงพอใจมีค่าสูง แสดงถึงผลตอบแทนที่ได้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งสามารถกำหนดเป้าหมายความพึงพอใจที่ต้องการได้ 3 รูปแบบ คือ Maximum Minimum และ Target ซึ่งการเลือกใช้งานฟังก์ชันความพึงพอใจขึ้นอยู่กับคุณภาพในแต่ละด้าน เช่นการแปรรูปกล้วยอบกรอบเพื่อให้ได้เนื้อสัมผัสที่แข็งน้อยแต่กรอบมาก ดังนั้นการกำหนดฟังก์ชันความพึงพอใจของค่าความแข็งให้มีค่าต่ำสุด (Minimum) และกำหนดค่าความกรอบ

พิจารณาในเทอมของความชันเริ่มต้นและจำนวนข้อค้ำให้อยู่ในช่วงสูงสุด (Maximum) ฟังก์ชันความพึงพอใจพิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

หากค่าเป้าหมายของผลตอบแทนสูงสุดสามารถหาได้ดังสมการ

$$d_k = \frac{Y_k - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (2.3)$$

หากค่าเป้าหมายของผลตอบแทนต่ำสุดสามารถหาได้ดังสมการ

$$d_k = \frac{Y_{\max} - Y_k}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (2.4)$$

เมื่อ $Y_{\max}$ และ $Y_{\min}$ คือค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของผลตอบแทนตามลำดับ และแต่ละผลตอบแทนสามารถหาความพึงพอใจได้ดังสมการที่ (2.5)

$$d_i = f(y_i)^{w_i} \quad (2.5)$$

เมื่อได้ค่าความพึงพอใจแต่ละคุณภาพแล้ว สามารถนำมารวมกันเพื่อให้เหลือเพียงเป้าหมายเดียวด้วยการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) สำหรับการวัดความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability, D) คือค่า D เป็นค่าของแต่ละผลตอบแทนของ $y(x)$ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดย 1 หมายถึงได้รับความพึงพอใจสูงสุด และ 0 หมายถึงผลตอบแทนไม่ได้รับความพึงพอใจ โดยค่า D สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$D = (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_k^{w_k})^{1/(I_1 + I_2 + \dots + I_k)} \quad (2.6)$$

เมื่อ w_k และ I_k คือค่าน้ำหนักของเป้าหมายของแต่ละผลตอบแทน และค่าความสำคัญระหว่างผลตอบแทนตามลำดับ โดยค่าน้ำหนัก (w) จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันความพึงพอใจ ซึ่งค่าน้ำหนักของแต่ละผลตอบแทนสามารถกำหนดได้โดยมีค่าระหว่าง 0.1-10 หากเลือกพิจารณา w ให้มีค่าเท่ากับ 10 แสดงว่าให้ความสำคัญต่อค่าเป้าหมายมาก ดังนั้นค่าผลตอบแทนที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากเช่นกัน และส่งผลต่อระดับความพึงพอใจสูง ขณะเดียวกันหากเลือก w มีค่าเท่ากับ 0.1 แสดงว่าให้ความสำคัญต่อค่าเป้าหมายน้อย ดังนั้นค่าผลตอบแทนอาจจะห่างจากค่าเป้าหมายมาก แต่ก็สามารถยอมรับผลตอบแทนนี้ได้ ซึ่งให้ผลต่อระดับความพึงพอใจสูงเช่นกัน สำหรับค่าความสำคัญ I แสดงถึงความสำคัญระหว่างผลตอบแทน โดยมีค่าระหว่าง 0.1-10 หากให้ความสำคัญกับผลตอบแทนน้อยแสดงถึงให้ความสำคัญกับผลตอบแทนนั้นน้อย หากให้ความสำคัญกับผลตอบแทนมากแสดงถึงให้ความสำคัญกับผลตอบแทนนั้นมาก

2.14 สรุปผลการค้นคว้างานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า การแปรรูปขนมขบเคี้ยวมีด้วยกันหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคต่างก็ต้องการความกรอบของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว เทคนิคการแปรรูปเพื่อพัฒนาเนื้อสัมผัสดังกล่าวมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การพuffing ด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศ และการทอดด้วยสุญญากาศ เป็นต้น สำหรับเทคนิคการพuffing ด้วยอุณหภูมิสูงระยะเวลาสั้นด้วยลมร้อน อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนพuffing อุณหภูมิและเวลาพuffing มีผลโดยตรงต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยการพuffing ด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานภายใต้ระดับความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้เนื้อสัมผัสที่ได้มีความกรอบเพิ่มขึ้น แต่สีของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคล้ำ เนื่องจากอุณหภูมิสูงสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ระหว่างพuffing ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ได้ง่าย ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟสุญญากาศ ปัจจัยหลักของกระบวนการคือ ระดับกำลังไมโครเวฟ และระดับสุญญากาศ อีกทั้งปัจจัยของความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ และเวลาพuffing หากพuffing ที่ระดับความชื้นที่เหมาะสมด้วยเวลานานไม่เกิน 100 วินาที ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนตัวสูง ดังนั้นเนื้อสัมผัสที่ได้จึงมีความกรอบเพิ่มขึ้น อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีสีคล้ำ เนื่องจากพuffing ที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งอุณหภูมิจะไม่สูงเพียงพอที่จะกระตุ้นปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ได้ ส่วนเทคนิคการทอดด้วยสุญญากาศ ซึ่งใช้เวลาในการทอดนานขึ้น จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนตัวมากขึ้น แต่การทอดเป็นเวลานาน ส่งผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เหลือน้อย และเมื่อตัวอย่างเย็นตัวลง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่าง และอุณหภูมิแวดล้อม ทำให้ตัวอย่างมีความแข็งมากขึ้น และสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสว่าง และไม่คล้ำ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีระยะเวลาการเก็บรักษาหลังการแปรรูปสั้น เนื่องจากมีกลิ่นหืนจากน้ำมัน ซึ่งอาจไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีของขนมขบเคี้ยวที่ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งต้องควบคุมระหว่างกระบวนการแปรรูปควบคู่ไปกับลักษณะความกรอบ เพื่อให้เป็นที่ยอมรับผู้บริโภคด้วยการควบคุมการเปลี่ยนแปลงสีระหว่างการแปรรูป สามารถทำได้โดยการฟrit ที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ด้วยกรดหรือสารละลายก่อนนำไปแปรรูป เพื่อลดกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสให้อยู่ในระดับ pH ที่เหมาะสมซึ่งไม่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ ดังนั้นการแปรรูปผลิตภัณฑ์อบกรอบด้วยวิธีต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพด้านต่างๆ ไปพร้อมกัน เช่น สี เนื้อสัมผัส และการหดรัด เป็นต้น ซึ่งเพื่อให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของกล้วย จึงนำเทคนิค Response Surface Methodology เพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสม