บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๋วยเตี๋ยว (ตารางที่ 4.1, ภาคผนวก ค.1) พบว่า แป้งข้าวเจ้ามีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงที่สุด แป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และมีปริมาณความชื้นและไขมันใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังที่เป็นแป้งธรรมชาติแต่ปริมาณโปรตีนต่ำกว่า เนื่องจากโปรตีนบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการผลิตแป้ง จากการวัดปริมาณอะไมโลสพบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ใช้มีปริมาณอะไมโลสสูงถึง 34.08% ซึ่งจัดเป็นแป้งอะไมโลสสูงเมื่อใช้การแบ่งกลุ่มข้าวโดยใช้ปริมาณอะไมโลสตาม International Rice Research Institute (IRRI) ปี 1972 คือ สูงกว่า 27 % (Kongseree and Juliano,1972) ซึ่งปริมาณอะไมโลสที่วัดได้สูงกว่าแป้งข้าวเจ้าที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดในประเทศไทยที่อรวรรณ เคหสุขเจริญ (2529) ได้รายงานไว้คือ 16.5–20.7% ต่อมากมลทิพย์ มั่นภักดี (2542) ได้วัดปริมาณอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าที่ซื้อจากท้องตลาดเช่นกันพบว่า มีปริมาณอะไมโลสสูงถึง 34.66% ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งข้าวเจ้าได้จากการโม่ปลายข้าวหรือข้าวสารหัก ซึ่งจะรวมพันธุ์ข้าวต่างๆไว้ด้วยกันตั้งแต่พันธุ์ข้าวอะไมโลสต่ำจนถึงอะไมโลสสูง (เสนอ ร่วมจิตร, 2522; งามชื่น คงเสรี, 2541) จึงมีความเป็นไปได้ว่าแป้งข้าวเจ้าที่นำมาใช้มีส่วนผสมของปลายข้าวพันธุ์อะไมโลสสูงมาก ส่วนแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วง 25.84–33.84% ซึ่งสูงกว่าที่อรวรรณ เคหสุขเจริญ (2529) และกล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2543) รายงานไว้คือ 24.0–26.3% และ 18-23% ตามลำดับ แต่พิมพ์เพ็ญ ถิรพร (2533) และ Atichokudomchai, Varavinit และ Chinachoti (2003) ได้วัดปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังและพบว่ามีค่าสูงถึง 30.8% และ 33.4% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากพันธุ์ แหล่งที่มา และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดย Aryee และคณะ (2005) ได้วัดปริมาณอะไมโลสของแป้งมันสำปะหลังจำนวน 31 พันธุ์ พบว่ามีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันตั้งแต่ 10.9–44.3% นอกจากนี้ Fredriksson และคณะ (1997) ยังพบว่าสายอะไมโลเพกตินของแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นสายยาวจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีนได้ ทำให้ปริมาณอะไมโลสที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่ได้หลังผ่าน

กระบวนการแปรรูป คือ ปริมาณโปรตีนมีผลต่อระยะเวลาการแปรรูปและความแข็งกระด้างของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากโปรตีนมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น การพองตัวของเม็ดแป้งจึงลดลง เวลาที่ใช้ในการแปรรูปจึงเพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความร่วนแข็งมากขึ้น (Julaino, Onate, and del Mundo, 1965; เสนอ ร่วมจิตร, 2522) ปริมาณอะไมโลสมีผลต่อความเหนียวและความคงตัวของเส้นก๋วยเตี๋ยวเมื่อผ่านการลวก ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533) โดยปริมาณอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าที่นำมาผลิตก๋วยเตี๋ยวควรอยู่ในช่วง 27-33% ถ้าปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า 20% ก๋วยเตี๋ยวหลังนึ่งสุกจะขาดยุ่ย ไม่สามารถลอกเป็นแผ่นได้ แต่ถ้าสูงกว่า 33% ก๋วยเตี๋ยวที่ได้จะมีเนื้อสัมผัสที่กระด้าง (เสนอ ร่วมจิตร, 2522; งามชื่น คงเสรี, 2541) ซึ่งถ้าอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าที่นำมาใช้สูงเกินไปอาจแก้ไขได้โดยการผสมแป้งมันสำปะหลังลงในสูตร หรือลดความเข้มข้นของน้ำแป้งลง (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533; วิภา สุโรจนะเมธากุล, 2541)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแป้ง

วัตถุดิบ	ปริมาณความชื้น (% wet basis)	ปริมาณโปรตีน (% dry basis)	ปริมาณไขมัน (%dry basis)	ปริมาณอะไมโลส (%dry basis)
แป้งข้าวเจ้า	11.97^{a}±0.20	6.74^{c}±0.02	0.35^{c}±0.08	34.08^{d}±0.18
แป้งมันสำปะหลัง	12.01^{a}±0.05	0.16^{b}±0.02	0.14^{b}±0.04	33.84^{d}±0.63
แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: National 7® (Mna)	12.56^{b}±0.19	0.07^{a}±0.00	0.08^{ab}±0.02	29.83^{b}±0.32
แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: National Frigex® (Mnaf)	12.31^{ab}±0.23	0.08^{a}±0.01	0.05^{a}±.0.02	25.84^{a}±0.18
แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Purity 90® (Mpu)	12.62^{b}±0.44	0.07^{a}±0.00	0.07^{ab}±0.02	32.20^{c}±0.54

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

4.2.1 สมบัติทางด้านความหนืด

จากการวัดสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งเดี่ยวทั้ง 5 ชนิดด้วยเครื่อง Rapid-Visco Analyser (RVA) (ตารางที่ 4.2, ภาคผนวก ค.2) พบว่าแป้งข้าวเจ้ามีค่า peak viscosity และ breakdown (peak viscosity - trough viscosity) ต่ำที่สุด แต่ pasting temperature สูงที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลสเป็นองค์ประกอบสูง ทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างแป้งอื่นๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้เม็ดแป้งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) และความคงทนต่อแรงเฉือนของเม็ดแป้งจึงสูงกว่าแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ (ค่า breakdown ต่ำ) (Visser *et al.*, 1997) นอกจากนี้แป้งข้าวเจ้ายังมีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบสูงกว่าแป้งอื่นๆ ซึ่งพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น (Hamaker, Griffin, and Moldenhauer, 1991; Hamaker and Griffin, 1993; Lim *et al.*, 1999) ส่วนไขมันสามารถสร้างพันธะกับอะไมโลสเป็น amylose-lipid complex เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น เม็ดแป้งจึงพองตัวได้ช้าลง (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) เมื่อพิจารณาการเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของแป้งเนื่องจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแป้งหลังจากน้ำแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนเย็นตัวลง ซึ่งโดยทั่วไปการหาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งที่มีค่า peak viscosity ต่างกันจะพิจารณาจากค่า setback เทียบกับค่า trough viscosity (setback/trough viscosity) โดยแป้งที่มีค่า setback/trough viscosity สูง แสดงว่ามีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันสูง พบว่า แป้งข้าวเจ้ามีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงที่สุด รองลงมาคือ แป้ง Mnaf แป้งมันสำปะหลัง แป้ง Mpu และ Mna ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Haasse, Mintus และ Weipert (1995) พบว่าการประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยการวัดด้วย RVA เป็นเพียงการประเมินคร่าวๆ เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งต้องใช้เวลานาน ซึ่งการวัดด้วย RVA ใช้เวลาสั้นเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องวัดอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ร่วมด้วยซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.2 และมีการศึกษาพบว่าสมบัติด้านความหนืดของแป้งสามารถคาดคะเนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวได้ โดย Batey และคณะ (1997) พบว่าคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่า peak viscosity และ breakdown แต่มีความสัมพันธ์ทางลบกับค่า setback ซึ่ง Bhattacharya และคณะ (1999) ได้อธิบายว่าเนื่องจากค่า peak viscosity, breakdown และ setback มีความสัมพันธ์โดยตรงกับเนื้อสัมผัสด้านความยืดหยุ่นและความแข็งของก๋วยเตี๋ยวนั่นเอง นอกจากนี้พิมพ์เพ็ญ ถิรพร (2533) ยังพบว่า แป้งข้าวเจ้าซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตก๋วยเตี๋ยวแป้งที่มีค่า breakdown

และ peak viscosity ต่ำ และ setback สูงมาก มีผลให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีความแห้ง กระด้าง และมีสีขาวขุ่นเกินไป จึงต้องใช้แป้งมันสำปะหลังและ/หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพื่อปรับปรุงคุณภาพของก๋วยเตี๋ยว ซึ่งจากการวิเคราะห์สมบัติของแป้งผสมพบว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังและ/หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสามชนิดมีผลให้ค่า breakdown ลดลง และ peak viscosity เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติม ยกเว้นการผสมแป้ง Mna ที่ 30% มีผลให้ค่า peak viscosity ลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าล้วน ส่วนการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งโดยพิจารณาจากค่า setback/trough viscosity พบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังและ/หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้แป้งผสมมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าล้วน การผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้แป้งผสมมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันลดลงเมื่อเทียบกับไม่เติม (R+T) และเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น แป้งผสมจะมีการอัตราเกิดรีโทรเกรเดชันลดลง ซึ่งจากสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งผสมที่วัดได้จะเห็นว่าสมบัติทางความหนืดของแป้งผสมบางตัวที่วัดได้ไม่เป็นสัดส่วนกับแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสมกัน ซึ่ง Obanni และ BeMiller (1997) ได้อธิบายว่าอาจเกิดเนื่องจากการผสมแป้งต่างชนิดกันมีผลให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งเปลี่ยนแปลงไป สมบัติด้านต่างๆของแป้งจึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยอาจแตกต่างจากวัตถุดิบเริ่มต้นโดยสิ้นเชิง อย่างไรก็ตามจากสมบัติด้านความหนืดสามารถคาดคะเนได้ว่าการผสมแป้งมันสำปะหลังและ/หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรน่าจะช่วยให้ก๋วยเตี๋ยวมีความเหนียวนุ่มมากขึ้น นอกจากนี้แป้งผสมยังมีผลให้ค่า pasting temperature ต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้าล้วน ดังนั้นเมื่อนำไปผลิตก๋วยเตี๋ยวจะทำให้ก๋วยเตี๋ยวสุกเร็วขึ้น (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางด้านความหนืดของแป้งที่ความเข้มข้น 9%w/w เมื่อวัดด้วยเครื่อง Rapid-Visco Analyser (RVA)

วัตถุดิบ	Peak Viscosity (RVU)	Trough Viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Setback / Trough Viscosity	Pasting Temperature (^{o}C)
แป้งข้าวเจ้า (R)	170.33^{ab}±0.75	137.05^{c}±2.13	33.30^{d}±1.38	286.54^{f}±2.21	149.50^{e}±4.33	1.09^{i}±0.05	90.13^{i}±0.38
แป้งมันสำปะหลัง (T)	288.67^{h}±0.16	130.75^{b}±0.58	157.92^{h}±0.75	218.21^{c}±2.96	87.46^{c}±3.54	0.67^{f}±0.30	80.60^{g}±0.00
แป้งดัดแปร: National7®(Mna)	266.92^{g}±1.75	125.73^{a}±0.38	141.55^{f}±1.38	192.84^{a} ±2.59	67.46^{ab}±2.96	0.54^{bc}±0.03	68.33^{b}±0.43
แป้งดัดแปร: National Frigex® (Mnaf)	400.00^{i} ±1.92	313.21^{i}±4.29	86.80^{e}±2.37	540.25^{i}±7.83	227.04^{d}±3.54	0.72^{g}±0.00	65.31^{a}±0.24
แป้งดัดแปร: Purity 90® (Mpu)	268.96^{g}±3.12	122.50^{a}±0.50	146.46^{g}±2.63	195.96^{a}±0.79	73.46^{b}±0.29	0.60^{de}±0.00	70.70^{c}±0.40
R+T (4:1)	179.70^{e}±0.87	153.08^{f}±0.30	26.61^{c}±0.78	305.36^{g}±4.37	152.28^{e}±4.51	0.99^{i}±0.03	84.50^{h}±1.82
R+T+Mna(15%)	174.67^{cd}±1.64	149.22^{e}±1.71	25.45^{c}±0.21	235.58^{d}±2.17	86.36^{c}±0.48	0.58^{cd}±0.00	78.53^{f}±0.54
R+T+Mna(30%)	168.56^{a}±1.17	143.17^{d}±2.05	25.39^{c}±1.07	205.25^{b}±0.52	62.08^{a}±2.48	0.43^{a}±0.02	71.90^{d}±0.05
R+T+Mnaf(15%)	181.72^{e}±0.37	160.11^{g}±1.32	21.61^{b}±0.97	319.14^{h}±3.19	159.03^{f}±4.43	0.99^{i}±0.04	81.43^{g}±0.38

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางด้านความหนืดของแป้งที่ความเข้มข้น 9%w/w เมื่อวัดด้วยเครื่อง Rapid-Visco Analyser (RVA) (ต่อ)

วัตถุดิบ	Peak Viscosity (RVU)	Trough Viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Setback / Trough Viscosity	Pasting Temperature (^{o}C)
R+T+Mnaf(30%)	186.06^{i}±0.77	167.81^{h}±0.86	18.25^{a}±0.08	322.17^{h}±2.16	154.36^{ef}±2.42	0.92^{h}±0.02	80.47^{g}±0.49
R+T+Mpu(15%)	176.39^{d}±1.00	149.06^{e}±0.47	27.33^{c}±1.48	244.19^{e}±2.07	95.14^{d}±2.46	0.64^{ef}±0.02	78.67^{i}±0.46
R+T+Mpu(30%)	172.80^{bc}±2.59	141.55^{d}±3.11	31.25^{d}±4.39	215.06^{c}±3.83	73.50^{b}±6.58	0.52^{b}±0.06	74.28^{e}±0.80

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 **สมบัติด้านความร้อน**

จากการศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งวัตถุดิบเดี่ยวทั้ง 5 ชนิดด้วยเครื่อง DSC (ตารางที่ 4.3, ภาคผนวก ค.3) พบว่า แป้งวัตถุดิบแต่ละชนิดมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจล (onset temperature, T_0) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจล (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจล (final temperature, T_f) และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจล (enthalpy of gelatinization, ΔH_{gel}) แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ซึ่งอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะแตกต่างกันตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกติน (กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) จากการทดลองพบว่า แป้งข้าวเจ้ามี T_0, T_p และT_f สูงที่สุด ส่วนแป้ง Mnaf มี T_0, T_p และ T_f ต่ำที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลส ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันสูง ส่วนแป้ง Mnaf มีปริมาณอะไมโลส ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hamaker และคณะ (1991) Fredriksson และคณะ (1997) และกล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2543) ที่พบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อแป้งมีปริมาณอะไมโลส โปรตีน และไขมันสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่า ΔH_{gel} พบว่าค่า ΔH_{gel} ไม่ขึ้นกับปริมาณอะไมโลส ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Visser และคณะ (1997) ที่กล่าวว่าค่า ΔH_{gel} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะไมโลสในแป้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอะไมโลสมีผลให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงขึ้น จึงต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้เกิดเจล ค่าΔH_{gel} จึงสูงขึ้น แต่ Gudmundsson และ Eliasson (1992) Yasui และคณะ (1996) Fujita และคณะ (1998) Jane และคณะ (1999) และ Kohyama และ Sasaki (2006) รายงานผลการทดลองที่สอดคล้องกันว่า waxy starch มีค่า ΔH_{gel} สูงกว่า normal starch ซึ่ง Sasaki, Yasui และ Matsuki (2000) ได้อธิบายว่าค่า ΔH_{gel} อาจมีความสัมพันธ์กับปริมาณของส่วนผลึกของอะไมโลเพกตินด้วย เนื่องจาก ΔH_{gel} คือพลังงานที่ใช้ในการละลายโครงสร้างผลึกในการเกิดเจล ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการละลายโครงสร้างผลึกส่วนที่เป็นอะไมโลเพกตินสูงกว่าอะไมโลส ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ค่า ΔH_{gel} ของแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงมีค่าสูงกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เมื่อพิจารณาสมบัติของแป้งผสมพบว่าค่า T_o ของแป้งผสมขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนของแป้งที่นำมาผสมกัน แต่ค่า T_p, T_f และ ΔH_{gel} ของแป้งผสมที่ได้แตกต่างจากแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสม โดยค่า T_p และ T_f ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น ส่วนค่า ΔH_{gel} มีค่าต่ำกว่าวัตถุดิบเริ่มต้น ซึ่ง Obanni และ BeMiller (1997) และ Ortega-Ojeda และ Eliasson (2001) ได้ศึกษาการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งผสมโดยใช้ DSC พบว่า สมบัติของแป้งผสมที่วัดได้ทั้งค่า T_o, T_p, T_f และ ΔH_{gel} ไม่ขึ้นกับชนิดและสัดส่วนของแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสมกัน แป้งผสมที่ได้อาจมีค่า T_o, T_p, T_f

I 27609108

และ ΔH_{gel} สูงหรือต่ำกว่าแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสมกัน ซึ่งสาเหตุนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดแต่อาจเกิดเนื่องจากการผสมแป้งหลายชนิดมีผลให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลที่วัดได้จาก DSC (T_o) กับ RVA (pasting temperature) พบว่าค่า T_o จะมีค่าต่ำกว่า pasting temperature เนื่องจากค่า pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่แป้งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งความหนืดจะเกิดเมื่อเม็ดแป้งเริ่มดูดน้ำและพองตัวได้ระดับหนึ่ง ในขณะที่ T_o วัดจากค่า heat flux นั่นคือ เมื่อแป้งเริ่มเกิดเจลต้องมีการดูดความร้อนเข้าไปในระบบโดยความหนืดอาจยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ค่า T_o ต่ำกว่า pasting temperature (Jane *et al.*, 1999)

เมื่อนำแป้งที่ผ่านเจลาติไนเซชันแล้วไปบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน และนำมาตรวจสอบด้วย DSC เช่นเดิม จะเกิด peak ของ regelatinization ขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลของแป้งจัดเรียงตัวกันใหม่เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้นเพื่อเข้าสู่โครงสร้างที่เป็นผลึก โดยค่าพลังงานในการ regelatinization (ΔH_R) ของ peak แสดงการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง (Atwell *et al.*, 1988) จากตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ค.3) %การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งวัตถุดิบเดี่ยวทั้ง 5 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยแป้งข้าวเจ้ามี %การเกิดรีโทรเกรเดชันสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Miles, Morris และ Ring (1985) ที่พบว่าแป้งที่มีอะไมโลสสูงจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันสูง รองลงมาคือแป้งมันสำปะหลัง แป้ง Mpu, Mnaf และ Mna ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า T_o, T_p, T_f และ ΔH_R ของแป้งผสมพบว่า ไม่ขึ้นกับชนิดและสัดส่วนของแป้งเริ่มต้นที่นำมาผสมกัน เช่นเดียวกับการเกิดเจลาติไนเซชันในตาราง 4.3 แต่การผสมแป้งมันสำปะหลังและ/หรือการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้ %การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าล้วน และเมื่อเปรียบเทียบ %การเกิดรีโทรเกรเดชันที่วัดได้จาก DSC กับค่า setback/trough viscosity ซึ่งแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของสายอะไมโลสหลังจากน้ำแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนเย็นตัวลงโดยใช้ RVA (ตารางที่ 4.2) พบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นแป้งบางตัว เช่น Mnaf ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการการดัดแปรทางเคมีของแป้ง และอาจเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งต้องใช้เวลานานมากการวิเคราะห์ด้วย RVA ซึ่งใช้เวลาสั้นมากจึงอาจไม่เพียงพอที่จะแสดงผลการเกิดรีโทรเกรเดชัน ผลการวัดที่ได้จึงอาจคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดจากที่ควรเป็น (Haasse *et al.*, 1995) นอกจากนี้ยังพบว่า T_o ในการเกิด regelatinization ของเจลที่เกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชันในครั้งแรก แสดงว่าการเรียงตัวของโครงสร้างของสายโมเลกุลของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันไม่หนาแน่นและแข็งแรงเท่าการเรียงตัวของโครงสร้างเดิมของสตาร์ช (White and Abbas, 1989; Yaun, Thompson, and Boyer, 1993) ซึ่งอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของ

แป้งจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติด้านความคงทนต่อการแซ่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้ง และจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเมื่อนำไปแซ่เยือกแข็งและละลายน้ำแข็งดังที่จะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านความร้อนของแป้งที่ความเข้มข้น 35%w/w เมื่อวัดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

วัตถุดิบ	T_o (°C)	T_p(°C)	T_f(°C)	ΔH_{gel} (J/g)
แป้งข้าวเจ้า (R)	69.73^{g}±0.21	76.78^{e}±0.13	86.74^{d}±0.56	11.49^{b}±0.86
แป้งมันสำปะหลัง (T)	64.13^{e}±0.17	70.20^{d}±0.70	84.44^{c}±1.00	14.35^{c}±0.45
แป้งดัดแปร: National 7® (Mna)	58.18^{c}±0.04	64.00^{b}±0.35	80.69^{b}±0.66	15.04^{c}±1.54
แป้งดัดแปร: National Frigex® (Mnaf)	52.25^{a}±0.07	58.54^{a}±0.45	74.97^{a}±2.15	12.01^{b}±1.01
แป้งดัดแปร: Purity 90® (Mpu)	60.48^{d}±0.45	67.13^{c}±0.29	81.43^{b}±0.35	17.40^{d}±1.37
R+T (4 : 1)	66.54^{f}±0.20	80.40^{f}±0.11	89.65^{e}±0.13	10.82^{ab}± 0.09
R+T+Mna(15%)	64.62^{e}±0.08	80.95^{fgh}±0.02	90.71^{e}±0.54	11.08^{ab}±0.24
R+T+Mna(30%)	64.17^{e}±0.45	81.16^{h}±0.41	90.72^{e}±0.79	11.07^{ab}±0.84
R+T+Mnaf(15%)	56.72^{b}±0.25	80.87^{fgh}±0.20	89.75^{e}±0.72	10.59^{ab}±0.35
R+T+Mnaf(30%)	56.42^{b}±0.25	81.10^{gh}±0.58	89.39^{e}±1.46	9.31^{a}±1.80
R+T+Mpu(15%)	66.16^{f}±0.03	80.44^{f}±0.10	89.82^{e}±0.47	10.63^{ab}±0.35
R+T+Mpu(30%)	66.06^{f}±0.30	80.50^{fg}±0.19	89.81^{e}±0.67	10.79^{ab}±0.24

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.4 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งวัตถุดิบ (%) เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน และวัดด้วย DSC

วัตถุดิบ	T_o (°C)	T_p(°C)	T_f(°C)	ΔH_R (J/g)	%การเกิดรีโทรเกรเดชัน
แป้งข้าวเจ้า (R)	42.95^{a}±0.52	53.15^{a}±0.63	64.29^{c}±0.35	4.86^{e}±0.04	42.44^{ef}±2.44
แป้งมันสำปะหลัง (T)	44.12^{a}±0.45	53.60^{a}±0.10	63.20^{b}±0.10	3.92^{cd}±0.83	27.19^{c}±2.25
แป้งดัดแปร: National 7® (Mna)	46.90^{b}±1.42	54.94^{b}±0.39	61.57^{a}±0.43	1.52^{a}±0.16	10.18^{a}±0.44
แป้งดัดแปร: National Frigex® (Mnaf)	47.15^{b}±0.60	55.18^{b}±0.52	62.55^{b}±0.61	1.55^{a}±0.25	13.02^{ab}±1.88
แป้งดัดแปร: Purity 90® (Mpu)	58.73^{d}±1.16	76.72^{g}±0.19	86.87^{e}±0.87	2.61^{b}±0.11	15.09^{b}±0.82
R+T (4 : 1)	47.60^{b}±0.78	58.99^{c}±0.19	70.87^{d}±0.32	4.02^{d}±0.40	37.16^{de}±3.98
R+T+Mna(15%)	48.99^{c}±0.25	59.04^{cd}±0.10	70.70^{d}±0.34	3.76^{cd}±0.30	34.01^{de}±3.25
R+T+Mna(30%)	48.99^{c}±0.67	59.14^{cde}±0.10	70.42^{d}±0.98	3.68^{cd}±0.41	33.22^{d}±1.77
R+T+Mnaf(15%)	49.14^{c}±0.34	59.35^{cdef}±0.20	70.25^{d}±0.43	4.01^{d}±0.48	37.86^{de}±3.38
R+T+Mnaf(30%)	49.62^{c}±0.31	59.57^{def}±0.00	70.43^{d}±0.28	3.34^{c}±0.07	36.79^{de}±3.40
R+T+Mpu(15%)	49.67^{c}±0.52	59.62^{ef}±0.19	70.52^{d}±0.31	4.10^{d}±0.26	38.59^{ef}±2.24
R+T+Mpu(30%)	49.85^{c}±0.22	59.85^{f}±0.19	70.48^{d}±0.11	3.82^{cd}±0.11	35.48^{de}±1.84

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.3 ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง

จากการศึกษาความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้งวัตถุดิบเดี่ยวทั้ง 5 ชนิดโดยการวัดปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจลหลังการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ (%syneresis) (ตารางที่ 4.5, ภาคผนวก ค.4) พบว่าเมื่อจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น เจลแป้ง Mnaf มี %syneresis ลดลง เจลแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้ง Mpu จะมี %syneresis เพิ่มขึ้นแล้วจึงค่อยๆลดลง ส่วนเจลแป้ง Mna ไม่พบ %syneresis ในทุกรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง เมื่อพิจารณาที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเดียวกันพบว่า ในรอบแรกของการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็ง (รอบที่ 0)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจลของแป้งที่ความเข้มข้น 6 %w/w

วัตถุดิบ	ปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจล (%)				
	รอบที่ 0	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
แป้งข้าวเจ้า (R)	$17.37^{e}\pm0.87$	$19.93^{e}\pm0.84$	$1.01^{cd}\pm0.47$	-	-
แป้งมันสำปะหลัง (T)	$14.05^{d}\pm1.80$	$18.01^{e}\pm1.63$	$15.23^{h}\pm0.47$	$7.53^{c}\pm0.60$	$6.82^{b}\pm0.08$
แป้งดัดแปร: National 7® (Mna)	$0.00^{a}\pm0.00$	$0.00^{a}\pm0.00$	$0.00^{a}\pm0.00$	$0.00^{a}\pm0.00$	0.00 ± 0.00^{a}
แป้งดัดแปร: National Frigex® (Mnaf)	$6.32^{b}\pm0.76$	$1.54^{ab}\pm0.25$	$1.58^{e}\pm0.11$	$1.05^{a}\pm0.11$	$0.22^{a}\pm0.02$
แป้งดัดแปร: Purity 90® (Mpu)	$0.00^{a}\pm0.00$	$0.08^{a}\pm0.07$	$0.07^{a}\pm0.03$	$16.63^{d}\pm3.17$	$6.47^{b}\pm1.31$
R+T (4 : 1)	$9.93^{c}\pm0.09$	$10.64^{d}\pm0.51$	$1.10^{cde}\pm0.03$	$4.50^{b}\pm0.32$	-
R+T+Mna(15%)	$33.02^{g}\pm1.86$	$8.81^{d}\pm0.11$	$0.69^{bc}\pm0.24$	$1.24^{a}\pm0.24$	-
R+T+Mna(30%)	$29.69^{f}\pm2.91$	$3.29^{bc}\pm1.09$	$2.31^{f}\pm0.31$	-	-
R+T+Mnaf(15%)	$33.02^{g}\pm2.07$	$9.48^{d}\pm2.65$	$1.64^{e}\pm0.53$	$0.55^{a}\pm0.14$	-
R+T+Mnaf(30%)	$31.60^{fg}\pm1.56$	$3.40^{bc}\pm1.00$	$2.88^{g}\pm0.14$	-	-
R+T+Mpu(15%)	$36.87^{h}\pm0.66$	$8.99^{d}\pm1.79$	$1.39^{de}\pm0.49$	-	-
R+T+Mpu(30%)	$31.68^{fg}\pm1.16$	$3.83^{c}\pm1.44$	$0.26^{ab}\pm0.15$	-	-

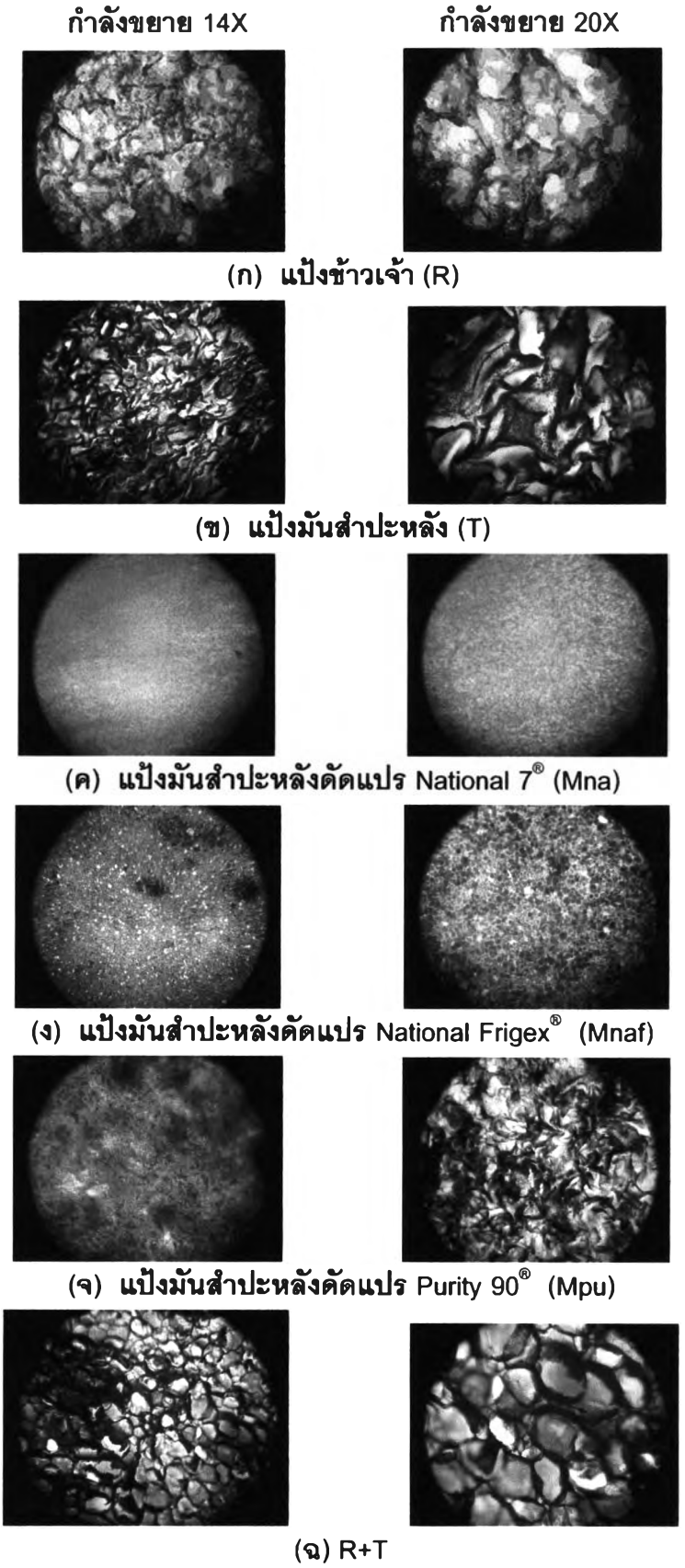
- หมายถึง ไม่สามารถวัดปริมาณน้ำที่แยกออกมาได้ เนื่องจากเจลแป้งเกิดการดูดน้ำกลับหมด

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

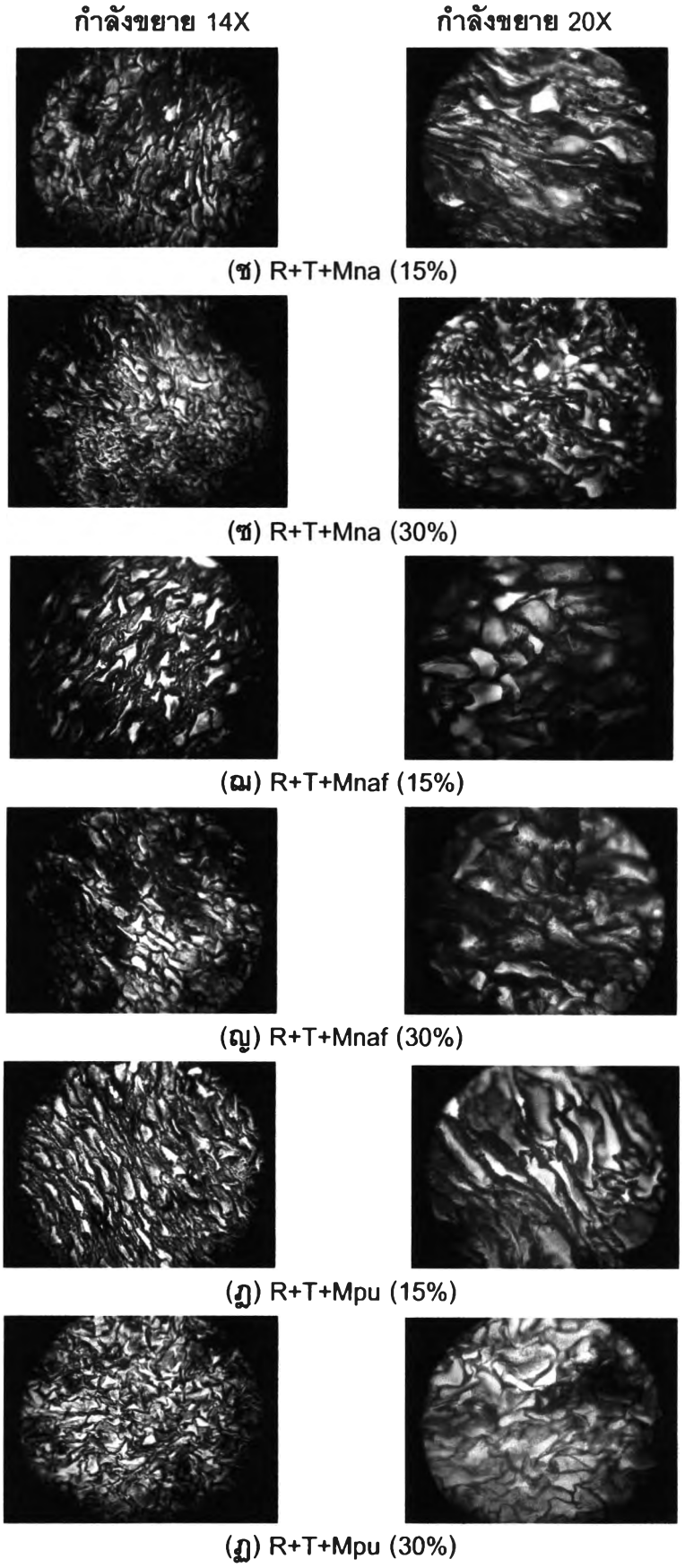
แป้งข้าวเจ้ามี %syneresis สูงที่สุด รองลงมาคือแป้งมันสำปะหลัง และแป้ง Mnaf ตามลำดับ ส่วนแป้ง Mna และ Mpu ไม่พบ %syneresis และพบว่าระหว่างการเทน้ำที่แยกได้จากการปั่นเหวี่ยงออก เจลแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดน้ำบางส่วนที่แยกแล้วกลับเข้าสู่เจลแป้งได้ ในขณะที่เจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งสามชนิดไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ เมื่อเข้าสู่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 1 %syneresis ของเจลแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลในการทำลายโครงสร้างของเจลแป้ง ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลแป้งลดลง (Chan and Toledo, 1976) และพบการดูดน้ำกลับในเจลแป้งทั้งสองเช่นเดิม ในรอบนี้เจลแป้ง Mpu เกิด syneresis ขึ้น เจลแป้ง Mnaf มี syneresis ลดลง ส่วนเจลแป้ง Mna ไม่พบ %syneresis เช่นเดิม และไม่พบการดูดน้ำกลับในเจลแป้งทั้งสาม เมื่อเข้าสู่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 2-4 เจลแป้งข้าวเจ้าเกิดการดูดน้ำกลับอย่างรวดเร็ว ทำให้ %syneresis ที่วัดได้ลดลงจนกระทั่งไม่มีน้ำแยกออกมา เจลแป้งมันสำปะหลังและแป้ง Mnaf มี %syneresis ลดลง ส่วนเจลแป้ง Mpu มีค่าสูงขึ้นจนถึงรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 3 แล้วจึงลดลง และยังคงไม่พบ syneresis ในเจลแป้ง Mna เมื่อวัด %syneresis ของแป้งผสมแต่ละชนิดพบว่า เมื่อรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น %syneresis ของแป้งผสมที่มีการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งหมดมีค่าลดลงจนกระทั่งไม่มีน้ำแยกออกมา ส่วน %syneresis ของเจลแป้งผสม R+T มีค่าเพิ่มขึ้นในรอบที่ 1 และค่อยๆลดลงจนกระทั่งไม่มีน้ำแยกออกมาเช่นกัน เมื่อพิจารณาที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเดียวกันพบว่า ในรอบแรกของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง(รอบที่ 0) เจลแป้งผสม R+T มี %syneresis ต่ำที่สุดคือ 9.93% การผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้ง 3 ชนิดมีผลให้เจลแป้งผสมเกิด %syneresis สูงกว่าการไม่ผสมคือสูงถึง 29.69-36.87% และสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าล้วน เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้นจาก 15% เป็น 30% เจลแป้งผสมมี %syneresis ลดลง และพบว่าเจลของแป้งผสม R+T สามารถดูดน้ำที่แยกแล้วกลับเข้าไปได้เช่นเดียวกับเจลแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงนี้ในแป้งผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เมื่อเข้าสู่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 1 เจลแป้งผสมทุกสูตรสามารถดูดน้ำที่แยกจากการปั่นเหวี่ยงกลับไปได้ %syneresis ของเจลแป้งผสม R+T มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.64% ในขณะที่เจลแป้งผสมที่มีการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมี %syneresis ลดลงเหลือ 3.29-8.99% ทั้งนี้อาจเนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลแป้ง R+T ลดลง ส่วนเจลแป้งที่มีการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรนั้น น้ำส่วนใหญ่ออกมาในรอบแรกจนเกือบหมดแล้ว เมื่อเข้าสู่รอบการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งที่ 2-4 %syneresis ของเจลแป้งผสมทั้งหมดลดลงจนกระทั่งไม่มีน้ำแยกออกมา ซึ่งจากการทดลองนี้ควรแสดงว่าเจลแป้ง Mna มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งสูงที่สุด และการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผล

ให้ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของเจลแป้งลดลง แต่เมื่อนำเจลแป้งมาย้อมด้วยสารละลายไอโอดีนและส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ (รูปที่ 4.1) พบว่า เจลของแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งผสมทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน (smooth gel) เป็นเนื้อสัมผัสที่มีรูพรุนมากจนคล้ายฟองน้ำ (sponge-like structure) โดยเจลของแป้งข้าวเจ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ เนื้อเจลยุ่ย เละ และหยาบมากที่สุด ส่วนเจลของแป้งมันสำปะหลังมีความเนียนละเอียดมากกว่า รูพรุนมีขนาดเล็กกว่า และเจลแป้งผสมทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยกว่าเจลแป้งข้าวเจ้าล้วน โดยการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้โครงสร้างของเจลแป้งมีความละเอียดมากขึ้น และมีรูพรุนน้อยกว่าการไม่ผสม (R+T) และเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น เจลแป้งมีความละเอียดขึ้น มีรูพรุนน้อยลง สำหรับเจลของแป้ง Mnaf และ Mpu มีรูพรุนเกิดขึ้นเล็กน้อย ส่วน Mna ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆของเจล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลแป้งเกิดเนื่องจากในระหว่างการแช่เยือกแข็งเมื่อน้ำบางส่วนกลายเป็นน้ำแข็ง น้ำในเจลแป้งจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้สายโมเลกุลทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในเจลแป้งมีโอกาสเข้ามาใกล้กันและเกิดการรวมกันของสายโมเลกุลได้มากขึ้น เจลแป้งจึงเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้น และส่งผลให้เกิด syneresis ขึ้น ซึ่งถ้าแป้งนั้นมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง สายโมเลกุลส่วนใหญ่ที่เกาะกันอยู่จะคืนสภาพได้เมื่อน้ำแข็งละลาย (Richardson, 1988) แต่ถ้าแป้งนั้นไม่มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง เมื่อละลายน้ำแข็งผลึกน้ำแข็งจะหลอมเกิดเป็นเจลที่มีรูพรุนขึ้น (rough-textured porous) และไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ ซึ่งเมื่อเกิดมากๆจะกลายเป็นโครงสร้างที่คล้ายฟองน้ำและสามารถดูดซับน้ำได้เหมือนฟองน้ำ จึงไม่สามารถวัดปริมาณน้ำที่แยกออกจากเจลได้ (Varavinit *et al.*, 2002) ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดลองจากตารางที่ 4.5 ควบคู่กับรูปที่ 4.1 อาจสรุปได้ว่า เจลแป้ง Mna มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งสูงที่สุด และการผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งการวัด %syneresis ที่พบว่าแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง และแป้งผสม R+T ในรอบที่ 0 มีค่าน้อยเนื่องจากแป้งเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตั้งแต่รอบแรก (รอบที่ 0) มีผลให้ปริมาณน้ำที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง เมื่อเปรียบเทียบกับ %retrogradation ในตาราง 4.4 พบว่าอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันและความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้งจะมีความสัมพันธ์กัน คือ สำหรับแป้งเดี่ยว แป้ง Mna ซึ่งมี %retrogradation ต่ำที่สุด จะมี % syneresis ต่ำที่สุดเช่นกัน และสำหรับแป้งผสม แป้งผสม R+T+Mna มี %retrogradation ต่ำที่สุดจะมี %syneresis ต่ำสุดเช่นกัน ซึ่ง Yuan และ Thompson (1998) และ Jacobson และ BeMiller (1998) พบว่าการเกิดรีโทรเกรเดชันและสมบัติด้านความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้งมีความสัมพันธ์กันเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งจะทำให้เกิดการ

แยกตัวของน้ำจากเจล (syneresis) โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงจะมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำ ส่วนแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำจะมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งสูง นอกจากนี้กมลทิพย์ มั่นภักดี (2542) ยังพบว่าการนำแป้งที่มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งสูงผสมกับแป้งที่มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำกว่า จะช่วยปรับปรุงความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้งที่มีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำให้สูงขึ้นได้ แต่ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งของแป้งผสมอาจไม่เป็นสัดส่วนกับปริมาณแป้งแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน เนื่องจากการผสมแป้งต่างชนิดกันทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของโครงสร้างของเจลแป้ง



รูปที่ 4.1 รูปขยายเจลแป้งความเข้มข้น 6% หลังการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งจำนวน 4 รอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 14 เท่า และ 20 เท่า



รูปที่ 4.1 **(ต่อ)** รูปขยายเจลแป้งความเข้มข้น 6% หลังการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งจำนวน 4 รอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 14 เท่า และ 20 เท่า

4.3 การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยว

4.3.1 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้ง

จากการเตรียมน้ำแป้งสูตรต่างๆตามตารางที่ 3.1 โดยใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® (Mna), National Frigex® (Mnaf) หรือ Purity 90® (Mpu) และนำไปวัดความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งที่ใช้ พบว่า น้ำแป้งที่ผสมแป้ง Mna, Mnaf และ Mpu มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.79–5.94, 5.95–6.01 และ 6.15–6.27 ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของน้ำแป้งและปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ภาคผนวก ข.1-ข.3) และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งที่วัดได้ทั้งหมดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยว คือ pH 5.0-7.0 (ณรงค์ นิยมวิทย์ และอัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ, 2528) ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่มีความเหนียวนุ่มดีที่สุด ถ้าสูงหรือต่ำกว่านี้ก๋วยเตี๋ยวที่ได้จะมีความเหนียวนุ่มลดลงและคุณภาพด้านการยอมรับลดลง (เสนอ ร่วมจิตร, 2522; พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533; งามชื่น คงเสรี, 2541) จากนั้นจึงนำน้ำแป้งไปผลิตก๋วยเตี๋ยวและประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับรวมต่อไป

4.3.2 การยอมรับของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® National Frigex® หรือ Purity 90®

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® (Mna), National Frigex® (Mnaf) หรือ Purity 90® (Mpu) (ตารางที่ 4.6, ภาคผนวก ค.6) โดยคะแนนด้านการยอมรับ 9 คะแนน คือยอมรับมากที่สุด และ 1 คะแนน คือยอมรับน้อยที่สุด และนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และความเข้มข้นของน้ำแป้ง เมื่อใช้แป้ง Mna, Mnaf และ Mpu ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปสร้างกราฟ (contour plot) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในส่วนผสม (%) และความเข้มข้นของน้ำแป้ง (%) เมื่อใช้แป้ง Mna, Mnaf และ Mpu ได้ (รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.6 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับรวมของก๋วยเตี๋ยว เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

สูตร	ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (M, % โดยน้ำหนักแป้งผสม)	ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (X, % โดยน้ำหนัก)	คะแนนเฉลี่ยด้านการยอมรับรวม* (Y)		
			แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mna	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mnaf	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mpu
1	0	30	7.33 ± 0.75	6.39 ± 1.15	7.13 ± 0.18
2	15	30	7.55 ± 0.38	6.89 ± 0.92	7.55 ± 0.40
3	30	30	7.76 ± 0.45	6.89 ± 0.98	7.24 ± 0.41
4	0	35	7.10 ± 0.40	6.44 ± 0.16	6.82 ± 0.13
5	15	35	7.67 ± 0.88	7.06 ± 0.45	7.43 ± 0.61
6	15	35	7.90 ± 0.76	7.50 ± 0.71	7.77 ± 0.47
7	15	35	7.82 ± 0.86	7.44 ± 0.08	7.45 ± 0.33
8	30	35	7.36 ± 0.30	6.67 ± 1.26	7.11 ± 0.35
9	0	40	5.07 ± 0.57	5.11 ± 0.16	6.46 ± 0.20
10	15	40	6.69 ± 0.76	5.44 ± 0.23	6.67 ± 0.37
11	30	40	7.25 ± 0.64	6.33 ± 1.23	7.07 ± 0.30

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

$$Y = -11.29768 - 0.11772\ M_1 + 1.24529\ X - 0.00182\ M_1^2 - 0.02077\ X^2 + 0.00583\ M_1X \quad \text{.....(4.1)}$$

R-Squared = 0.8322

$$Y = -26.49682 + 0.06977\ M_2 + 1.99254\ X - 0.00161\ M_2^2 - 0.03003\ X^2 \quad \text{.....(4.2)}$$

R-Squared = 0.7416

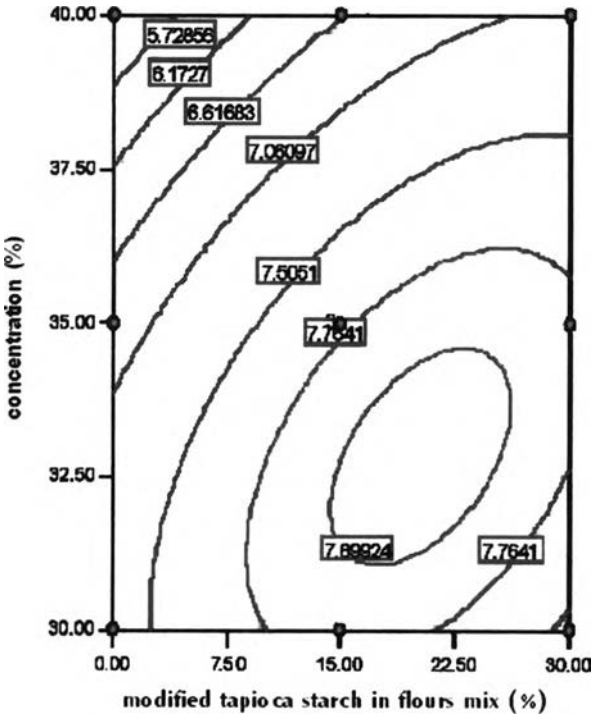
$$Y = -1.00930 + 0.05764\ M_3 + 0.51151\ X - 0.00155\ M_3^2 - 0.00813\ X^2 \quad \text{.....(4.3)}$$

R-Squared = 0.6764

เมื่อ Y คือ คะแนนการยอมรับ

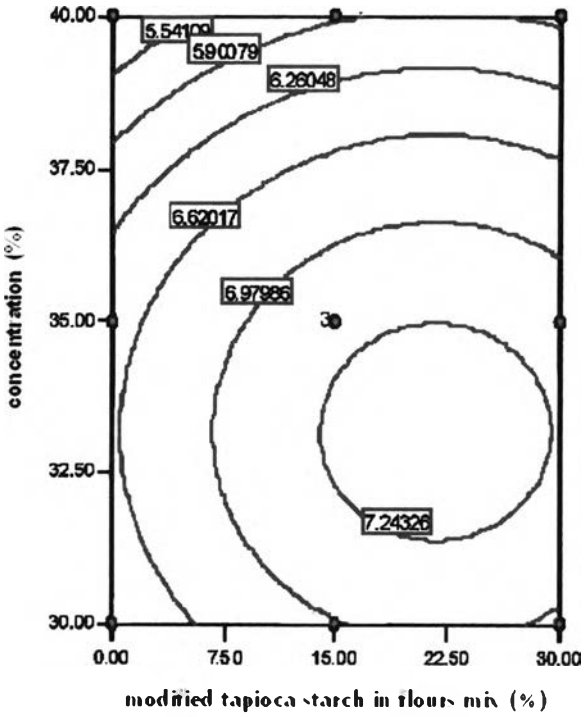
M_1, M_2, M_3 คือ ปริมาณร้อยละแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7®, National Frigex® หรือ Purity 90® ในแป้งผสม ตามลำดับ

X คือ ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (%)



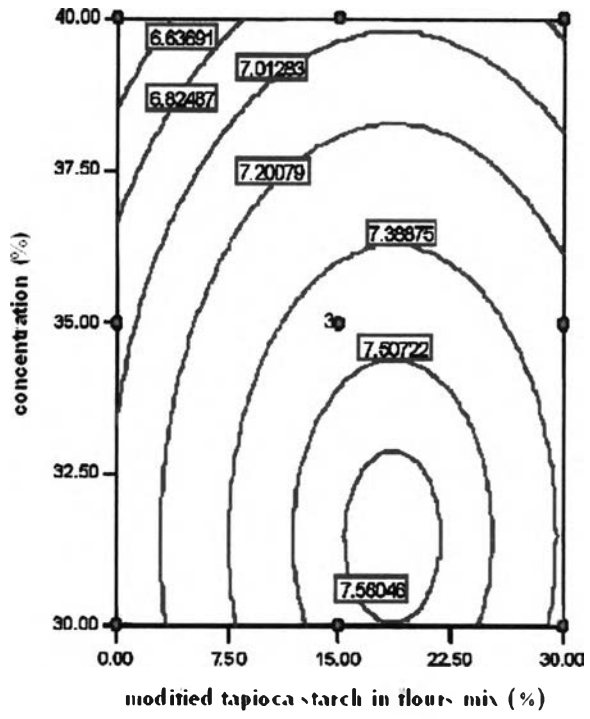
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

หมายเหตุ : ● คือ จุดที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National Frigex® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

หมายเหตุ : ● คือ จุดที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร Purity 90® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

หมายเหตุ : ● คือ จุดที่ทำการทดลอง

จากกราฟ contour plot ที่ได้สามารถใช้อธิบายผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งต่อคะแนนการยอมรับ และสามารถหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวได้ สำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งในช่วงที่ทำการทดลองนั้นพบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้ง 3 ชนิดให้ผลการตอบสนองต่อการยอมรับในทิศทางที่คล้ายกันคือ เมื่อความเข้มข้นของน้ำแป้งในสูตรคงที่ การเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้ทดสอบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงระดับหนึ่ง ถ้าเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรอีก คะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับการผสมแป้ง Mna และลดลงสำหรับการผสมแป้ง Mnaf และ Mpu และเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เติมในสูตรคงที่ พบว่า เมื่อความเข้มข้นน้ำแป้งเพิ่มขึ้น คะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบจะสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นน้ำแป้งสูงมากเกินขีดจำกัดหนึ่ง คะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบจะลดลง ส่วนการหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวนั้น จะพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของ contour plot ของแต่ละค่าการตอบสนองโดยการอ่านค่าจากกราฟ หรือใช้วิธี partial differentiation แต่ในการทดลองนี้ใช้วิธี partial differentiation เช่นเดียวกับที่ Shelke และคณะ (1990) ใช้วิธี RSM ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต Chinese wet noodle เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการยอมรับสูงสุด ซึ่งจากการคำนวณได้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคะแนนการยอมรับสูงสุดเมื่อใช้แป้ง Mna, Mnaf และ Mpu คือ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 20.3, 21.8 และ 18.6% โดยน้ำหนักแป้งผสมตามลำดับ และความเข้มข้นน้ำแป้ง 32.8, 33.2 และ 31.5% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกันมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงหาความสัมพันธ์โดยรวมได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4 (รูปที่ 4.5, ภาคผนวก ค.5) และใช้วิธี partial differentiation คำนวณหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นน้ำแป้งที่เหมาะสมเช่นเดิม จะได้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวในขั้นตอนต่อไปคือ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 19.4% โดยน้ำหนักแป้งผสม และความเข้มข้นน้ำแป้ง 32.9% โดยน้ำหนัก

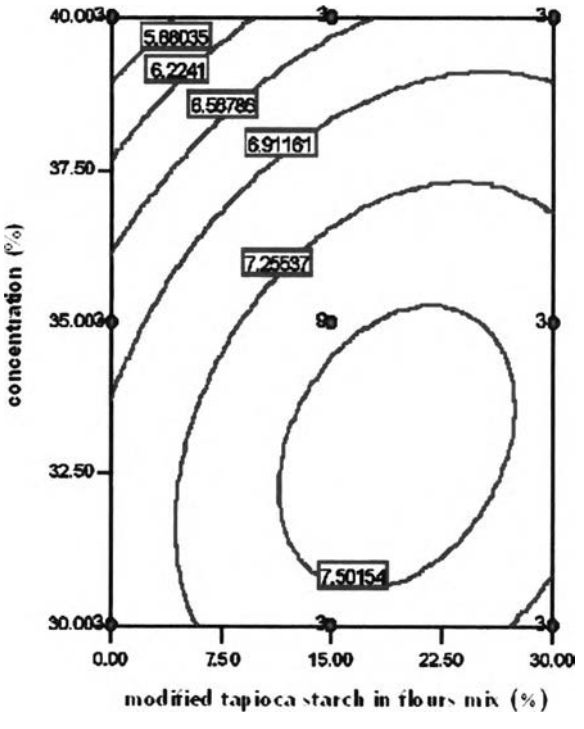
$$Y = -12.21393 - 0.04421\,M + 1.22945\,X - 0.00166\,M^2 - 0.01964\,X^2 + 0.00330\,MX \quad (4.4)$$

R-Squared = 0.6488

เมื่อ Y คือ คะแนนการยอมรับ

M คือ ปริมาณร้อยละแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7®, National Frigex® หรือ Purity 90® ในแป้งผสม

X คือ ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (%)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้ง

หมายเหตุ : ● คือ จุดที่ทำการทดลอง

4.3.3 Tensile strength และ Extensibility ของก๋วยเตี๋ยว

จากการวัดค่า tensile strength และ extensibility ของก๋วยเตี๋ยวสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง texture analyzer TA-XT2 (ตารางที่ 4.7 และ 4.8, ภาคผนวก ค.7 และ ค.8) พบว่าค่า tensile strength มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของน้ำแป้งและปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ดังสมการที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 สำหรับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® (Mna), National Frigex® (Mnaf) หรือ Purity 90® (Mpu) ตามลำดับ และค่า extensibility มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของน้ำแป้งและปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ดังสมการที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 สำหรับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7® (Mna), National Frigex® (Mnaf) หรือ Purity 90® (Mpu) ตามลำดับ

$$T = -1.16985 - 0.06622\ M_1 + 0.14500\ X \quad \text{.....(4.5)}$$

R-Squared = 0.8387

$$T = -2.98727 - 0.03900\ M_2 + 0.19700\ X \quad \text{.....(4.6)}$$

R-Squared = 0.9676

$$T = 7.50399 + 0.01862\ M_3 - 0.45904\ X + 0.00054\ M_3^2 + 0.01003\ X^2 - 0.00237\ M_3X \quad \text{.....(4.7)}$$

R-Squared = 0.9971

$$E = 7.70803 + 0.21078\ M_1 + 0.3113\ X \quad \text{.....(4.8)}$$

R-Squared = 0.8278

$$E = 28.23826 + 0.54861\ M_2 - 0.17717\ X - 0.00161\ M_2^2 - 0.01350\ M_2X \quad \text{.....(4.9)}$$

R-Squared = 0.8355

$$E = 2.03379 + 0.17222\ M_3 + 0.48567\ X \quad \text{.....(4.10)}$$

R-Squared = 0.7464

เมื่อ T คือ ค่า Tensile strength ของก๋วยเตี๋ยว (g/mm^2)

E คือ ค่า Extensibility ของก๋วยเตี๋ยว (mm)

M_1, M_2, M_3 คือ ปริมาณร้อยละแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National 7®, National Frigex® หรือ Purity 90® ในแป้งผสม ตามลำดับ

X คือ ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (%)

เมื่อนำสมการที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile strength และค่า extensibility ของผลิตภัณฑ์กับปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในส่วนผสม และความเข้มข้นของน้ำแป้ง เมื่อใช้แป้ง Mna, Mnaf และ Mpu (รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ) พบว่า ความเข้มข้นของน้ำแป้งและปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีผลต่อเนื้อสัมผัสด้าน tensile strength และ extensibility ของก๋วยเตี๋ยว โดยก๋วยเตี๋ยวที่มีค่า tensile strength สูงจะให้เนื้อสัมผัสที่แข็งและกระด้างกว่าก๋วยเตี๋ยวที่มีค่า tensile strength ต่ำ และก๋วยเตี๋ยวที่มีค่า extensibility สูงจะมี

ความเหนียวและยืดหยุ่นสูงกว่าก๋วยเตี๋ยวที่มีค่า extensibility ต่ำ (พิมพ์เพ็ญ ถิรพร, 2533; Smewing, 1997) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำแป้งเพิ่มขึ้น ก๋วยเตี๋ยวจะมีค่า tensile strength และค่า extensibility เพิ่มขึ้น ยกเว้นการผสมแป้ง Mnaf จะมีผลให้ค่า tensile strength เพิ่มขึ้น แต่ค่า extensibility ลดลง นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของน้ำแป้งเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่มีการผสมแป้ง Mna และ Mpu จะมีความเหนียวและแข็งเพิ่มขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่มีการผสมแป้ง Mnaf จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเหนียวน้อยลง เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น ก๋วยเตี๋ยวจะมีค่า tensile strength ลดลง และค่า extensibility เพิ่มขึ้น โดยก๋วยเตี๋ยวสูตรที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจะมีค่า tensile strength ต่ำกว่าและค่า extensibility สูงกว่าก๋วยเตี๋ยวสูตรที่ไม่เติม (R+T) แสดงว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและแข็งกระด้างลดลง โดยก๋วยเตี๋ยวสูตรที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจะมีความเหนียวมากกว่าและแข็งกระด้างน้อยกว่าก๋วยเตี๋ยวสูตรที่ไม่เติม เมื่อนำกราฟค่า tensile strength และ extensibility (รูปที่ 4.6- 4.8) ไปซ้อนกับกราฟคะแนนการยอมรับ (รูปที่ 4.5) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวและคะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบ (รูปที่ 4.9-4.11) พบว่าผู้ทดสอบจะให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่มีค่า tensile strength และค่า extensibility ในช่วงหนึ่ง และคะแนนการยอมรับจะลดลงถ้าค่า tensile strength และ extensibility สูงหรือต่ำเกินไป โดยในการหาค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่มีผลให้ผู้ทดสอบให้การยอมรับสูงสุดจะใช้การคำนวณจากสมการ โดยแทนค่า M (ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร) และ X (ความเข้มข้นน้ำแป้ง) ซึ่งได้จากการหาความความสัมพันธ์รวมจากการทดลองในข้อ 4.3.2 คือ M เท่ากับ 19.4 และ X เท่ากับ 32.9 ลงในสมการ 4.5-4.10 จะได้ว่าผลิตภัณฑ์ได้รับการยอมรับมากที่สุดเมื่อค่า tensile strength เท่ากับ 2 .32, 2.74 และ 2.31 g/mm^2 แ ละค่า extensibility เท่ากับ 22.04, 23.83 และ 21.35 mm เมื่อใช้แป้ง Mna, Mnaf และ Mpu ตามลำดับ ซึ่งพิมพ์เพ็ญ ถิรพร (2533) ได้อธิบายลักษณะเนื้อสัมผัสของก๋วยเตี๋ยวที่เป็นที่ต้องการผู้ทดสอบว่าเป็นเนื้อสัมผัสแบบเหนียวนุ่ม โดยเมื่อเส้นก๋วยเตี๋ยวมีความเหนียวนุ่มเพิ่มขึ้น คะแนนความชอบของผู้ทดสอบจะเพิ่มขึ้น แต่คะแนนความชอบจะลดลงเมื่อก๋วยเตี๋ยวมีความกระด้างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่า tensile strength และ extensibility ที่ให้ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวมีคะแนนการยอมรับสูงสุดเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกันมีค่าแตกต่างกัน อาจแสดงให้เห็นว่า การตัดสินใจยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้ทดสอบมีปัจจัยอื่นเข้ามาร่วมด้วยนอกจากเนื้อสัมผัสที่วัดออกมาเป็นค่า tensile strength และ extensibility หรืออาจแสดงให้เห็นว่าสมบัติด้าน tensile strength และ extensibility ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการตัดสินการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้ทดสอบ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสและคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวที่ได้ในการ

ทดลองไม่มีความสัมพันธ์กับสมบัติทางความหนืดดังเช่นงานวิจัยของ Batey และคณะ (1997) และ Bhattacharya และคณะ (1999) ที่กล่าวไว้แล้วในข้อ 4.2.1 ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๋วยเตี๋ยวคือแป้งผสม แต่ Batey และคณะ (1997) และ Bhattacharya และคณะ (1999) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งกับเนื้อสัมผัสและคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเมื่อใช้แป้งเพียงชนิดเดียว ซึ่งการผสมแป้งต่างชนิดกันมีผลให้สมบัติทางเคมีและกายภาพบางอย่างของแป้งเปลี่ยนแปลงไป (Obanni และ BeMiller, 1997)

ตารางที่ 4.7 ค่า Tensile strength ของก๋วยเตี๋ยวจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน เมื่อวัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer TA-XT2

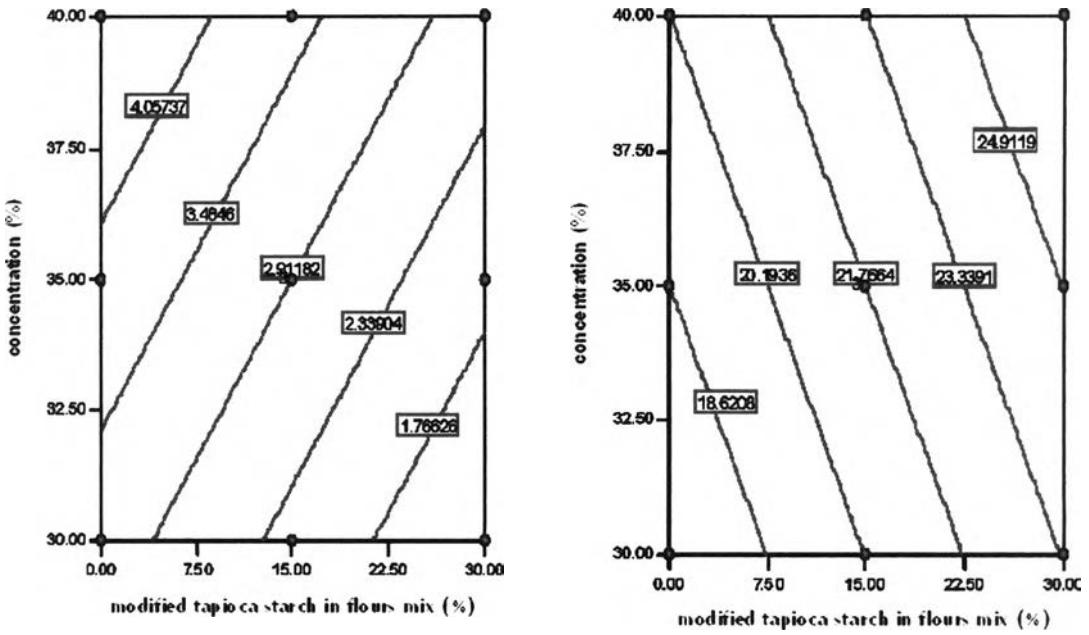
สูตร	ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (M, % โดยน้ำหนักแป้งผสม)	ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (X, % โดยน้ำหนัก)	tensile strength (g/mm^2)*		
			แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mna	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mnaf	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mpu
1	0	30	2.89±0.15	2.87±0.14	2.74±0.15
2	15	30	2.60±0.13	2.39±0.18	2.09±0.19
3	30	30	1.54±0.75	1.94±0.11	1.70±0.08
4	0	35	4.13±0.29	4.09±0.16	3.75±0.17
5	15	35	2.62±0.20	3.27±0.20	2.94±0.13
6	15	35	2.47±0.12	3.16±0.18	2.87±0.20
7	15	35	2.53±0.18	3.18±0.19	2.89±0.19
8	30	35	1.87±0.12	2.54±0.10	2.21±0.16
9	0	40	5.21±0.11	4.95±0.22	5.19±0.23
10	15	40	3.31±0.21	4.24±0.25	4.13±0.18
11	30	40	2.86±0.20	3.92±0.12	3.44±0.17

หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ แต่ละซ้ำวัด 5 ครั้ง

ตารางที่ 4.8 ค่า Extensibility ของก๋วยเตี๋ยวจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน เมื่อวัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer TA-XT2

สูตร	ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (M, % โดยน้ำหนักแป้งผสม)	ความเข้มข้นของน้ำแป้ง (X, % โดยน้ำหนัก)	extensibility (mm)*		
			แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mna	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mnaf	แป้งมันสำปะหลังดัดแปร: Mpu
1	0	30	17.89±2.16	23.02±2.27	17.86±2.04
2	15	30	22.14±1.94	24.43±1.73	17.94±1.06
3	30	30	22.17±1.96	27.54±1.97	22.07±1.23
4	0	35	17.76±2.19	21.42±2.37	19.22±2.87
5	15	35	20.23±2.03	23.17±2.24	20.61±2.07
6	15	35	21.88±0.56	24.19±2.42	22.84±2.18
7	15	35	21.43±1.52	24.32±2.25	22.31±1.93
8	30	35	24.39±3.25	23.28±1.42	22.48±1.63
9	0	40	19.63±1.41	21.01±2.27	21.12±1.54
10	15	40	24.22±3.17	21.11±2.13	22.17±1.75
11	30	40	27.69±3.77	21.48±1.83	29.15±2.34

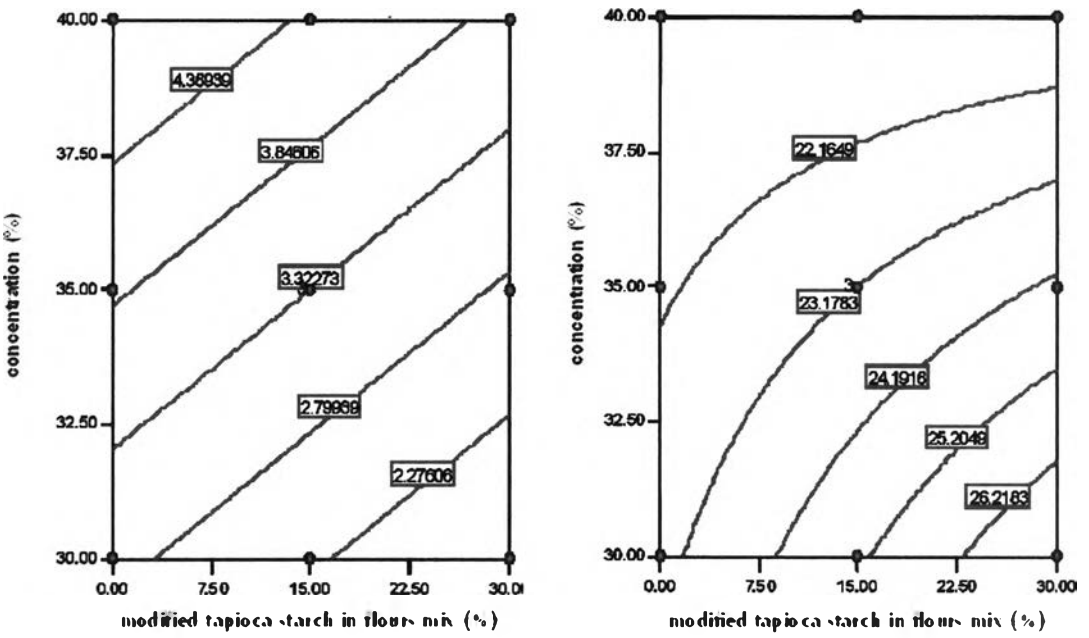
หมายเหตุ: * ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ แต่ละซ้ำวัด 5 ครั้ง



(ก) (ข)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile strength (ก) ค่า extensibility (ข) กับปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National7® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

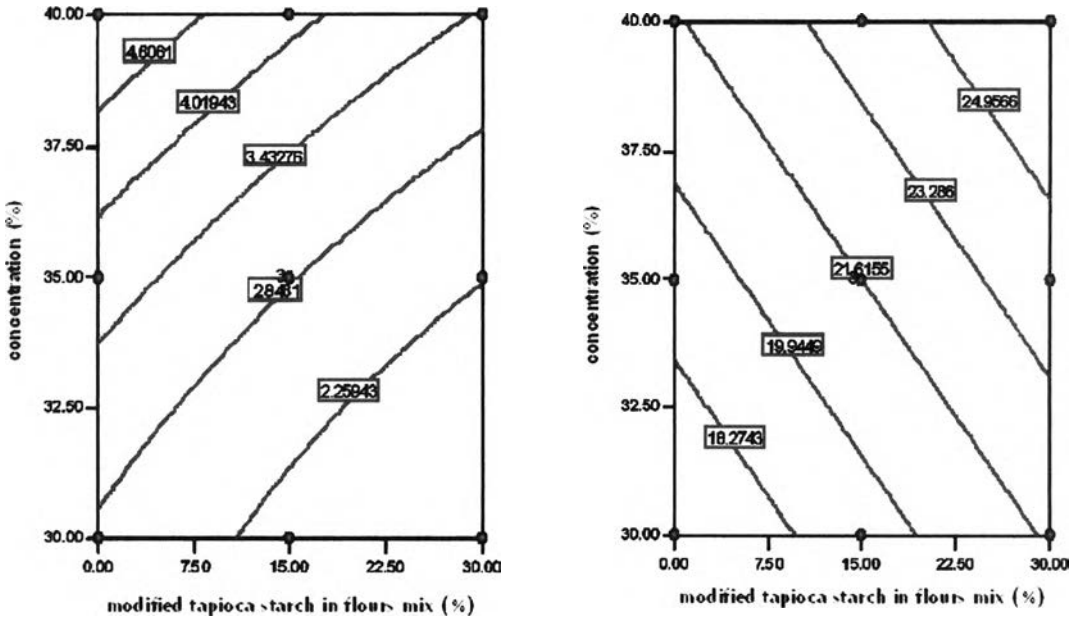
หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**



(ก) (ข)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile strength (ก) ค่า extensibility (ข) กับปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National Frigex® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

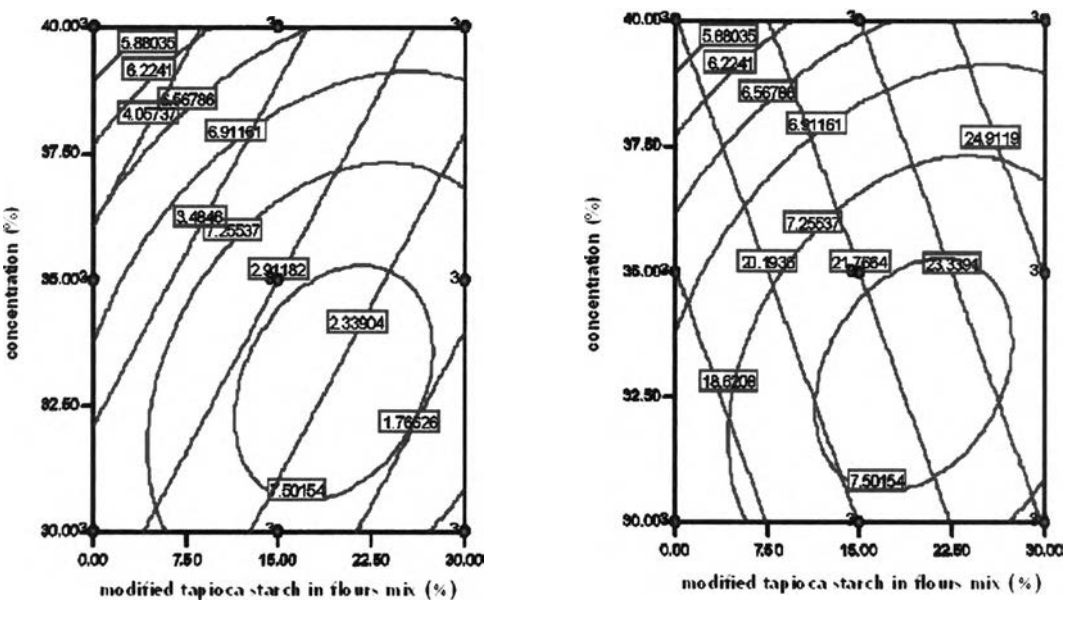
หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**



(ก) (ข)

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile strength (ก) ค่า extensibility (ข) กับ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร Purity 90® และความเข้มข้นของน้ำแป้ง

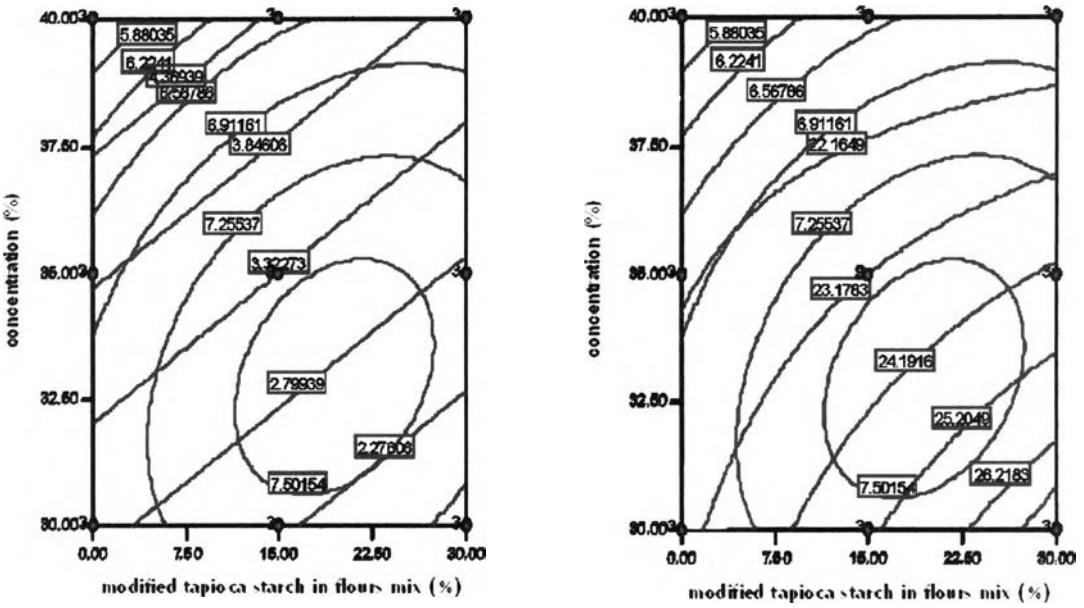
หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**



(ก) (ข)

รูปที่ 4.9 การซ้อนกราฟระหว่างกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า tensile strength (ก) และกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า extensibility (ข) เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร National7®

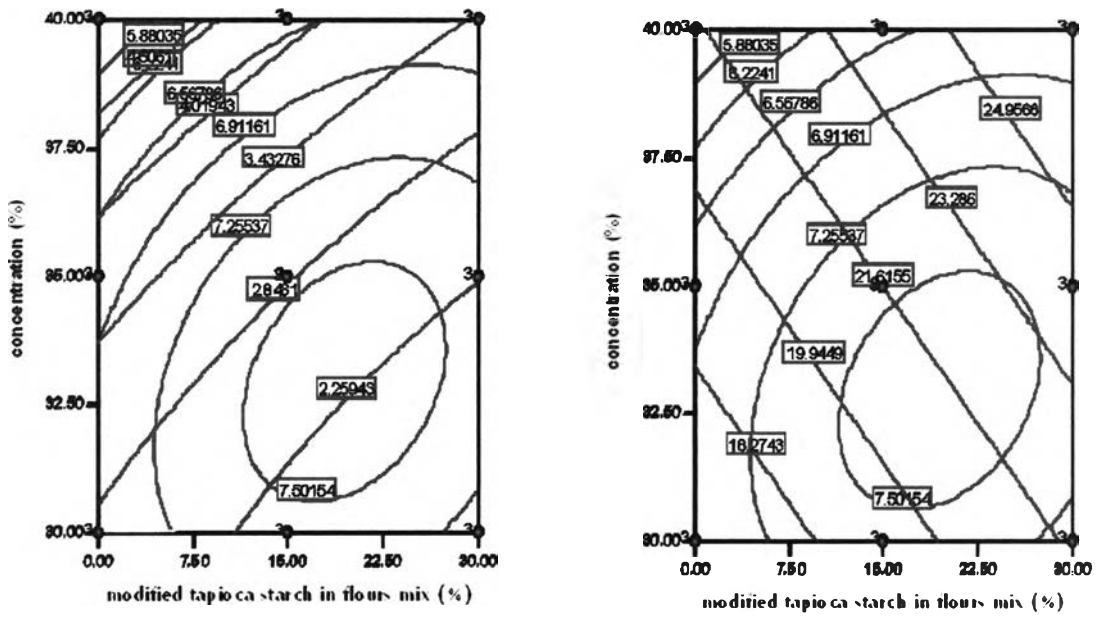
หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**



(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 การซ้อนกราฟระหว่างกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า tensile strength (ก) และกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า extensibility (ข) เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร National Frigex®

หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**



(ก) (ข)

รูปที่ 4.11 การซ้อนกราฟระหว่างกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า tensile strength (ก) และกราฟคะแนนการยอมรับกับกราฟค่า extensibility (ข) เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร Purity 90®

หมายเหตุ : ● **คือ จุดที่ทำการทดลอง**

4.4 การศึกษาภาวะที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งโดยใช้เครื่องแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น (Air-Blast Freezer)

จากการทดลองในข้อ 4.3 จะได้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและความเข้มข้นของน้ำแป้งที่เหมาะสมในการผลิตก๋วยเตี๋ยวคือ ปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 19.4% โดยน้ำหนักแป้งผสม และความเข้มข้นน้ำแป้ง 32.9% โดยน้ำหนัก ซึ่งนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ 2 ชนิดคือ ผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้ง โดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมี 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National7® (Mna) สูตรที่ 2 ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร National Frigex® (Mnaf) และสูตรที่ 3 ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร Purity 90® (Mpu) นำมาแช่เยือกแข็งเพื่อหาเวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์จนมีอุณหภูมิกึ่งกลาง -18 องศาเซลเซียส และค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ทั้งสองด้วยวิธีการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น

4.4.1 การหาเวลาและอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งแผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น

จากการทดลองพบว่า การแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งทั้ง 3 สูตรด้วยวิธีแบบลมพ่นนั้นจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิภายในตัวผลิตภัณฑ์จาก 20 องศาเซลเซียส จนถึง -18 องศาเซลเซียส และอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) (ตารางที่ 4.9, ภาคผนวก ค.8 และ ค.9 ตามลำดับ) โดยเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งคือ 73.83-75.00 นาที และ 77.83-80.67 นาที ตามลำดับ และอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็งคือ 0.38-0.39 เซนติเมตร/ชั่วโมง และ 0.52-0.54 เซนติเมตร/ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งจัดว่าเป็นการแช่เยือกแข็งแบบ Normal freezing คือมีอัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง 0.3-1.0 เซนติเมตร/ชั่วโมง (Boegh-Soerensen and Jul, 1985) แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ห้องแช่เยือกแข็งของบริษัท สุรพลฟูดส์ จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นการไม่สะดวกในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดในแต่ละสูตรตามเวลาที่วัดได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งทุกผลิตภัณฑ์ 2 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของกมลวรรณ อิศราคาร (2548) ซึ่งทดลองแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวเส้นจันทน์ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และนำไปวัดการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์พบว่า ไม่แตกต่างจากก่อนการแช่เยือกแข็ง ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการแช่เยือกแข็งเป็น 2 ชั่วโมง จึงไม่น่าจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆเช่นกัน

ตารางที่ 4.9 เวลาและอัตราเร็วที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งตั้งแต่ 20 องศาเซลเซียส จนถึง -18 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีแบบลมพ่น

สูตร	เวลาในการแช่เยือกแข็ง (นาที)		อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง (เซนติเมตร/ชั่วโมง)	
	แผ่นก๋วยเตี๋ยว^{ns}	ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้ง^{ns}	แผ่นก๋วยเตี๋ยว^{ns}	ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้ง^{ns}
R+T+Mna	73.83±2.75	79.83±3.88	0.39±0.01	0.53±0.03
R+T+Mnaf	74.92±5.28	80.67±0.76	0.39±0.27	0.52±0.01
R+T+Mpu	75.00±3.04	77.83±1.53	0.38±0.02	0.54±0.01

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4.4.2 **การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น**

นำตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งนาน 2 ชั่วโมงแล้วจากข้อ 4.4.1 มาชั่งน้ำหนักและหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (ตารางที่ 4.10, ภาคผนวก ค.10) พบว่าชนิดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไม่มีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็ง ($p\leq0.05$) โดยก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่มีการผสมแป้ง Mnaf มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งนานกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของสมจิต ประภาเลิศรัศมี (2539) ซึ่งศึกษาข้าวหุงสุกแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นเช่นกัน และพบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งสูงถึง 2.69% แต่ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่พบไม่ส่งผลต่อคะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบในทุกด้าน เช่นเดียวกับวรัญญา โชติช่วง (2542) ซึ่งได้ศึกษามันฝรั่งทอดแบบก้อนแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น พบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง 1.33% แต่ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่พบไม่ส่งผลต่อคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบในทุกด้าน ดังนั้นค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งในการทดลองนาน 2 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.90-1.10% จึงไม่น่าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.10 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็งผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งด้วยวิธีแบบลมพ่น

สูตร	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง (%)	
	แผ่นก๋วยเตี๋ยว^{ns}	ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้ง
R+T+Mna	1.02±0.08	0.95^{a}±0.05
R+T+Mnaf	1.08±0.08	1.10^{b}±0.07
R+T+Mpu	1.06±0.03	1.06^{ab}±0.06

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.5 การศึกษาผลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งแบบลมพ่น

นำผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่นนาน 2 ชั่วโมงแล้วมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำในด้านร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง tensile strength, extensibility และคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับรวม

4.5.1 การสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำ

เมื่อนำผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งมาละลาย และวัดค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าชนิดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของผลิตภัณฑ์ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.11 และ 4.12, ภาคผนวก ค.11 และ ค.12) ทั้งนี้เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแช่เยือกแข็งมาละลายน้ำแข็ง ผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์จะหลอมละลายและน้ำบางส่วนจะเกิดการแยกตัวออกจากตัวผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการเสื่อมสลายทางกลของเนื้อเยื่อจากการแช่เยือกแข็ง (Jul, 1984) โดยปริมาณน้ำที่สูญเสียจากการละลายน้ำแข็งจะขึ้นกับความสามารถในการอุ้มน้ำได้ของแป้ง (water holding capacity) ในผลิตภัณฑ์ (Redmond, Gormley, and Butler, 2003) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่

รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเดียวกันพบว่า ในผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งการใช้แป้ง Mna มีผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งน้อยที่สุดในทุกรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเกิดรีโทรเกรเดชันและความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง (%syneresis) ของแป้งผสม แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งนั้นค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งในทุกรอบจะน้อยที่สุดในผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แป้ง Mpu ซึ่งอาจเนื่องจากแป้งผสม R+T+Mpu มี %การเกิดรีโทรเกรเดชันสูงที่สุดและความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่ำที่สุด จึงมีความเป็นไปได้ที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างขึ้นและสามารถดูดซับน้ำบางส่วนที่สูญเสียออกมาได้ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่วัดได้จึงมีค่าน้อยลง และเมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งมีค่าลดลง แต่ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในรอบที่ 1 ซึ่งเป็นน้ำที่สูญเสียออกมาจากตัวกุ้ง และเมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้นอีก ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งของทั้งสองผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ในรอบที่ 4 เนื่องจากในการทดลองนี้เป็นการวัดการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบ และน้ำในผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียจากการละลายน้ำแข็งในรอบแรกๆถูกแยกออกเกือบหมด ดังนั้นการสูญเสียน้ำหนักจึงลดลงเมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น ประกอบกับการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เกิดการเสื่อมเสียทางกลขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างที่สามารถดูดซับน้ำได้ (Varavinit *et al.*, 2002) นอกจากนี้วิธีการละลายน้ำแข็งที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการละลายน้ำแข็งด้วยอากาศนิ่งซึ่งเป็นวิธีการละลายน้ำแข็งที่ช้า ทำให้น้ำที่ละลายมีเวลาแพร่กลับไปสู่ตำแหน่งเดิมในเนื้อเยื่อได้ (Jul, 1984) ซึ่งค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับ %syneresis ของแป้งที่มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเพิ่มขึ้น โดยค่าที่วัดได้น้อยกว่าที่พบในงานวิจัยของกมลวรรณ อิศราคาร (2548) ซึ่งได้แช่เยือกแข็งก๋วยเตี๋ยวเส้นจันทน์ด้วยตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และพบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งสูงถึง 0.57-0.71% แต่พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่พบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้านเนื้อสัมผัสและการยอมรับอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.11 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
0	0.32^{cA}±0.04	0.54^{eB}±0.03	0.55^{dB}±0.04
1	0.29^{cA}±0.02	0.40^{dB}±0.01	0.32^{cA}±0.03
2	0.28^{cA}±0.02	0.29^{cA}±0.02	0.29^{bcA}±0.03
3	0.08^{bA}±0.03	0.07^{bA}±0.03	0.27^{bB}±0.03
4	0.00^{aA}±0.00	0.00^{aA}±0.00	0.00^{aA}±0.00

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีแบบลมพ่น เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็ง (%)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
0	0.44^{cB}±0.03	0.49^{cB}±0.03	0.31^{bA}±0.03
1	0.46^{cB}±0.02	0.51^{cC}±0.02	0.31^{bA}±0.02
2	0.42^{cB}±0.04	0.31^{bA}±0.03	0.31^{bA}±0.01
3	0.34^{bB}±0.03	0.32^{bAB}±0.01	0.30^{bA}±0.01
4	0.29^{aB}±0.05	0.00^{aA}±0.00	0.00^{aA}±0.00

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.5.2 การยอมรับผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้านคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ (ตารางที่ 4.13 และ 4.14, ภาคผนวก ค.13 และ ค.14) เมื่อพิจารณาที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งเดียวกันพบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดที่ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้ง 3 ชนิด แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในทุกรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง ($p>0.05$) เมื่อพิจารณาผลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำพบว่า กระบวนการแช่เยือกแข็ง (รอบที่ 0) ไม่มีผลต่อคะแนนการยอมรับของผลิตภัณฑ์ทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง (เส้นสด) (ยกเว้นผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวที่ใช้แป้งผสม R+T+Mpu) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Olalquiag และคณะ (1986) วไลลักษณ์ พัฒนมุข (2539) และรัชนี ศรีวรรณวิทย์ (2541) ที่พบว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งไม่มีผลต่อคะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ผู้ทดสอบยอมรับได้ ซึ่งสมจิต ประภาเลิศรัศมี (2539) พบว่าข้าวหุงสุกที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งและอุ่นจะมีความนิ่มเละขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ส่งผลต่อคะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบเนื่องจากความนิ่มของข้าวเป็นสิ่งที่ผู้ทดสอบต้องการ ในรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 1 คะแนนการยอมรับของทั้งสองผลิตภัณฑ์ (ยกเว้นผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งที่ผสมแป้ง Mpu) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ผู้ทดสอบได้อธิบายว่าเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความเหนียวนุ่มในระดับที่ดี ไม่เหนียวหรือแข็งหรือเละจนเกินไป แต่เมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้นอีก คะแนนการยอมรับของทั้งสองผลิตภัณฑ์จะเริ่มลดลง โดยผู้ทดสอบได้อธิบายว่าเมื่อจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น ความเหนียวนุ่มของก๋วยเตี๋ยวจะลดลง นิ่มเละมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Redmond และคณะ (2003) ซึ่งพบว่า กระบวนการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลให้คะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งบด (mashed potato) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) เนื่องจากโครงสร้างเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ถูกทำลายจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นทุกครั้งที่นำผลิตภัณฑ์มาละลายน้ำแข็งแล้วนำกลับไปแช่เยือกแข็งใหม่ ทำให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นิ่มเละมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะทางเนื้อเยื่อของก๋วยเตี๋ยวเมื่อตัดแผ่นก๋วยเตี๋ยวตามขวาง (รูปที่ 4.12) จะเห็นได้ว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆครั้งจะมีลักษณะทางเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งจำนวนและขนาดของช่องว่างระหว่างเซลล์ของผลิตภัณฑ์จะมากขึ้นเมื่อรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Szymońska และ

Wodnicka (2005) ที่พบว่าการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆครั้งมีผลให้ขนาดรูของเม็ดสตาร์ช (pore dimension) ของแป้งมันฝรั่งมีขนาดเพิ่มขึ้นถึง 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็งเนื่องจากการสูญเสียโครงสร้างของเม็ดแป้งแบบไม่ผันกลับ (irreversible) จากการแช่เยือกแข็งและการเกิดผลึกน้ำแข็ง อย่างไรก็ตามพบว่าผู้ทดสอบยังคงให้การยอมรับผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำจำนวน 4 รอบแล้ว (คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงกว่า 5 คะแนน จากคะแนนเต็ม 9 คะแนน) แต่ในผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็ง ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งถึงรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่ 3 เท่านั้น โดยผู้ทดสอบอธิบายว่ากุ้งในผลิตภัณฑ์เริ่มมีกลิ่นแปลกปลอมทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นเหม็นและเนื้อสัมผัสของก๋วยเตี๋ยวนิ่มเละ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของศิรินทรา บุญสำเร็จ (2544) ที่พบว่าเมื่อนำกุ้งแช่เยือกแข็งมาผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆรอบ ความสดของกุ้งจะลดลงตามจำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งมีผลทำให้ปริมาณของแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายโปรตีนได้เพิ่มขึ้น และทำให้เกิดสารประกอบพวกแอมโมเนีย อินโดลเอมีน หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ อันเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นไม่ดีในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านการยอมรับ (ตารางที่ 4.4) แม้ว่าชนิดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไม่มีผลต่อการยอมรับของผู้ทดสอบในทั้งสองผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ในทุกรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง แต่พบว่าในทุกรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็ง คะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบสูงที่สุดเมื่อใช้แป้ง Mnaf ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งสองคือแป้ง Mnaf แม้ว่าผลิตภัณฑ์ทั้งสองที่มีการผสมแป้ง Mnaf จะมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่เยือกแข็ง และค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการละลายน้ำแข็งในรอบแรกๆ (รอบที่ 0-1) สูงกว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดอื่นๆ แต่ค่าที่พบมีค่าน้อยมากและมีงานวิจัยยืนยันว่าไม่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (สมจิต ประภาเลิศรัศมี, 2539; วรัญญา โชติช่วง, 2542; กมลวรรณ อิศราคาร, 2548)

ตารางที่ 4.13 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	คะแนนเฉลี่ยด้านการยอมรับรวม		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด^{ns}	6.89^{cd}±1.18	7.44^{b}±0.92	7.39^{b}±0.98
0^{ns}	6.67^{bcd}±0.91	6.78^{ab}±0.94	6.56^{a}±0.78
1^{ns}	7.17^{d}±0.86	7.11^{ab}±1.37	6.78^{ab}±1.31
2^{ns}	6.22^{abc}±1.11	6.72^{ab}±0.96	6.44^{a}±1.29
3^{ns}	6.00^{ab}±1.19	6.61^{a}±0.98	6.33^{a}±1.13
4^{ns}	5.89^{a}±0.90	6.50^{a}±1.42	6.33^{a}±1.24

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

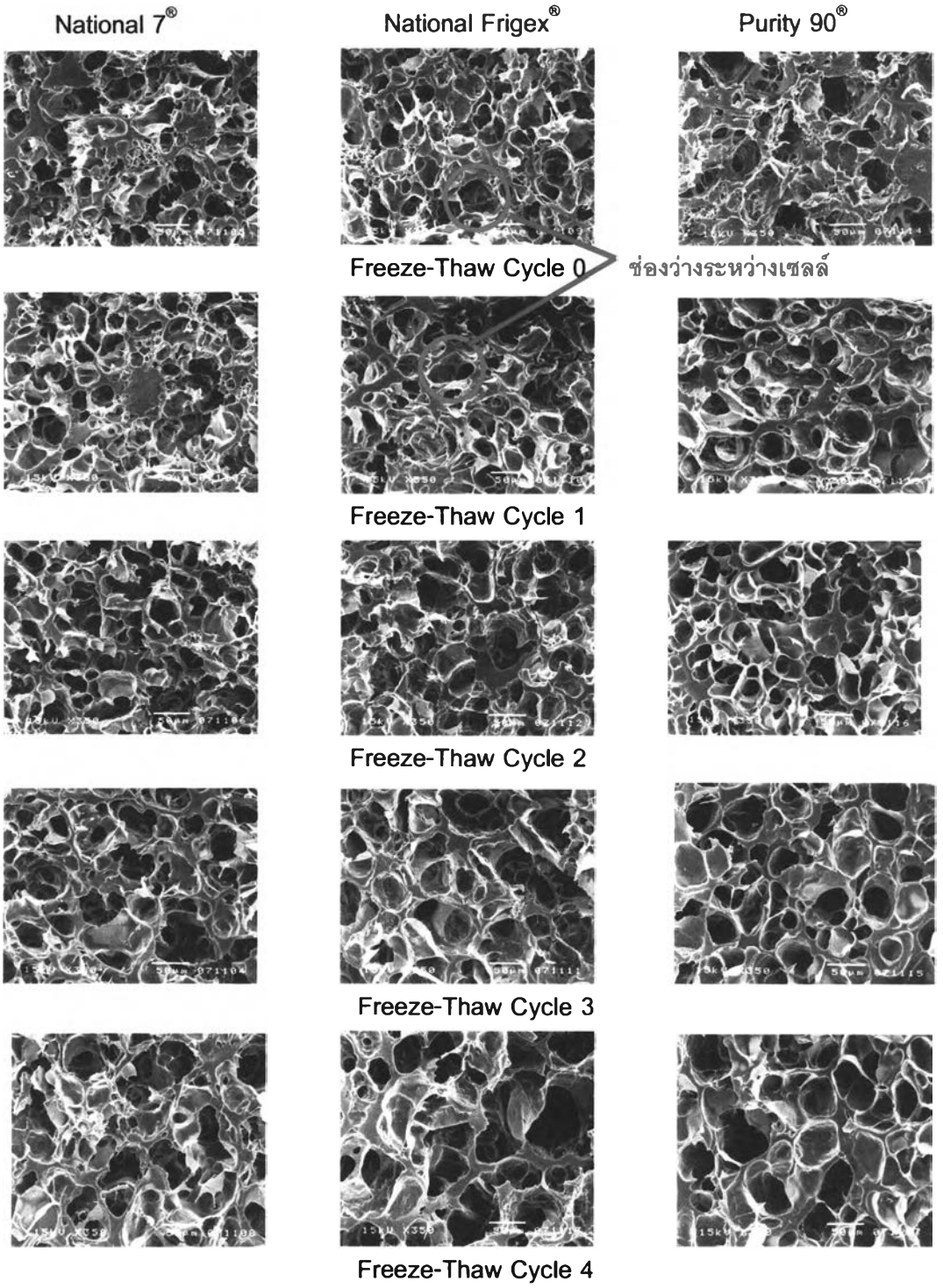
ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.14 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	คะแนนเฉลี่ยด้านการยอมรับรวม		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด^{ns}	6.94^{c}±0.64	7.00^{b}±0.97	6.89^{b}±0.96
0^{ns}	6.67^{c}±1.19	6.72^{b}±0.83	6.39^{b}±1.29
1^{ns}	7.06^{c}±1.06	6.94^{b}±0.80	6.33^{b}±1.24
2^{ns}	5.61^{b}±1.20	6.33^{b}±1.28	5.56^{a}±1.25
3^{ns}	5.17^{ab}±1.20	5.39^{a}±1.14	5.33^{a}±0.97
4^{ns}	4.72^{a}±1.18	4.72^{a}±1.23	4.89^{a}±1.13

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



รูปที่ 4.12 ลักษณะทางเนื้อเยื่อของแผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งด้วยวิธีลมพ่นที่จำนวนรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำต่างๆ เมื่อตัดแผ่นก๋วยเตี๋ยวตามขวางที่กำลังขยาย 350 เท่า

4.5.3 Tensile strength และ Extensibility ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ

จากการวัดค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำ พบว่าชนิดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลต่อค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.15-4.18, ภาคผนวก ค.15-ค.18) เมื่อพิจารณาที่แต่ละรอบของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งพบว่า ผลิตภัณฑ์ทั้งสองที่ผสมแป้ง Mna มีค่า tensile strength ต่ำที่สุด และมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้แป้ง Mnaf ในขณะค่า extensibility ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิดสูงที่สุดเมื่อใช้แป้ง Mnaf (ยกเว้นผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวสดและผ่านการแช่เยือกแข็ง-ละลายน้ำแข็งซ้ำในรอบที่ 3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการผสมแป้ง Mna อย่างไม่มีนัยสำคัญ) และต่ำที่สุดเมื่อใช้แป้ง Mpu (ยกเว้นผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งในรอบที่ 1 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการผสมแป้ง Mna อย่างไม่มีนัยสำคัญ) ซึ่งค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์จากแป้งผสมแป้ง Mnaf ที่ได้มีความสัมพันธ์กับสมบัติทางด้านความหนืดในด้าน peak viscosity และ setback ของแป้งผสม ดังเช่นในงานวิจัยของ Batey และคณะ (1997) และ Bhattacharya และคณะ (1999) แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้ง Mna และ Mpu นั้นอาจเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากสมบัติด้านความหนืดของแป้งผสมทั้งสองชนิดนี้ใกล้เคียงกัน และการผสมแป้งต่างชนิดกันมีผลให้โครงสร้างทางเคมีของแป้งเปลี่ยนแปลงไป (Obanni and BeMiller, 1997) เมื่อพิจารณาผลของการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำพบว่า กระบวนการแช่เยือกแข็ง (รอบที่ 0) มีผลให้ค่า tensile strength ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวจากแป้งผสมแป้ง Mna มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อใช้แป้งผสมแป้ง Mnaf และ Mpu และมีค่า extensibility เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แป้งผสมแป้ง Mna และ Mnaf แต่เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อใช้แป้งผสมแป้ง Mpu เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง (เส้นสด) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cauvain (1998) และ Bárcenas และคณะ (2003) ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะมีความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง และการแช่เยือกแข็งอาจมีผลทำให้เนื้อเยื่อเกิดการเสื่อมสลายทางกลขึ้น เนื้อเยื่อจึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ น้ำจึงเกิดการเคลื่อนที่จากเนื้อ (crumb) สู่ด้านนอก (crust) ของขนมปัง มีผลให้เนื้อขนมปังแข็งขึ้น เมื่อจำนวนรอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำเพิ่มขึ้น ค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็ง และค่า extensibility ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งจะมีแนวโน้ม

ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Redmond และคณะ (2003) ซึ่งพบว่า กระบวนการการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นิ่มเละมากขึ้น นอกจากนี้ Szymońska และ Wodnicka (2005) พบว่าในช่วงการละลายน้ำแข็งจะเกิดการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์เนื่องจากเอนไซม์ที่มีในแป้ง (enzymatic digestibility) ซึ่งมีผลให้โครงสร้างเนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำหลายๆรอบผลิตภัณฑ์จึงนิ่มเละขึ้น และเหนียวน้อยลงเช่นกัน นอกจากนี้ในระหว่างการละลายน้ำแข็ง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ (Peterson, Fanelli, and Gunderson, 1968) เนื้อเยื่อของผลิตภัณฑ์ถูกย่อยสลาย ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นิ่มเละขึ้นและเหนียวน้อยลง ค่า tensile strength และ extensibility จึงลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งนั้น กระบวนการแช่เยือกแข็งและการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งซ้ำมีผลให้ค่า tensile strength และ extensibility ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (เส้นสด) ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งโครงสร้างเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ถูกทำลายเนื่องจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น (Varavinit *et al.*, 2002) ทำให้ส่วนที่เป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวดูดซับน้ำได้ โดยจะดูดน้ำที่เกิดจาก drip loss ของกุ้ง จึงมีผลให้ก๋วยเตี๋ยวนิ่มเละขึ้น เมื่อนำไปวัดค่า tensile strength และ extensibility จึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่า ค่า tensile strength และ extensibility ของทั้งสองผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการแช่เยือกแข็ง แต่การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อใช้แป้ง Mnaf ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งและก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งคือ Mnaf เช่นเดียวกับผลการทดสอบด้านการยอมรับของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.15 ค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	Tensile strength (g/mm^2)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด	2.00^{cA}±0.21	2.34^{cB}±0.90	2.31^{eB}±0.14
0	2.23^{dA}±0.22	2.45^{cA}±0.25	2.35^{eA}±0.22
1	1.90^{cA}±0.17	2.34^{cB}±0.20	2.02^{dA}±0.11
2	1.37^{bA}±0.14	1.91^{bC}±0.14	1.76^{cB}±0.14
3	1.47^{bA}±0.05	1.78^{bC}±0.09	1.45^{bB}±0.12
4	0.32^{aA}±0.05	0.41^{aB}±0.04	0.44^{aB}±0.05

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.16 ค่า Tensile strength ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	Tensile strength (g/mm^2)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด	1.75^{eA}±0.21	2.27^{eB}±0.26	2.19^{eB}±0.13
0	1.49^{dA}±0.14	2.05^{dC}±0.20	1.71^{dB}±0.22
1	1.28^{cA}±0.13	1.63^{cB}±0.17	1.62^{cdB}±0.15
2	1.16^{bcA}±0.11	1.56^{cB}±0.08	1.55^{cB}±0.11
3	1.12^{bA}±0.10	1.41^{bB}±0.12	1.38^{bB}±0.13
4	0.26^{aA}±0.04	0.41^{aC}±0.02	0.35^{aB}±0.04

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.17 ค่า Extensibility ของผลิตภัณฑ์แผ่นก๋วยเตี๋ยวแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	Extensibility (mm)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด	23.95^{cA}±2.61	23.18^{cdA}±3.42	22.31^{eA}±1.06
0	24.65^{dB}±1.34	25.92^{eB}±1.90	23.04^{eA}±1.58
1	23.07^{cAB}±1.84	24.29^{deB}±2.29	21.71^{cdA}±1.71
2	21.16^{bAB}±1.18	21.98^{bcC}±0.99	20.81^{bcA}±1.41
3	20.97^{bA}±1.90	20.76^{bA}±0.90	19.55^{bA}±1.75
4	15.77^{aA}±1.39	18.00^{aB}±1.50	15.72^{aA}±1.56

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.18 ค่า Extensibility ของผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวหลอดไส้กุ้งแช่เยือกแข็งที่รอบการแช่เยือกแข็ง-การละลายน้ำแข็งต่างๆ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่างชนิดกัน

Freeze-thaw cycles	Extensibility (mm)		
	R+T+Mna	R+T+Mnaf	R+T+Mpu
เส้นสด	19.52^{dAB}±1.99	20.61^{cB}±1.93	18.80^{eA}±1.56
0	15.96^{bcA}±1.45	21.14^{cB}±1.98	15.60^{dA}±0.66
1	17.37^{cA}±2.59	21.42^{cB}±1.94	18.29^{eA}±1.16
2	15.56^{bB}±1.36	18.45^{bC}±1.35	13.55^{cA}±1.24
3	12.77^{aA}±1.22	15.63^{aB}±1.42	11.98^{bA}±1.20
4	11.98^{aB}±1.09	15.77^{aC}±1.38	6.41^{aA}±10.59

a, b, c..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

A, B, C..... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)