ผลของการแช่เยือกแข็งและคอนยักกลูโคแมนแนนต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

Effects of Freezing and Konjac Glucomanan on Stability of Frozen Rice Starch Gels

คำนำ

กระบวนถนอมอาหารด้วยการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยคงคุณค่าทางอาหาร รักษากลิ่น รส และสีของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะสิ่งสำคัญสองประการ คือ การใช้อุณหภูมิต่ำกับการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ปริมาณวอเตอร์แอคติวิตี้ (water activity) จึงลดลง ทำให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารลงด้วย (รุ่งนภา, 2535; Blond and Meste, 2004) สำหรับในอาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบนั้น การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส (texture) ของผลิตภัณฑ์เกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (starch retrogradation) ทำให้เกิดโครงสร้างฟองน้ำ (spongy structure) และการแยกตัวของน้ำ (syneresis) (Jeong and Lim, 2003; Varavinit *et al.*, 2000)

มีงานวิจัยจากหลายกลุ่มพบว่าการอัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) และการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในเจลสตาร์ชล้วนส่งผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน และการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในระบบเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง (Ferrero and Zaritzky, 2000; Lee *et al.*, 2002) โดยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมีประสิทธิภาพไปลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช การแยกตัวของน้ำ และการเกิดโครงสร้างฟองน้ำได้ดีกว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (Ferrero *et al.*, 1994; Ferrero and Zaritzky, 2000) ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์นั้นสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด (Shi and BeMiller, 2002; Rojas *et al.*, 1999) เนื้อสัมผัส (Mandala *et al.*, 2002) และกำลังการพองตัวของสตาร์ชได้ (Chaisawang and Suphantharika, 2005; Mandala and Bayas, 2004) นอกจากนี้แล้วอุณหภูมิการเก็บรักษาก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งอีกด้วย (Ferrero *et al.*, 1994)

สตาร์ชข้าวจัดเป็นสตาร์ชที่มีคุณภาพดี เนื่องจากแกรนูลมีขนาดเล็กสม่ำเสมอ และไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ที่แปลกปลอม (bland flavor) เมื่อนำไปเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร (Lumdubwong and Seib, 2000) อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่ผลิตได้ในประเทศไทย แต่เจลสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสในระดับปานกลางถึงสูง เมื่อนำไปแช่เยือกแข็งมักประสบปัญหาการแยกตัวของน้ำ และการเกิดโครงสร้างฟองน้ำระหว่างการเก็บรักษา (Juliano, 1985;

Varavinit *et al.*, 2000) เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงต่อเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง ซึ่งไฮโดรคอลลอยด์ที่เลือกใช้คือ คอนยักกลูโคแมนแนน โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ (Khanna and Tester, 2005) อีกทั้งยังช่วยลดการแยกของน้ำในระบบเจลสตาร์ชที่เก็บรักษาไว้ ณ อุณหภูมิแช่เย็นได้ดี (Yoshimura *et al.*, 1988, 1996) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่พบผู้ศึกษาเกี่ยวกับ การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนลงในระบบของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง สำหรับในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 3 ระดับ (0.0%, 0.3% และ 0.5%) ลงในระบบของเจลสตาร์ชข้าว แล้วแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ (แบบช้า ปานกลาง และเร็ว) จากนั้นเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ ซึ่งหากการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดปัญหาต่าง ๆ ของระบบสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งลงได้ โดยไม่ต้องเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งก็จะช่วยให้ลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งที่มีสตาร์ชข้าวหรือแป้งข้าวเป็นองค์ประกอบได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง การเติมคอนยักกลูโคแมนแนน และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อการแยกของน้ำออกจากเจล การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างฟองน้ำและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง

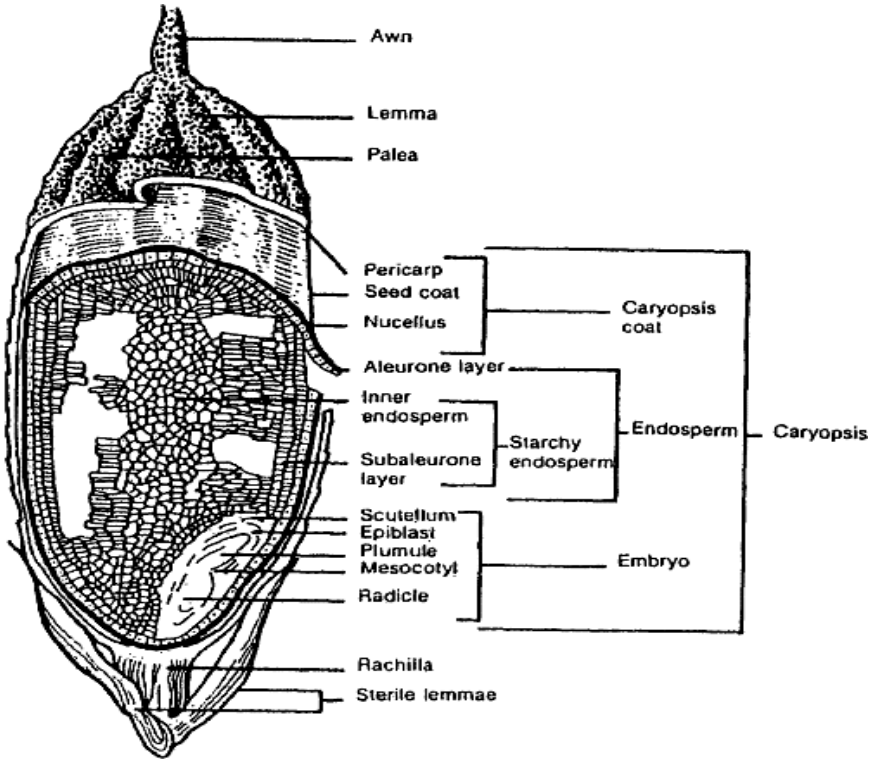
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของเจลสตาร์ชข้าวระหว่างการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษา

การตรวจเอกสาร

1. สตาร์ช

1.1 สตาร์ชข้าว

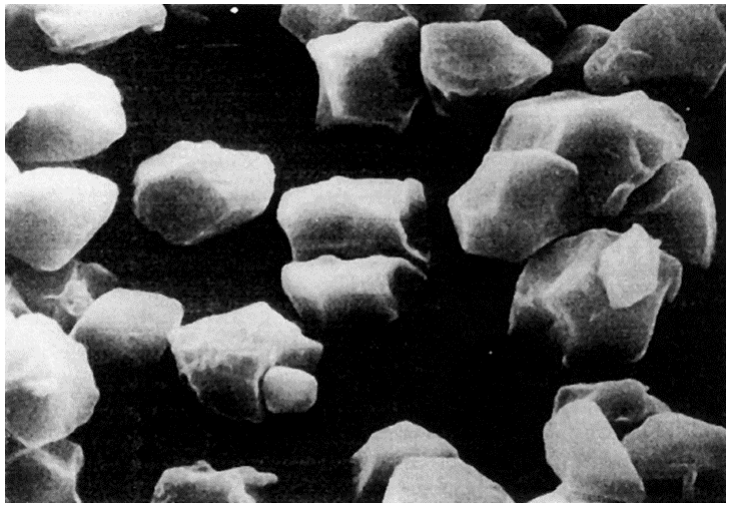
เมล็ดข้าวจะมีเปลือกแข็งหุ้มเรียกว่าเปลือกหรือแกลบประมาณ 16-28% (hull หรือ hush) ถัดเข้าไปจะเป็นชั้นผนังรังไข่ (pericarp) ประมาณ 1-2%, ชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (aleurone) กับชั้นใต้ของเยื่อหุ้มเมล็ด (subsleurone) ประมาณ 4-6%, เนื้อเมล็ด (endosperm) ประมาณ 89-94% และคัพภะ (embryo) ประมาณ 2-3% (ดังภาพที่ 1) โดยเมล็ดข้าวจะมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักและส่วนประกอบสำคัญอื่น ๆ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และไฟเบอร์ โดยบริเวณชั้นใต้ของเยื่อหุ้มเมล็ดจะมีโปรตีนและไขมันอยู่มาก นอกจากนี้แล้วแอมิโลพลาสยังมีขนาดเล็กกว่า และเม็ดสตาร์ชจะอยู่ในลักษณะรวมกลุ่มกันมากกว่าชั้นของเนื้อเมล็ด (Zhou *et al.*, 2002)



ภาพที่ 1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา : Zhou *et al.* (2002)

แป้งข้าวผลิตจากการนำข้าวมาผ่านกระบวนการขัดสี เอาส่วนของเปลือกและชั้นของรำ (bran layers) ออกไป แล้วนำไปผ่านกระบวนการโม่ สัดส่วนของโปรตีนและไขมันจึงลดลง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ในชั้นของรำ ในขณะที่สัดส่วนของสตาร์ชนั้นเพิ่มขึ้น เพราะส่วนใหญ่อยู่ในชั้นของเนื้อเมล็ด (Perdon *et al.*, 2001) โดยสตาร์ชข้าวผลิตได้จากนำแป้งข้าวไปผ่านกระบวนการสกัดสตาร์ช (starch isolation) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก-ไซด์ หรือ การใช้เอนไซม์ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อกำจัดส่วนของโปรตีนที่อยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ชออกไปจนได้สตาร์ชข้าวมีความบริสุทธิ์ (Lumdubwong and Seib, 2000) ซึ่งปริมาณโปรตีนในสตาร์ชข้าวนั้นไม่ควรเกิน 0.5% ของน้ำหนักสตาร์ช (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2543)

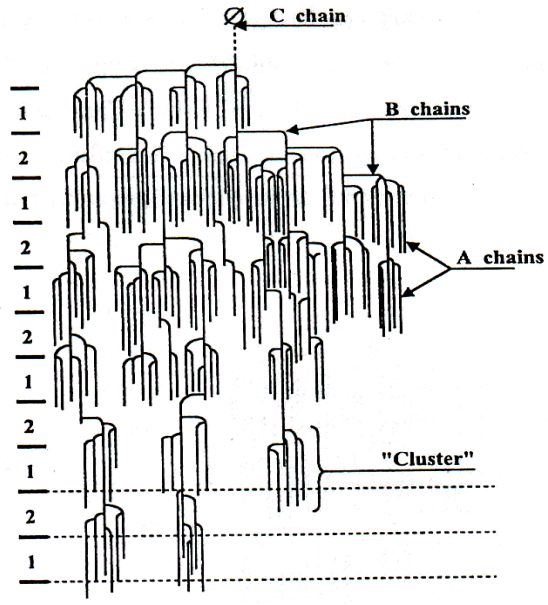


ภาพที่ 2 ภาพเม็ดสตาร์ชข้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (5000X)
ที่มา : Zhou *et al.* (2002)

สตาร์ชข้าวนั้นเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90 ในข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว ส่วนองค์ประกอบอื่นที่สำคัญในข้าว ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งในบรรดาเมล็ดพืชจากธัญชาติ สตาร์ชข้าวจัดว่ามีขนาดแกรนูลเล็กที่สุด คือยู่ในช่วงประมาณ 3-8 ไมครอน ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมรูปร่างไม่แน่นอน (ดังภาพที่ 2) โดยเม็ดสตาร์ชสามารถอยู่รวมกลุ่มกันจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากได้ถึง 150 ไมครอน (Zhou *et al.*, 2002) และสตาร์ชข้าวมีข้อดีอยู่หลายประการ คือ เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็ก ขนาดเม็ดค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดกลิ่นรสที่แปลกปลอม (bland flavor) เมื่อนำไปเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร และก่อให้เกิดอาการแพ้ต่ำกว่าสตาร์ชจากแหล่งอื่น ๆ (Alexander, 1995; Lumdubwong and Seib, 2000) นอกจากนี้ในปัจจุบันทั่วโลกสามารผลิตสตาร์ชข้าวได้ปีละประมาณ 25,000 เมตริกตัน

(Champagne, 1996) โดยประเทศไทยเราเป็นผู้ผลิตข้าวรายใหญ่ของโลก จึงมีโอกาสในการผลิตสตาร์ชข้าว และนำเอาสตาร์ชข้าวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารมากกว่าประเทศอื่นด้วย

สตาร์ชประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสต่อกันเป็นสายที่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน โดยแอมิโลสเป็นสายตรงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคสิดิก อาจมีกิ่งแขนงบ้างประมาณ 1% แตกต่างกันไปตามชนิดและแหล่งที่มาของสตาร์ช (Tester and Karkalas, 2002) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^5 - 10^6 ดาลตัน ส่วนแอมิโลเพกทินที่มีสายตรงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4-กลูโคสิดิก และมีพันธะแอลฟา-1,6-กลูโคสิดิกเป็นกิ่งก้าน โดยมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน (Biliaderis, 1998) โดยในปี 1992 Juliano ได้แบ่งสตาร์ชข้าวออกเป็น 4 กลุ่มตามปริมาณแอมิโลสเป็นดังนี้คือ (1) ปริมาณแอมิโลส 0-2% จัดเป็นสตาร์ชข้าวเหนียว (2) ปริมาณแอมิโลส 5-12% จัดเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (3) ปริมาณแอมิโลส 20-25% สตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง (4) ปริมาณแอมิโลส 25-33% จัดเป็นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง

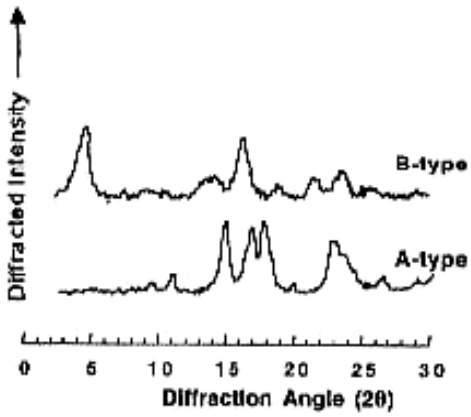


<u>ภาพที่ 3</u> ลักษณะโครงสร้างของแอมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน (1 = ส่วนผลึก และ 2 = ส่วนอสัณฐาน)

ที่มา : Robin *et al.* (1974)

ลักษณะการอยู่รวมกันของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินในเม็ดสตาร์ช ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่สันนิษฐานว่าการจัดเรียงตัวของสายแอมิโลเพกทิน ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึก (crystalline

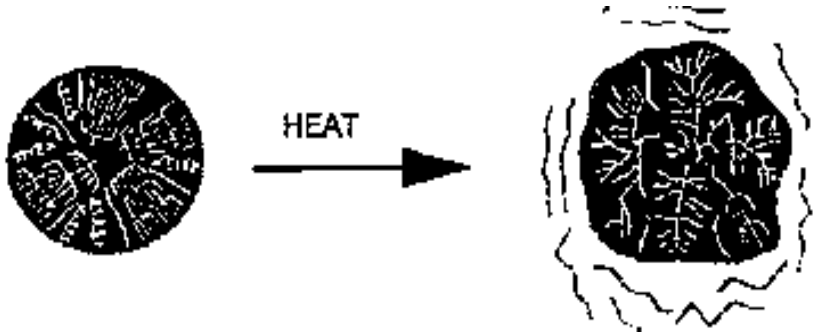
region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ดังภาพที่ 3 ซึ่งสายในโมเลกุลของแอมิโลเพกทินสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ สาย A (A-chains) เป็นสายที่ไม่มีกิ่งก้านและเกาะกับโมเลกุลอื่นผ่านทางปลายหมู่รีดิวซ์ สาย B (B-chains) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลอื่นด้วยวิธีการเดียวกับสาย A และมีสาย A มาเชื่อมเกาะด้วย 1 จุดหรือมากกว่า ส่วนสาย C (C-chain) เป็นสายแกนของโมเลกุลโดยมีหมู่รีดิวซ์อยู่ที่ปลายของโมเลกุล (Champagne, 1996) ซึ่งสายสั้น (A และ B-chains) มีความยาวสาย (chain length) 14-18 หน่วยกลูโคส ส่วนสายยาว (C-chain) มีความยาวสาย 45-55 หน่วยกลูโคส สัดส่วนของสายสั้นและสายยาวอยู่ระหว่าง 3 : 1 ถึง 12 : 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสตาร์ช โดยสตาร์ชจากธัญพืชจะมีความยาว (ทั้งส่วนของสายสั้นและสายยาว) สั้นกว่า และส่วนของสายสั้นจะมีจำนวนมากกว่าสตาร์ชจากพืชหัว (Biliaderis, 1998) สำหรับสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสเพกทินมีความยาว DP (degree of polymerization) อยู่ระหว่าง 6-9 และ DP มากกว่า 25 ทำให้ความเป็นผลึกของสตาร์ชลดลง ส่วนโมเลกุลแอมิโลสที่มี DP อยู่ระหว่าง 12-22 จะทำให้โครงร่างผลึกของสตาร์ชเพิ่มขึ้น (Vandeputte *et al.*, 2003) และเนื่องจากความเป็นผลึก (crystallinity) ของโครงสร้าง ทำให้เกิดสามารถเกิดการเลี้ยวเบนรังสี-เอกซ์ (X-ray Diffraction) ได้ โดยข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะให้การเลี้ยวเบนเป็นแบบเอ (A-type) เช่นเดียวกันกับสตาร์ชอื่น ๆ จากธัญชาติ (cereal starch) ส่วนสตาร์ชจากพืชหัว (tuber starch) เช่น มันสำปะหลังจะให้การเลี้ยวเบนเป็นแบบบี (B-type) (Tester and Karkalas, 2002) (ดังภาพที่ 4) เป็นต้น



<u>ภาพที่ 4</u> รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A และ B
ที่มา: Buléon *et al.* (1998)

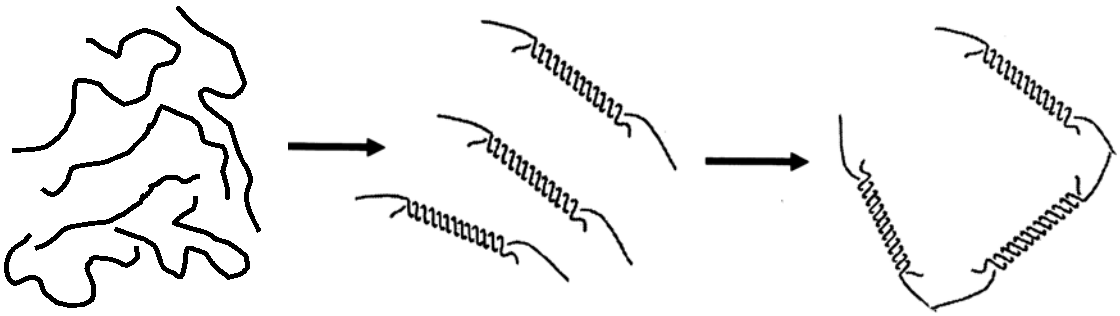
1.2 การเกิดเจลาทิไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากโครงสร้างความเป็นผลึกของสตาร์ชดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้เม็ดสตาร์ชละลายได้ยากเมื่ออยู่ในน้ำเย็น โดยเมื่อกวนเม็ดสตาร์ชก็จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้เม็ดสตาร์ชก็จะกลับมาตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายในสภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ พันธะไฮโดรเจนก็จะเริ่มคลายตัวลงเม็ดแป้งจะค่อย ๆ ดูดน้ำและพองตัวขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิเจลาทิไนเซชัน (gelatinization temperature) ความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเม็ดสตาร์ชก็จะพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ หากตรวจสอบโดยผ่านแสงโพลาไรซ์ (polarized light) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ก็จะไม่พบลักษณะกากบาท (birefringence) บนเม็ดสตาร์ช เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลายทำให้สูญเสียโครงร่างความเป็นผลึก (crystallinity) ที่มีอยู่เดิม (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543; Tester and Morrison, 1990; Whistler and Bemiller, 1999) หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสจึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ (Tester, 1997) นอกจากนี้แอมิโลสและแอมิโลเพกทินสายสั้นบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ดังนั้นในระบบจึงประกอบไปด้วยเม็ดสตาร์ชที่พองตัวโดยมีโครงร่างของแอมิโลเพกทิน (swollen granules with amylopectin skeleton) ละลายอยู่ในสารละลายแอมิโลส (ดังภาพที่ 5) ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้กว่า การเกิดเจลาทิไนเซชัน (gelatinization) (Morris, 1990) สำหรับอุณหภูมิเจลาทิไนเซชันของสตาร์ชข้าวอยู่ในช่วง 61-78 °ซ (Newport Scientific Ltd., 1995) โดยสตาร์ชข้าวเหนียว (waxy rice starch) จะมีอุณหภูมิเจลาทิไนเซชันต่ำกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า (non waxy rice starch) (Juliano, 1985)



ภาพที่ 5 การเกิดเจลาทิไนเซชันของสตาร์ช
ที่มา: Murphy (2000)

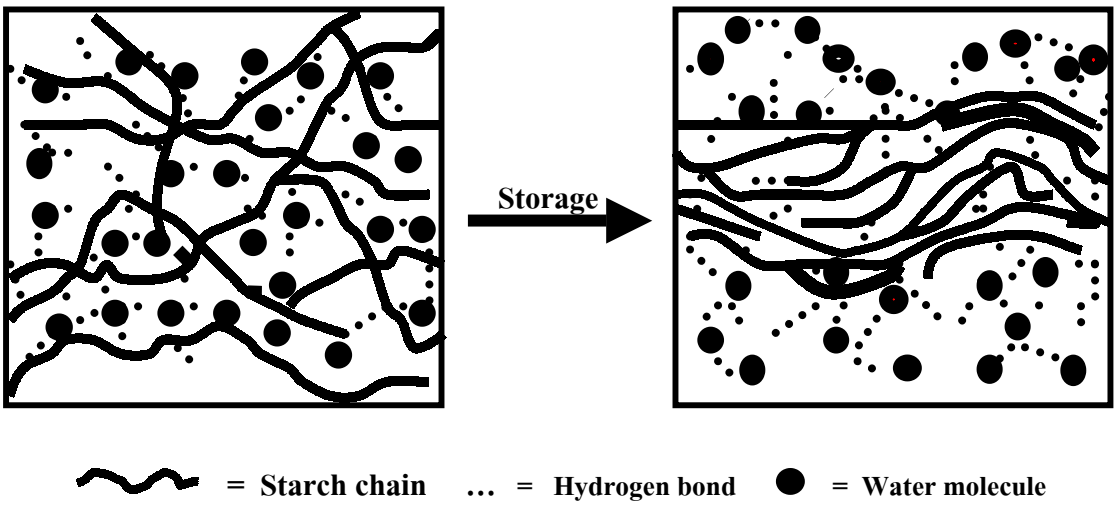
เมื่อสารละลายน้ำแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงเปลี่ยนจากลักษณะของสารแขวนลอยไปเป็นแป้งเปียก (starch paste) แป้งเปียกจากเม็ดสตาร์ชนี้จัดเป็นพวกซอล (sol) ซึ่งหมายถึงของผสมที่มีของแข็งเป็นวัฏภาคกระจาย (disperse phase) และมีวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) เป็นของเหลวหรือแก๊ส (ณรงค์, 2538) โดยถ้าแป้งเปียกมีความเข้มข้นเพียงพอ (critical concentration for gelation) เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินที่กระจายตัวอยู่ในแป้งเปียกก็จะเริ่มเคลื่อนตัว โดยมีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ โมเลกุลจะค่อย ๆ เกิดการพันเกลียวกัน (double helix formation) จากนั้นเส้นสายโมเลกุลก็จะเกิดการเชื่อมต่อกัน (chain elongation) เป็นโครงร่างสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ในระบบได้ (ดังภาพที่ 6) ซึ่งเรียกโครงสร้างของระบบคอลลอยด์ที่ไม่แสดงการไหลนี้ว่าเจล และเรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดเจล (gelation) (ปาริฉัตร, 2545; Morris, 1990)



<u>ภาพที่ 6</u> การเกิดเจลของสตาร์ช
ที่มา: ดัดแปลงจาก Morris (1990)

สำหรับการเกิดเจลนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) โดยคำว่ารีโทรเกรเดชันนี้ ใช้สำหรับอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทิไนเซชัน ในช่วงของการลดอุณหภูมิลงและช่วงการเก็บรักษา (Fredriksson *et al*., 1998) โดยการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชระหว่างการเก็บรักษา (ดังภาพที่ 7) จะเห็นว่าเจลสตาร์ชจากเดิมที่สามารถอุ้มน้ำไว้ในระบบได้ เมื่อสายโมเลกุลของสตาร์ชเคลื่อนตัวเข้าใกล้กันและความหนาแน่นของผลึกที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เนื้อสัมผัสเกิดการเปลี่ยนแปลงเจลเกิดการหดตัว ความแน่นแข็ง (rigidity) เพิ่มสูงขึ้น จนในที่สุดโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่ภายในระบบก็จะถูกบีบออกมา ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดการแยกส่วน (phase separation) ของสารละลายกับพอลิเมอร์นี้ว่า syneresis (Munzing, 1991; Biliaderis, 1998) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชนั้นมีอยู่หลายประการอันได้แก่ อัตราส่วนโมเลกุลของแอมิโลสต่อแอมิโลเพกทิน ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล อุณหภูมิในการเก็บรักษาเจล ปริมาณน้ำหรือความเข้มข้นของ

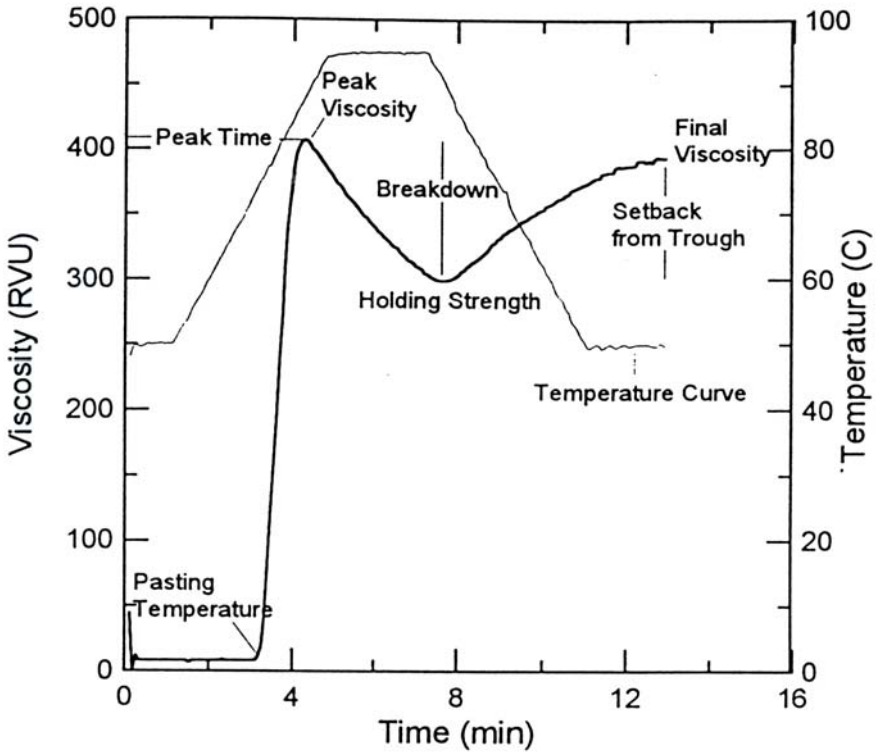
สตาร์ช เป็นต้น (Gudmundsson, 1994; Whistler and BeMiller, 1999) สำหรับในแป้งข้าว การเกิดรีโทรเกรเดชันขึ้นอยู่กับชนิดเมล็ด สายพันธุ์ และปริมาณแอมิโลส เป็นต้น โดยแป้งข้าวจากข้าวพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดกลางและแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะมีอัตราการเกิดรีโทรเกร-เดชันต่ำกว่าข้าวพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดยาว (Fan and Marks, 1998)



ภาพที่ 7 การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช
ที่มา: ดัดแปลงจาก Munzing (1991)

1.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดและกำลังการพองตัวของสตาร์ช

การตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชนั้น โดยทั่วไปนิยมตรวจสอบด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ การให้ความร้อนและดึงความร้อนออกจากระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีความคงที่ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยเครื่องมือนี้จะตรวจสอบสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งระหว่างการให้ความร้อน จนถึงขั้นตอนการทำให้เย็น และติดตามผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเรียกสมบัติการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า pasting properties โดยผลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้คาดคะเนถึงสมบัติการเจลาทิไนเซชัน และรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดได้ (Newport Scientific Ltd., 1995)



ภาพที่ 8 ค่าความหนืด อุณหภูมิ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA
ที่มา: Newport Scientific Ltd. (1995)

จากภาพที่ 8 ค่าความหนืด อุณหภูมิ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA แกน x เป็นเวลา ส่วนแกน y จะมีสองข้างโดยแกนข้างซ้ายเป็นค่าความหนืด มีหน่วยเป็น RVU ส่วนแกนด้านขวาเป็นอุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยของสตาร์ช (starch suspension) ในสภาวะที่มีการกวนภายใต้แรงเฉือน (shear force) ค่าความหนืดของสตาร์ชจะเปลี่ยนไป โดยเมื่อได้รับความร้อนเม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำ พองตัว และขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบ ๆ จึงเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากและเกิดความหนืดขึ้น ซึ่งเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า pasting temperature และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นและกวนต่อไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าความหนืดสูงสุด ซึ่งจะเรียกจุดนี้ว่า peak viscosity เมื่อเม็ดสตาร์ชจะพองตัวเต็มที่แล้ว พอเพิ่มอุณหภูมิต่อไปพร้อมทั้งมี การกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายนอกแตกออก ความหนืดจึงลดลง โดยเมื่อนำค่าความหนืดสูงสุดลบกับค่าความหนืดต่ำสุด (trough) จะได้เป็นค่าความหนืดลดลง (breakdown) และเมื่อดึงความร้อนออกจากระบบ ทำให้อุณหภูมิลงลงก็จะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ทำให้ความหนืดกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งความหนืดที่จุดสุดท้ายนี้เรียกว่าค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ส่วนค่าเซตแบค (setback) ได้จาก ผลต่างของค่าความ

หนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดต่ำสุด (Frederick Meadows, 2002; Newport Scientific Ltd., 1995) ซึ่งค่าเซตแบคนี้สามารถใช้ในการคาดคะแนถึงแนวโน้มการเกิดรีโทร-เกรเดชันของสตาร์ชได้ (Karim *et al*., 2000)

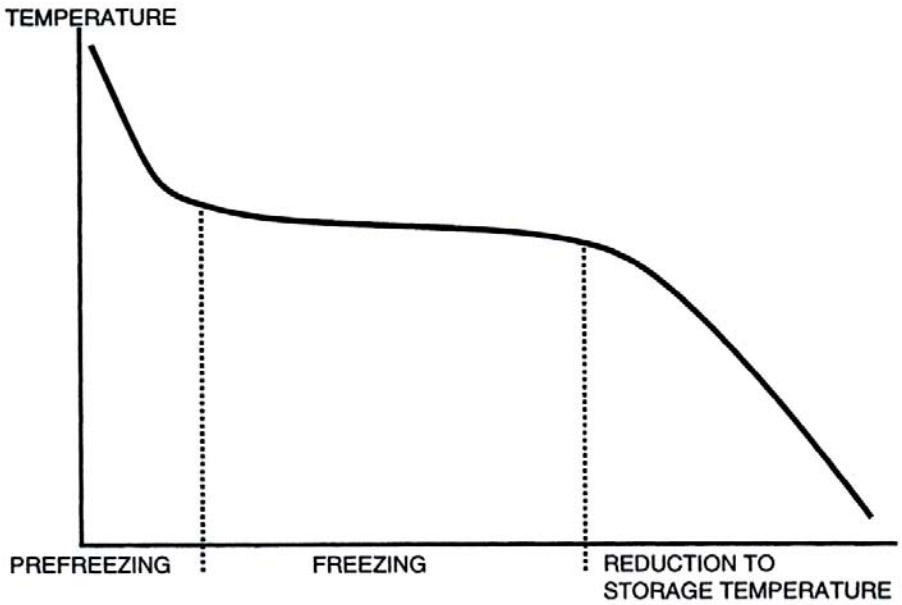
ส่วนกำลังการพองตัว (swelling power) หมายถึง ปริมาตรหรือน้ำหนักของแป้งที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิหนึ่งที่ให้กับสารละลายสตาร์ช (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2543) โดยTakahashi and Seib (1988) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 60 °ซ เม็ดสตาร์ชจึงถูกจำกัด การพองตัวเนื่องจากแอมิโลสจับอยู่กับไขมันในสตาร์ช แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 °ซ การพองตัวของเม็ดสตาร์ชเกิดได้ดี เนื่องจากผลึกเกิดการหลอมเหลว นอกจากนี้ Tester and Morrison (1990) พบว่าการพองตัวของเม็ดสตาร์ชจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงแรกที่ให้ความร้อน (ประมาณ 5 ถึง 10 นาที) จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติด้านความหนืด และกำลังการพองตัวนั้นมีอยู่หลายอย่างได้แก่ ชนิดและปริมาณของโปรตีน ลิปิด ปริมาณแอมิโลส และการดัดแปลงสตาร์ชทางเคมี เป็นต้น (Leach *et al*., 1959; Limpisut and Jindal, 2002; Chung *et al*., 2002) ทั้งนี้สตาร์ชที่มีแอมิโลเพกทินสูงส่วนใหญ่มีอุณหภูมิที่เริ่มทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงและเซตแบคต่ำกว่าสตาร์ชปกติ และมีค่าความหนืดสูงสุดมากกว่า เนื่องจากแอมิโลเพกทินสามารถพองตัวได้ดี และไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสกับ ลิปิดที่จะไปยับยั้งการพองตัว อีกทั้งไม่สามารถเกิดเจลได้ จึงมีค่าเซตแบคต่ำ (Jane *et al*., 1999)

2. การแช่เยือกแข็ง

2.1 หลักของการแช่เยือกแข็ง

การยืดอายุผลิตภัณฑ์อาหารมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การใช้ความร้อน การทำแห้ง การหมัก การใช้ความเย็น การฉายรังสี เป็นต้น สำหรับการแช่เยือกแข็งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยการแช่เยือกแข็งเกี่ยวข้องกับสองกระบวนการ คือ การใช้อุณหภูมิต่ำกับการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ทำให้ปริมาณวอเตอร์แอคติวิตี้ (water activity) ในอาหารลดลง ดังนั้นเมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส ทำให้สามารถลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์และการเสื่อมเสียอันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ลงได้ นอกจากนี้การที่น้ำในระบบเปลี่ยนผลึกน้ำแข็งยังช่วยให้อัตราของปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารลดลงด้วย จึงสามารถรักษาคุณภาพและคุณค่าของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าการแช่เยือกแข็งจะทำให้ปฏิกริยาทางเคมีและกายภาพส่วนใหญ่ลดต่ำลงได้เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิ แต่ปฏิกริยาต่าง ๆ ไม่ได้หยุดลงทั้งหมด ดังนั้นระหว่างการเก็บรักษาก็ยังคงเกิดการเสื่อมลงของผลิตภัณฑ์ขึ้นอย่างช้า ๆ (รุ่งนภา, 2535; Blond and Meste, 2004) นอกจากนี้คุณภาพของอาหารแช่เยือกแข็งยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ ได้แก่ องค์ประกอบวัตถุดิบ พื้นที่ผิวของอาหาร การเตรียมวัตถุดิบก่อนการแช่เยือกแข็ง วิธีการแช่เยือกแข็ง อัตราเร็วในการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิการเก็บรักษา เป็นต้น (ไพบูลย์, 2532)

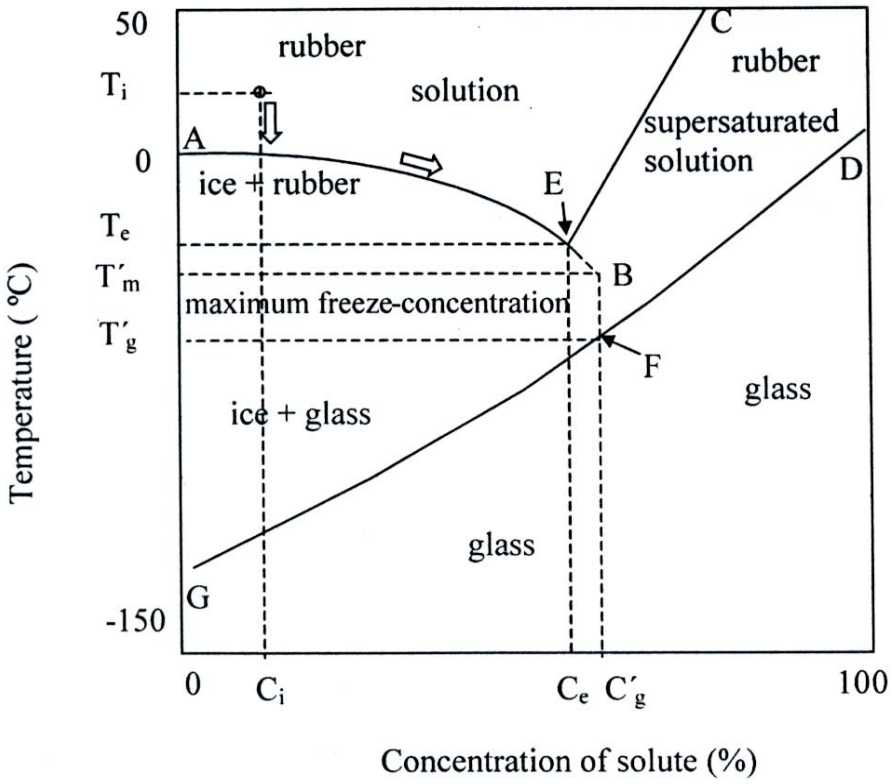
International institute of refrigeration (IIR) ได้แบ่งกระบวนการแช่เยือกแข็งออกได้เป็น 3 ขั้น (ดังภาพที่ 9) คือ ขั้นที่ 1 ขั้นก่อนการแช่เยือกแข็ง (prefreezing stage) เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ที่ระบบมีอุณหภูมิสูงไปจนถึงน้ำแข็งในระบบเริ่มเกิดผลึก ขั้นที่ 2 ขั้นการแช่เยือกแข็ง (freezing stage) เป็นช่วงที่ความร้อนถูกดึงออกจากระบบ ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็ง และขั้นที่ 3 ขั้นตอนการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิการเก็บรักษา (reduction to storage temperature) เป็นช่วงที่ระบบมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งเริ่มจากอุณหภูมิที่ระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุด ไปจนถึงจุดที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ (รวมถึงอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางด้วย) หรืออุณหภูมิที่ระบบไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมอีก (Persson and Londahl, 1993)



ภาพที่ 9 แผนภาพกระบวนการแช่เยือกแข็ง
ที่มา: Heldman and Taylor (1997)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและอุณหภูมิ โดยระหว่างการเก็บรักษานั้น ความคงตัวของระบบจะคงอยู่ได้ในสภาวะกลาส (glassy state) ทำให้สามารถจำกัดการแพร่ของตัวถูกละลาย (diffusion of solute) และปฏิกริยาต่าง ๆ ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพลดลงได้ (degradation reactions) อย่างมาก ซึ่งโดยหลัก ๆ แล้วอายุการเก็บรักษา (shelf life) ของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นถูกควบคุมโดยส่วนของเหลวที่เข้มข้น (freeze-concentrated) ซึ่งเกิดจากการที่น้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำแข็ง ดังนั้นจึงต้องเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่เยือกแข็ง (Blond and Meste, 2004) ดังภาพที่ 10 แผนภาพอธิบายการเปลี่ยนสถานะ (phase diagram) สำหรับระบบอาหาร โดย AB คือ เส้นการแช่เยือกแข็ง (freezeing curve), CE คือ เส้นการละลาย, E คือ Eutectic point ซึ่งจุดนี้เป็นจุดอิ่มตัวของ freeze-concentrated โดยเมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีก (ต่ำกว่า T_e) จะเริ่มเกิดผลึกของตัวถูกละลายร่วมด้วย

กลาสทรานซิชัน (glass transition) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสภาวะทางกายภาพของสารจากสภาวะกลาสไปเป็นสภาวะรับเบอรี ส่วนอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในระบบแช่เยือกแข็ง (glass transition temperature, T_g') คือ อุณหภูมิที่ระบบเกิดผลึกน้ำแข็งมากที่สุดและทำให้ส่วนที่ไม่เป็นน้ำแข็งมีความหนืดมากที่สุด (Roos, 1995b; Roos and Karel, 1991)

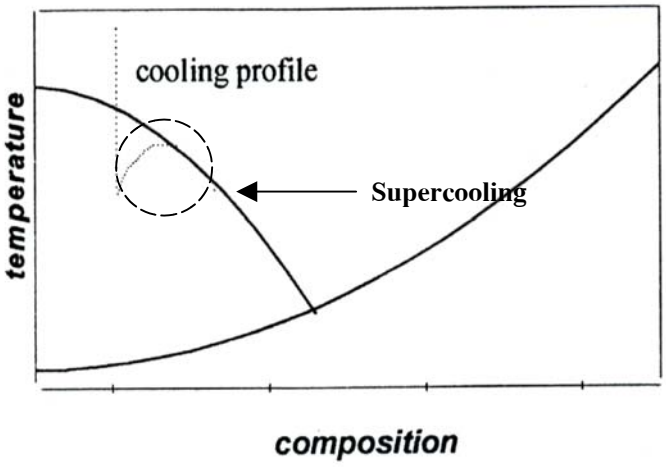


<u>ภาพที่ 10</u> แผนภาพอธิบายการเปลี่ยนสถานะ (phase diagram)
ที่มา: Chanes *et al.* (2004)

จากภาพที่ 10 เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลง น้ำในระบบจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นน้ำแข็งตามเส้น AB ทำให้สารละลายจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่า T_g คือ เมื่อน้ำในระบบลดลง ค่า T_g จะสูงขึ้นตามเส้น DFG จนถึงจุดที่ส่วนเยือกแข็งมีความเข้มข้นสูงที่สุด (C_g') ซึ่งอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ในระบบแช่เยือกแข็ง ณ จุดนี้ก็คือ T_g' เมื่อพิจารณาใต้เส้น DFG (glass transition curve) ระบบจะอยู่ในสภาวะกลาส (glass state or amorphous solid) โดยความเข้มข้นจากการแช่เยือกแข็งสูงสุด (maximium freeze-concentration) จะอยู่เหนือ T_g' (glass transition temperature) แต่ต่ำกว่า T_m' (onset temperature of ice melting) ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นที่ความเข้มของส่วนเยือกแข็งสูงสุด (maximally freeze-concentrated glass) เกิดการหลอมเหลว (Goff, 1997; Blond and Meste, 2004) และเหนือเส้น DFG ระบบจะอยู่ในสภาวะรับเบอรี ซึ่งการเปลี่ยนจากสภาวะกลาสไปสู่สภาวะรับเบอรี จะให้ความหนืดของระบบจะลดลงอย่างมาก (Christel *et al.*, 1995) เพราะสภาวะรับเบอรีนี้ระบบจะมีพลังงานเพิ่มขึ้น โมเลกุลจึงมีการเคลื่อนไหว ทำให้เกิดนิวเคลียสของ

ผลึกและการโตของผลึก จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Roos, 1995a)

อัตราการแช่เยือกเยือกแข็ง (freezing rate) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบ แช่เยือกแข็ง ซึ่งมีคำนิยามที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของขนาดตัวอย่าง ความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ เช่น อัตราการแช่เยือกแข็ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อหน่วยเวลา หรือหมายถึงเวลาที่ผ่านไปในช่วงอุณหภูมิกำหนดหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีความหมายอื่น ๆ อีก เช่น ลักษณะของแนวน้ำแข็ง ตำแหน่งของผลึกน้ำแข็งและปริมาณน้ำแข็งที่เกิดขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักต่อหน่วยเวลา (ไพบูลย์, 2532) ซึ่ง IIR ได้แบ่งอัตราการแช่เยือกแข็งไว้ดังนี้ (1) 0.2-0.5 ซม./ชม. จัดเป็น slow freezing (2) 0.5-3.0 ซม./ชม. จัดเป็น quick freezing (3) 5-10 ซม./ชม. จัดเป็น rapid freezing และ (4) 10-100 ซม./ชม. จัดเป็น ultra rapid freezing (Ferrero *et al.*, 1994) สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารบางอย่างต้องการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กจำนวนมาก และก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อสัมผัส (texture) ต่อผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด แต่ในบางผลิตภัณฑ์อัตราการแช่เยือกแข็งอาจไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และในบางผลิตภัณฑ์อาจไม่เหมาะสมต่อการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็ว (รุ่งนภา, 2535)



ภาพที่ 11 แผนภาพลักษณะการแช่เยือกแข็ง
ที่มา: Reid (1997)

เนื่องจากกระบวนการแช่เยือกแข็งนั้นเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยความร้อนออกจากระบบ เพื่อให้ระบบมีอุณหภูมิลดลง โดยความร้อนที่ปลดปล่อยออกมานี้คือ ความร้อนจำเพาะ (spcecific heat) ที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของอุณหภูมิ และความร้อนแฝง (latent heat) ที่

เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งความร้อนทั้งสองรูปแบบล้วนมีความสัมพันธ์กับกลไกของการเปลี่ยนแปลงสถานะ และโดยเฉพาะความเกี่ยวข้องกับการเกิดผลึก (nucleation) และการโตของผลึก (crystal growth or propagation) (Reid, 1997) จากภาพที่ 11 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิจะลดลงต่ำ (supercooling) และไม่ยังมีการเกิดผลึกในระบบ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดที่เริ่มมีผลึกเกิดขึ้นมีการคายความร้อนออกมา จึงทำให้อุณหภูมิกลับมาเพิ่มสูงขึ้น โดยถ้าใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วมาก จนทำให้ระบบสามารถปลดปล่อยความร้อนออกมาได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่พบลักษณะ supercooling อีกทั้งการเกิดผลึกอย่างรวดเร็วนี้ จะทำให้ได้ผลึกน้ำแข็งจำนวนมากและมีขนาดเล็กอีกด้วย (รุ่งนภา, 2535; Reid, 1997)

สำหรับระหว่างการเก็บรักษา และการขนย้ายอาหารแช่เยือกแข็งในทางการค้านั้น โดยทั่ว ๆ ไป แนะนำให้เก็บได้ที่อุณหภูมิ -18 °ซ เพราะเหตุผลด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง แต่เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอุณหภูมิระดับนี้ต้องใช้พลังงานอย่างมาก อีกทั้งยังมีประชากรจำนวนมากที่อาศัยอยู่ในแถบเขตร้อน จึงเป็นการยากที่จะทำตามกฎเกณฑ์ดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงยอมให้เก็บอาหารแช่เยือกแข็งระหว่างการขนย้ายไว้ที่อุณหภูมิ -12 °ซ ได้ (Persson and Londahl, 1993) นอกจากนี้ในระหว่างการเก็บรักษายังมีปัญหาการขึ้น ๆ ลง ๆ ของอุณหภูมิ (fluctuating temperature) ที่ส่งผลให้น้ำในผลิตภัณฑ์มีการเคลื่อนย้ายต่ำแหน่ง (moisture migration) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกิดการสูญเสียน้ำที่บริเวณผิวหน้าอาหาร ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่สามารถลดปัญหาเหล่านี้ลงได้ โดยควบคุมให้อุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด รวมทั้งการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงสุด (Reid, 1997)

2.2 เจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

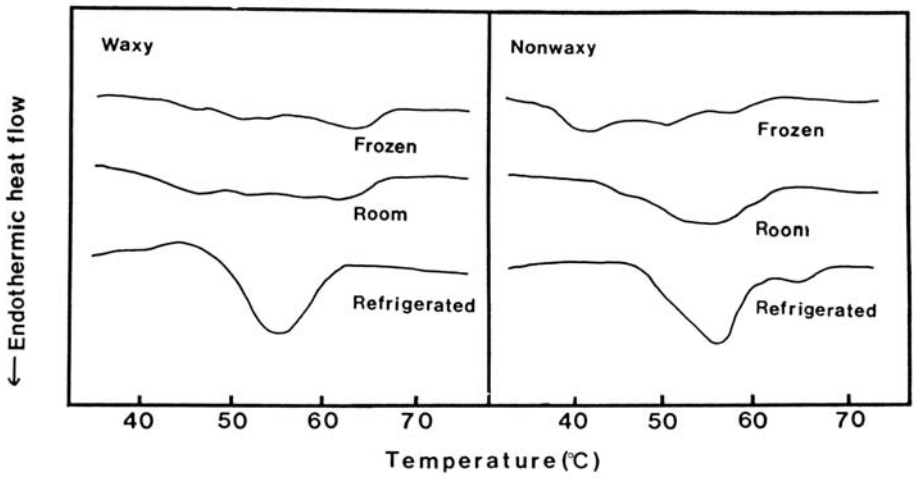
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

จากที่กล่าวมาแล้วว่าระหว่างการเก็บรักษาเจลสตาร์ช โดยโมเลกุลสตาร์ชจะเริ่มเกิดรีโทเกรเดชันทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหลัก ๆ แล้วอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นผลมาจากชนิดของสตาร์ชปริมาณ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน รวมไปถึงอุณหภูมิการเก็บรักษาด้วย (Kim *et al.*, 1997) (ในที่นี้จะเรียกแป้งกับสตาร์ชรวมกันเป็นสตาร์ช และเรียกสตาร์ชที่ผ่านการเจลทิไนเซชันเกิดเป็นระบบคอลลอยด์ทั้งหมดว่าเจลสตาร์ช) สำหรับเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งนั้นระหว่างการเก็บรักษาการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ความแข็งและความขุ่นของเจลเพิ่มขึ้น รวมทั้งการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้าง และยังพบว่าการแช่แข็งอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่

ซึ่งมีผลไปทำลายโครงสร้างของเจลสตาร์ช โดยมีแนวโน้มที่จะเกิดมากกับสตาร์ชจากธัญพืชพวกข้าวเจ้า ข้าวโพด และข้าวสาลี (Schoch, 1968)

สำหรับวิธีวัดการเกิดรีโทรเกรเดชันนั้นมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การใช้เอมไซม์ (enzymatic method), X-ray diffractometry, Differential Scanning Calorimetry (DSC), rheology และ neclear magnetic resonance (NMR) เป็นต้น (Karim *et al.*, 2000) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงการวัดการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC ที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการวัดการเกิดรีโทรเกรดของสตาร์ช ซึ่งอาศัยหลักการให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในอัตราที่กำหนดไว้แล้ว โดยตัวอย่างและสารอ้างอิง (reference material) จะต้องคงอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันตลอด แล้วเครื่องจะทำการวัดปริมาณความร้อนที่ใช้รักษาความแตกต่างระหว่างตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ แล้วค่าที่ได้จะนำมาบันทึกเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ โดยวัดจากพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการหลอมเหลวของโมเลกุลแอมิโลเพกทินที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชัน (ประมาณ 50 ถึง 60 ^{o}ซ) ณ อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง (onset, T_o; peak, T_p; conclusion, T_c) ของพลังงาน แล้วเครื่องจะรายงานปริมาณความร้อนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (enthalpic change : $\bullet$H) ต่อหน่วยน้ำหนักตัวอย่าง ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานดังกล่าว (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2543; Karim *et al.*, 2000)

ในปี 1997 Kim *et al.* ตรวจหาการเกิดรีโทเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชข้าวเจ้า (waxy and nonwaxy rice starch) ความเข้มข้น 10% และ 50% ที่ผ่านการเจลาทิไนเซชัน จากนั้นผสมกับสารละลายแอลกอฮอล์แล้วให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง บดและร่อนผ่านตะแกรง 100 mesh แล้วนำไปเก็บใส่ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 ± 1 ^{o}ซ (frozen), 2 ± 1 ^{o}ซ (refrigerated) และ 18 ± 1 ^{o}ซ (room) เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นผสมกับสารละลายแอลกอฮอล์ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง บดและร่อนอีกครั้ง พบว่าเจลสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้น 50% มีปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันมากกว่าที่ระดับความเข้มข้น 10% และที่ระดับความเข้มข้น 50% ปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่างซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ refrigerated > frozen > room ตามลำดับ (ดังภาพที่ 12) ซึ่งสอดคล้องกับศันสนีย์ (2548) ที่เก็บเจลสตาร์ชข้าวไว้เป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าว ซึ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 ^{o}ซ มีค่ามากที่สุด และที่อุณหภูมิ -18 ^{o}ซ มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิในระดับแช่เย็น (refrigerated) อยู่ประมาณกึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิ T_g และ T_m ของโมเลกุลสตาร์ช จึงทำให้การเกิดนิวเคลียสและการโตของผลึกเกิดได้ดี แม้ว่าปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิระดับแช่เยือกแข็งจะค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งก็ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงด้านต่าง ๆ เกิดขึ้นอย่างมาก



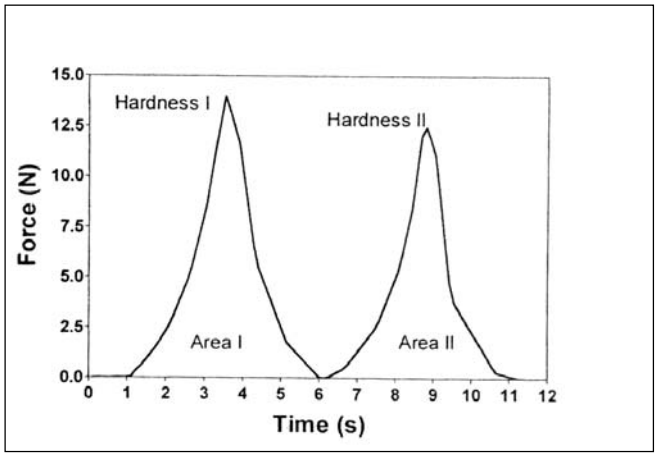
ภาพที่ 12 DSC thermogram การเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวความเข้มข้น 50% ที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 วัน

ที่มา: Kim *et al.* (1997)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง ระหว่างการแช่เยือกแข็ง และการคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing) นอกจากการเกิดรีโทรเกรเดชันก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส ซึ่งนำไปสู่การแยกตัวของน้ำออกจากระบบ (Ferrero *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 2002; Yoshimura *et al.*, 1996) ซึ่ง Varavinit *et al.* (2002) ทดลองแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว (28% แอมิโลส) และเจลสตาร์ชข้าวเหนียว (5% แอมิโลส) ในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 22 ชม. แล้วคืนรูปเยือกแข็งที่อุณหภูมิ 30 °ซ ในอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชม. พบว่าจากเจลสตาร์ชข้าวสดที่มีผิวเรียบเนียน แต่หลังจากผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วเจลเกิดลักษณะผิวที่หยาบและเกิดรูพรุนเป็นลักษณะโครงสร้างฟองน้ำ (spongy sturcture) เนื่องจากการเกิดโครงสร้างฟองน้ำเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรเดรชันของแอมิโลส ซึ่งจะปรากฏในเจลสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง อีกทั้งเจลสตาร์ชข้าวยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงกว่าเจลสตาร์ชข้าวเหนียว โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงถึง 54.50%

สำหรับเนื้อสัมผัสเจลนิยมตรวจสอบโดยใช้เทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่อง TA.XT2 Texture Analyser หรือเครื่องมืออื่น ๆ ซึ่งออกแบบมาให้ปรับประยุกต์ใช้กับเทคนิคนี้ได้ (Bourne, 2002) สำหรับการวัดด้วยด้วยเทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) เป็นการวัดคุณสมบัติทางกลที่เลียนแบบการบริโภค โดยจะกดตัวอย่างติดต่อกัน สองครั้ง แล้วรายงานเป็นค่าแรงที่ใช้ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามระยะทางที่กำหนดครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 (Hardness I และ Hardness II) ดังภาพที่ 13 สำหรับความสามารถในการยึดเกาะกัน

ของโครงสร้าง (cohesiveness) เป็นสัดส่วนของพื้นที่ส่วนที่มีค่าเป็นบวก หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟจากการกดครั้งที่สองหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟจากการกดครั้งที่หนึ่ง (ปาริฉัตร, 2545; Madala *et al.*, 2002) ซึ่งสามารถนำมาเป็นดัชนีในการบ่งบอกการเกิดรีโทรเกรเดชันและเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปของเจลสตาร์ช หลังผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วคืนรูปจากเยือกแข็งได้



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบด้วย Texture Profile Analysis
ที่มา: ปาริฉัตร (2545)

2.2.2 ผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง (freezing rate) และอุณหภูมิการเก็บรักษา (storage temperature) ต่อเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็ง

ความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw stability) หมายถึง การที่ผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีลักษณะเป็นก้อน (lumpy) เป็นเม็ด (grainy) ไม่เกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำ และไม่เกิดการแยกของน้ำออกมา หลังจากผ่านการแช่เยือกแข็งแล้วนำมาคืนรูปจากเยือกแข็ง (Richardson, 1988) สำหรับเจลสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสูงนั้น มักประสบปัญหาความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งต่ำ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ระหว่างการแช่เยือกแข็งและการเก็บรักษา ดังนั้นเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งมีผู้ศึกษาถึงผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งดังนี้

Jacobson and BeMiller (1998) ศึกษาผลของอัตราการแช่เยือกแข็งต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยนำเจลสตาร์ชข้าวโพดเหนียว (waxy maize starch) ความเข้มข้น 2.5% ไปเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยกระบวนการ freeze thaw cycles (FTC) ซึ่งจะใช้อัตราการแช่เยือกแข็ง

3 ระดับ แล้วนำไปวัดความขุ่นในแต่ละรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็ง โดยจะทำการแช่เยือกแข็งและคืนรูปจากเยือกแข็งไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการตกตะกอน (precipitate) พบว่าอัตราการเกิดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งลดลง แสดงว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือก-แข็งสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันลงได้

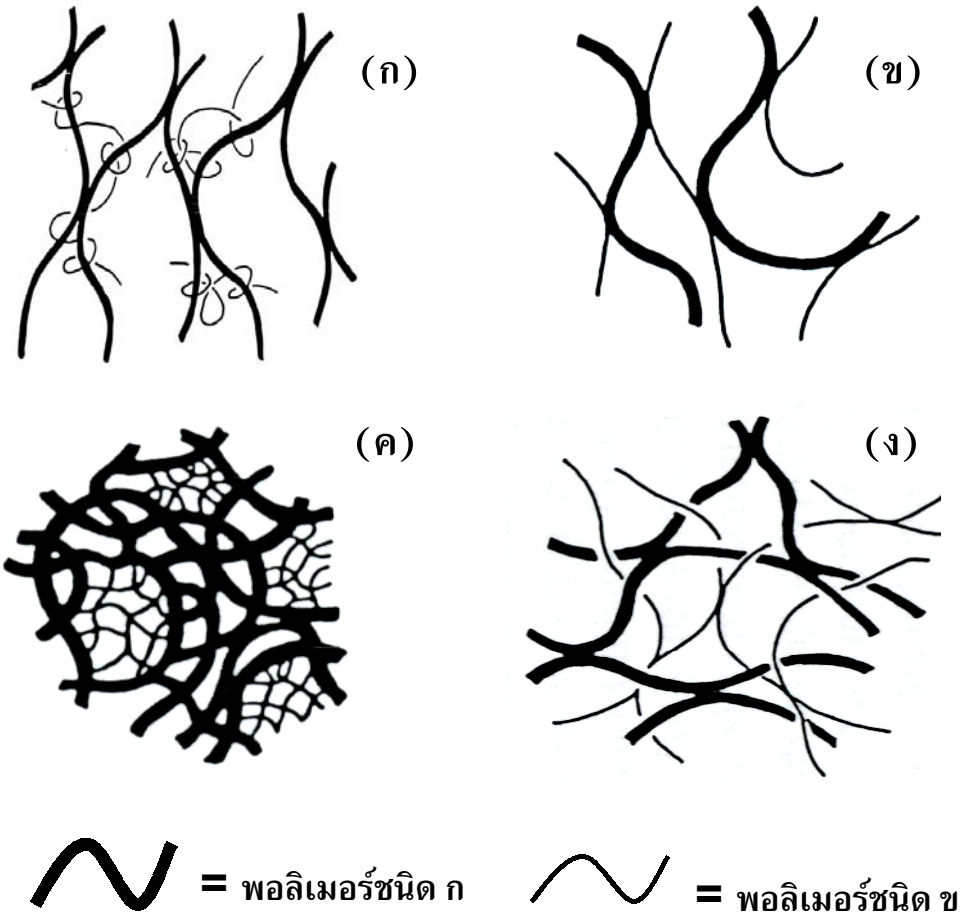
และในปี 2002 Varavinit *et al.* ได้แช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว (28% แอมิโลส) ด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 ระดับ คือ อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว จะนำเจลสตาร์ชข้าวจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 3.5 นาที ก่อนนำไปแช่ในตู้แช่ -18 °ซ เป็นเวลา 22 ชม. และอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า จะนำเจลสตาร์ชไปตู้แช่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 22 ชม. ซึ่งตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งจากทั้งอัตราการแช่เยือกแข็ง จะถูกนำไปคืนรูปเยือกจากแข็ง ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 1 ชม. ผลที่ได้พบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำต่ำกว่าเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Ferrero *et al.* (1994) ที่ชี้ให้เห็นว่าทั้งอัตราการแช่เยือกแข็งและอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษาล้วนส่งผลต่อความคงตัวของเจลสตาร์ช โดยนำเจลสตาร์ชข้าวโพดความเข้มข้น 10% w/w ไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 2 และ 15 ซม./ชม. เพื่อตรวจสอบขนาดของผลึกน้ำแข็ง ส่วนการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสจะนำตัวอย่างไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็ว 0.3, 0.6 และ 270 ซม./ชม. จากนั้นจะนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -5, -10 และ -20 °ซ โดยเมื่อนำตัวอย่างไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -5 °ซ พบว่าตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่า จะให้ค่าความถี่ของเส้นผ่านศูนย์ผลึกน้ำแข็ง (frepuencies of ice crystal equivalent diameters) ต่ำกว่า เนื่องจากการเก็บรักษาอุณหภูมิ -5 °ซ เจลสตาร์ชนั้นอยู่ในสภาวะรับเบอรี จึงส่งเสริมการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ทำให้เจลสตาร์ชเกิดการเสื่อมสภาพลง ซึ่งผลึกน้ำแข็งของตัวอย่างเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งทั้งสามอัตราการแช่เยือกแข็งต่างก็มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วจะเล็กกว่าผลึกน้ำแข็งของเจลสตาร์ชที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ส่วนการเก็บเจลสตาร์ชไว้ที่อุณหภูมิ -10 และ -20 °ซ ระบบจะอยู่ภายใต้สภาวะกลาส จึงไม่ตรวจพบการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชระหว่างการเก็บรักษา แต่ยังคงพบการตกผลึกใหม่ของน้ำแข็ง (ice recrystallization) โดยการเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกน้ำแข็งนั้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างซึ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -5 °ซ ทั้งนี้เพราะค่า T_g' ของสตาร์ชมีค่าประมาณ -6 °ซ (Roos and Karel, 1991) ส่วนเจลสตาร์ชที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 270 ซม./ชม. โดยใช้ไนโตรเจนเหลว ตรวจไม่พบการเกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำทั้งสามอุณหภูมิการเก็บรักษา

3. <u>ระบบเจลสตาร์ชผสมไฮโดรคอลลอยด์</u>

คำว่า ไฮโดรคอลลอยด์ เป็นคำที่ใช้เรียกพวกพอลิแซ็กคาไรด์และโปรตีน โดยในปัจจุบันมีการนำเอาไฮโดรคอลลอยด์มาใช้กันอย่างกว้างขวางในหลากหลายอุตสาหกรรม ซึ่งการนำไปใช้มีวัตถุประสงค์หลายประการ เช่น ให้ความข้นหนืด ทำให้โฟมเกิดความคงตัว ทำให้เกิดการกระจายตัว ยับยั้งการเกิดผลึกของน้ำแข็ง และ ควบคุมการปลดปล่อยกลิ่นรส เป็นต้น และการใช้ไฮโดร-คอลลอลอยด์ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสและสมบัติด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์อาหารให้เป็นที่ยอมรับนั้น โดยทั่วไปจะเติมในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1% ส่วนสตาร์ชนั้นจัดเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีสัดส่วนการใช้มากที่สุดในตลาดโลก (Phillips and Williams, 2000) โดยสตาร์ชและไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ๆ มักถูกใช้ร่วมกันในระบบอาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัส ควบคุมความชื้น และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

เจลที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จัดเป็นเจลเนื้อผสม ซึ่งลักษณะการเกิดเจลผสมในระบบที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์สองชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังภาพที่ 14 คือ เจลเนื้อผสมแบบที่ 1 ระบบจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด โดยพอลิเมอร์ชนิด ก จะเกิดเป็นโครงสร้างของเจล ส่วนพอลิเมอร์ชนิด ข ซึ่งพอลิเมอร์ชนิด ข จะมีอิทธิพลต่อการเกิดเจลของพอลิเมอร์ชนิด ก สำหรับเจลเนื้อผสมแบบที่ 2 ระบบจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด ที่สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะเดียวกัน โดยโครงสร้างของเจลที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ (1) เจลแบบร่วมกันสานตัว (coupled network) เป็นระบบเจลที่พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจะต้องมีส่วนใดส่วนหนึ่งที่เข้ากันได้แล้วเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน (2) เจลแบบแยกกันสานตัว (phase-separated networks) เกิดจากพอลิเมอร์สองชนิดที่เข้ากันไม่ได้และไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน (3) เจลแบบสอดแทรกสานตัว (interpenetrating networks) เป็นระบบที่พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะสานตัวกันเองเกิดเป็นเจลกลุ่มเล็ก ๆ แทรกอยู่รวมกันในระบบ (Brownsey and Morris, 1998)



<u>ภาพที่ 14</u> โครงร่างตาข่ายของเจลเนื้อผสมแบบที่ 1 (ก) และเจลเนื้อผสมแบบที่ 2 ((ข)- (ง)) โดยที่ (ข) คือ เจลแบบร่วมกันสานตัว (coupled network), (ค) คือ เจลแบบแยกกันสานตัว (phase-separated networks) และ (ง) คือ เจลแบบสอดแทรกสานตัว (interpenetrating networks)

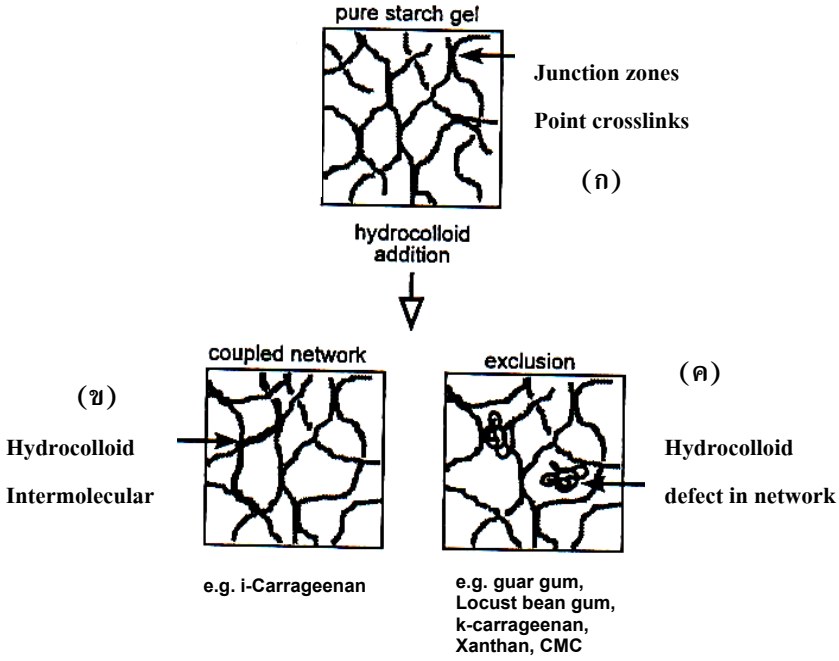
ที่มา: Brownsey and Morris (1998)

การเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในระบบสตาร์ชสามารถทำให้สมบัติของระบบเปลี่ยนแปลงไป (Christianson, 1982; Funami *et al.*, 2005; Rojas *et al.*, 1999; Shi and BeMiller, 2002) ซึ่งการศึกษาสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ พบว่าระบบสตาร์ชที่มีการเติมไฮโดรคอลลอลย์นั้นแป้งเปียกจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุสองประการคือ (1) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรคอลลอยด์กับแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชและแอมิโลเพกทินที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (2) การเติมไฮโดรคอลลอยด์ที่หนืด ทำให้ต้องให้แรงเฉือนต่อเม็ดสตาร์ชมากกว่าสารละลายสตาร์ชที่มีความเข้มข้นเท่า ๆ กัน (Christianson, 1982) และในปี 1999 Rojas *et al.* ได้ศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (guar gum, pectin, alginate, kappa -

carageenan, xanthan และ hydroxypropylmethylcellucose (HPMC)) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% และ 1% (w/w) ต่อสมบัติด้านความหนืดของระบบแป้งสาลี พบว่าการเติมอัลจิเนทลงไป 1% มีผลต่อไปเพิ่มอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting terperature) มากที่สุด ส่วนแซนแทนกัมและเพกตินไปเพิ่มความคงทนต่อการหุงต้ม (cookong stability) ในขณะที่แคปป้า-คาราจิแนนและอัลจิเนทไม่ได้ช่วยในด้านนี้ สำหรับการเติมกัวร์กัม และ HPMC ไปเพิ่มเซตแบคแต่อัลจิเนท แซนเทนกัม และแคปป้าคาราจิแนนกลับให้ผลในทางตรงกันข้าม นอกจากนี้ Shi and BeMiller (2002) ศึกษาการเติมไฮโดรคอลลอยด์หลายประเภทลงในสตาร์ชหลายชนิดได้แก่ ข้าวโพด ข้าวโพดเหนียว ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันฝรั่ง เป็นต้น พบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์ประเภทเดียวกันลงในสตาร์ชแต่ละชนิด ส่งผลให้สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเกิดความเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่แตกต่างกัน

สำหรับกำลังการพองตัวของสตาร์ชก็ได้รับผลจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์เช่นกัน โดย Chaisawang and Suphantharika (2005) ทดลองเติมแซนแทนกัมลงในสตาร์ชมันสำปะหลัง(native tapioca starch) และสตาร์ชมันสำปะหลังที่มีประจุลบ (anionic tapioca starch) พบว่าแซนแทนกัมมีผลไปเพิ่มกำลังการพองตัวของ anionic tapioca starch ได้มากกว่า native tapioca starch เนื่องจากผลของประจุไฟฟ้า (electrostactic) เพราะแซนแทนกัมมีประจุเป็นลบ ทำให้ไม่สามารถเข้าไปห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชได้อย่างเต็มที่ ดังนั้น anionic tapioca starch จึงพองตัวได้ดี และ Mandala and Bayas (2004) ศึกษาผลของการเติมแซนแทนกัมต่อกำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวสาลี โดยให้ความร้อนแก่สตาร์ชข้าวสาลีความเข้มข้น 2% จากอุณหภูมิ 60 ถึง 90 °ซ พบว่าที่อุณหภูมิน้อยกว่า 80 °ซ กำลังการพองตัวของตัวอย่างที่เติมแซนแทนกัมน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติม แต่ที่อุณหภูมิ 90 °ซ แซนแทนกัมกลับมีผลไปเพิ่มกำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวสาลี

ส่วนผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ต่อเนื้อสัมผัสของเจลนั้น ในปี 2002 Mandala *et al.* ทดลองเตรียมเจลสตาร์ชมันเทศผสมแซนแทน นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 °ซ แล้ววัดเนื้อสัมผัสด้วยเทคนิค TPA พบว่าการเติมแซนแทนกัมทำให้ค่าแรงต้านการกดเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของแรงต้านการกดไม่ได้เป็นสัดส่วนกับปริมาณการเติมแซนแทนกัน แสดงว่าแซนแทนกัมไม่น่าจะมีปฏิสัมพันธ์เสริม (synergis) กับสตาร์ชมันเทศ ส่วนความยืดหยุ่น (วัดด้วยค่า springiness) ในวันแรกตัวอย่างที่เติมแซนกัมมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติมแซนแทนกัม แต่เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้นความแตกต่างของค่า springiness ที่ได้ก็ลดลง



ภาพที่ 15 ความเป็นไปได้ในการจัดเรียงตัวของไฮโดรคอลลอยด์ในระบบเจลสตาร์ช
ที่มา: Eidam and Kulicke (1995)

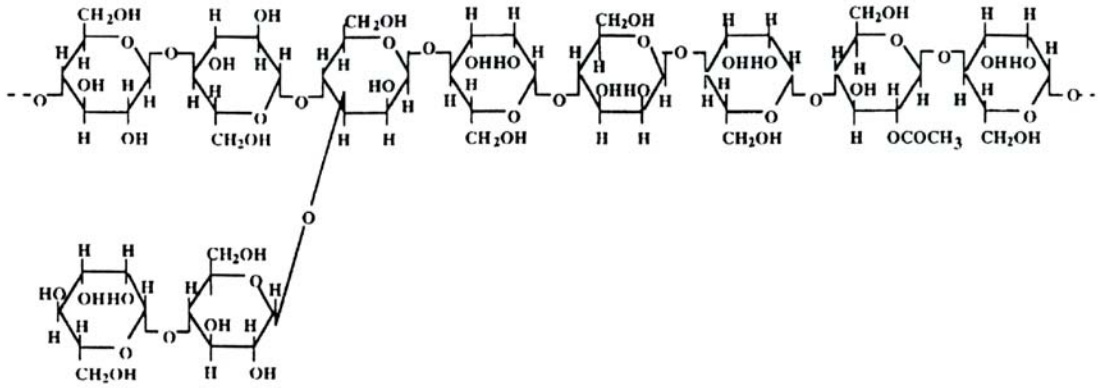
นอกจากนี้ไฮโดรคอลลอยด์ยังสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชได้ โดย Eidam and Kulicke (1995) ทดลองเติมไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิดลงในเจลสตาร์ชข้าวโพด ทำให้ได้ข้อสันนิษฐานถึงกลไกการยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชไว้สองลักษณะ ดังภาพที่ 15 คือ (1) ภาพที่ 15(ข) ไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมทำให้สมบัติด้านความยืดหยุ่น (elastic properties) ของระบบสตาร์ชเพิ่มขึ้น แสดงว่าไฮโดรคอลลอยด์น่าจะยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยเข้าไปแทรกในโครงสร้างสามมิติของเจลและแย่งการเกิดอันตรกริยา (interaction) กันระหว่างโมเลกุลสตาร์ช (2) ภาพที่ 15(ค) ไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมลงไปนั้นทำให้สมบัติด้านความหนืด (viscous properties) ของระบบสตาร์ชเพิ่มขึ้น แสดงว่าโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์ที่เติมลงไปเข้าไปกีดขวางการจับตัวกันของโมเลกุลสตาร์ช โดยไฮโดรคอลลอยด์จะเข้าไปแทรกอยู่เป็นตัวเติม (gelled filler) หรือวัฏภาคกระจาย (disperse phase) แทรกอยู่ในโครงสร้างหลัก (continuous phase) ของเจลสตาร์ช ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้อีก คือ Yoshimura *et al.* (1996) ได้ทดลองนำเจลสตาร์ชข้าวโพดที่มีการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 °ซ พบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันในช่วงหลังลงได้ (> 7 วัน) และคอนยักกลูโคแมนแนนยังช่วยป้องกันการแยกของน้ำจากเจลสตาร์ชระหว่างการเก็บรักษาได้อีกด้วย และจากผลการทดสอบสมบัติด้านรีโอโลยี พบว่าคอนยักกลูโค-

แมนแนนสนับสนุนการเกิดเจลของแอมิโลสในสตาร์ชข้าวโพด จึงอาจเป็นการส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรดในช่วงต้น แต่ระหว่างการเก็บรักษาตัวอย่างที่มีการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ breaking stress (ความเค้น) ช้ากว่าเจลสตาร์ชข้าวโพดที่ไม่ได้เติม แสดงว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรดในระยะยาวได้ และคาดว่าคอนยักกลูโคแมนแนนน่าจะแทรกอยู่ในส่วนวัฏภาคต่อเนื่องของสตาร์ชข้าวโพด (Yoshimura *et al.*, 1988)

การเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงในระบบเจลสตาร์ชยังสามารถช่วยลดปัญหาต่าง ๆ ที่พบในเจลสตาร์ชแช่เยือกแข็งได้ด้วย โดย Lee *et al.* (2002) ได้ศึกษาความคงตัวของของเจลสตาร์ชมันเทศ (sweet potato starch gel) แช่เยือกแข็ง (อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 20 ชม.) โดยเติมไฮโดรคอลลอยด์ 9 ชนิด พบว่าการเติมแซนแทนกัม อัลจิเนท และกัวร์กัมมีประสิทธิภาพในการลดการแยกตัวของน้ำค่อนข้างสูง โดยการเติมกัวร์กัม 0.6% (ต่อน้ำหนักของแป้งเปียก) สามารถลดการแยกตัวของน้ำได้มากที่สุด แต่ที่ระดับความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ 0.3% กลับพบว่าแซนแทนกัมให้ผลดีกว่ากัวร์กัม นอกจากนี้แซนแทนกัมยังมีผลไปลดความหนืดของแป้งเปียก ในขณะที่อัลจิเนทและกัวร์กัมนั้นไปเพิ่มความหนืดของแป้งเปียก อย่างไรก็ตามไฮโดรคอลลอยด์ทั้งหมดล้วนมีผลยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ โดยอัลจิเนทให้ผลในการยับยั้งดีกว่าแซนแทนกัมและกัวร์กัม นอกจากนี้ Ferrero *et al.* (1994) ทดลองเติมแซนแทนกัมลงในเจลสตาร์ชข้าวโพดแช่เยือกแข็ง พบว่าการเติมแซนแทนกัมสามารถยับยั้งรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส จึงลดการแยกของน้ำลงได้ แต่ไม่สามารถป้องกันรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน และในปี 2000 Ferrero *et al.* ยังพบว่าการเติมแซนแทนกัม ทำให้เนื้อสัมผัสของสตาร์ชข้าวโพดยังคงเป็นที่ยอมรับตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แม้ว่าจะมีการเติมน้ำตาลจนทำให้ T_g' ของระบบลงลงก็ตาม (Ferrero and Zaritzky, 2000)

4. <u>คอนยักกลูโคแมนแนน</u>

คอนยักกลูโคแมนแนนเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในหัวบุก ซึ่งบุกเป็นพืชล้มลุกมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Amorphophallus spp.* สำหรับในประเทศญี่ปุ่นนั้นจะเรียกบุกว่า "คอนยัก" (กัลยาณี, 2546) ซึ่งผงบุก (Konjac flour) มีกลูโคแมนแนนอยู่ประมาณ 49-60%, สตาร์ช 10-30%, ไฟเบอร์ 2-5%, โปรตีนประมาณ 14%, น้ำตาลรีดิวซิงซ์ 3-5% และเถ้า 3.4-5.3% ทั้งนี้ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของบุก (CyberColloids Ltd., 2004)



<u>ภาพที่ 16</u> โครงสร้างของคอนยักกลูโคแมนแนน
ที่มา : Takigami (2000)

คอนยักกลูโคแมนแนนมีลักษณะค่อนข้างกลมมีขนาด 100-600 ไมครอน เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยแมนโนสและกลูโคสในอัตราส่วน 1.6 : 1 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-กลูโคสิดิก มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 และมีแอซิทิลกระจายอยู่ทั่วไปบนสายโมเลกุลของกลูโคแมนแนนประมาณ 5-10% โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งคอนยักกลูโคแมนแนนถูกนำมาใช้ครั้งแรกที่ยุโรปและสหรัฐอเมริกา (Khanna and Tester, 2005) โดยปัจจุบันนี้มีการนำมาใช้ในทางเภสัชกรรม ทางเทคโนโลยีชีวภาพ และทางอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เป็นต้น (Zhang *et al.*, 2005)

สำหรับสมบัติของคอนยักกลูโคแมนแนนมีอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น เป็นสารให้ความข้นหนืดสามารถเกิดเจลได้ หรือเป็นสารให้ความคงตัว หรือเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการเลือกใช้และลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อนำมาละลายน้ำจะดูดน้ำแล้วเกิดการพองตัว ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (pseudoplastic) นอกจากนี้คอนยักกลูโคแมนแนนยังสามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มีด่างอ่อน ๆ

และจะให้เจลที่ทนความร้อนได้ดี มีความแข็งแรงมาก และยังมีความคงตัวสูงอีกด้วย (Takigami, 2000) นอกจากสภาวะที่มีด่างอ่อน ๆ แล้ว คอนยักกลูโคแมนแนนยังสามารถเกิดเจลได้เมื่ออยู่ร่วมกับไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด เช่น สามารถเกิดเจลได้เมื่อผสมกับแซนแทนกัมแล้วให้ความร้อนแก่สารละลายที่อุณหภูมิ 95 ^{o}ซ จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ 25 ^{o}ซ (Morris, 1992) หรือใช้ร่วมกับแคปปาคาราจิแนนก็ทำให้เกิดเจลได้ดี (Takigami, 2000) และยังมีการนำไปใช้ทำฟิลม์ที่ให้ลักษณะเหนียว มีเสถียรภาพทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น หรือในระบบที่มีความเป็นกรดและด่างได้ดี (Tye, 1991) นอกจากนี้แล้วคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในอาหาร และเป็นวัตถุเจือปนในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยได้รับการจัดให้เป็น GRAS (generally recognized as safe) โดยองค์การอาหารและยา (Food and Drug Adminstration (FDA)) และกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา (US Department of Agriculture (USDA)) อีกด้วย (Takigami, 2000)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 สตาร์ชข้าว จากบริษัท โรงเส้นหมี่ชอเฮง จำกัด อ.สามพราน จ.นครปฐม

1.2 คอนยักกลูโคแมนแนน จากบริษัท Dietham (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1 เครื่องมือสำหรับเตรียมเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งและคืนรูปเยือกแข็ง

2.1.1 เครื่องกวนที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ (High torque stirrer, Ingenieurburo CAT, M.Zip รุ่น R50D, Germany)

2.1.2 หลอดขนาด 25 มิลลิลิตร

2.1.3 หม้อนึ่ง

2.1.4 เครื่องอังไอน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (Memmert, รุ่น WB22, Germany)

2.1.5 ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิต่ำ (Low temperature incubator)

2.1.6 ตู้แช่เยือกแข็ง (Medical freezer, Sanyo รุ่น MDF-U536D)

2.1.7 เครื่องแช่เยือกแข็งแบบไคโอจินิก (Cryogenic cabinet freezer, รุ่น Mini Batch Freezer 1000L, Bangkok Industrial Gas Co., Ltd.)

2.1.8 สายเทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) และเครื่องบันทึกข้อมูล (data-logger)

2.1.8 ขวดสีชาขนาด 500 มิลลิลิตร

2.1.9 แผ่นความร้อน (hot plate)

2.1.10 พาราฟิลม์ (parafilm)

2.1.11 กล่องโฟม

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ

2.2.1 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC, Pyris1 Perkin-Elmer, USA)

2.2.2 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Stable Micro System รุ่นTA-XTplus, UK)

2.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge DAMON/IEC DIVISION)

2.2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบ Zoom stereo (SZ-40, Olympus, Japan)

2.2.5 กล้องดิจิตอล (Digital camara, Sony Cyber-shot รุ่น DSC-W1)

2.2.6 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Microscope, Leica รุ่น DME)

2.2.7 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA3D, Newport Scientific Instruments & Engineering, Australia)

2.2.8 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl apparatus, Buchi)

2.2.9 เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Tecator รุ่น Soxtec system HT)

2.2.10 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Labomed รุ่น Spectronic 22)

2.2.11 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, Gallenkamp รุ่น FSE-261-210D)

2.2.12 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Scaltec รุ่น SPB31)

2.2.13 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3. <u>สารเคมี</u>

3.1 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์แอมิโลส

3.1.1 เอธิลแอลกอฮอล์ 95%

3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์

3.1.3 กรดแอซีติกล้วน

3.1.4 แอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง (Sigma, USA)

3.1.5 ไอโอดีน

3.1.6 โปแตสเซียมไอโอไดด์

3.2 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์โปรตีน

3.2.1 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 95-97%
3.2.2 คอปเปอร์ซัลเฟต
3.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์
3.2.4 กรดบอริก
3.2.5 โพแทสเซียมซัลเฟต
3.2.6 กรดไฮโดรคลอริก
3.2.7 เมธิลเรดและโบรโมครีซอลกรีน

3.3 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมัน ได้แก่ ปิโตรเลียมอีเธอร์

วิธีการ

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ (ภาคผนวก ก)

1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของสตาร์ชข้าวและคอนยักกลูโคแมนแนน

1.1.1 ความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000)

1.1.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)

1.1.3 ปริมาณโปรตีน ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)

1.1.4 ปริมาณไขมัน ดัดแปลงจากวิธีการของ AACC (2000)

1.1.5 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ AACC (2000)

1.2 การตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชข้าว

1.2.1 ตรวจสอบสัณฐานของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ดูรูปร่างและวัดขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าว

1.2.2 ตรวจสอบค่ากำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าว ดัดแปลงจากวิธีการของ Schoch *et al.* (1964)

1.2.3 ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyser) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุดขณะร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback)

2. <u>การศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบสตาร์ชข้าวก่อนแช่เยือกแข็ง</u>

2.1 ศึกษาผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนต่อความหนืดของระบบสตาร์ชข้าว

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าว 8% (ของน้ำหนักแห้งของแข็งทั้งหมดในระบบ) ที่มีความเข้มข้นของคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0%, 0.3% และ 0.5% ตามลำดับ (วิธีการเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนดังจะกล่าวในหัวข้อ 3.1) แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่อง (Rapid visco analyzer) (ดัดแปลงจาก Funami *et al.*, 2005)

2.2 ศึกษาผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าว

เตรียมตัวอย่าง 8% เจลสตาร์ชข้าว (ของน้ำหนักแห้งของแข็งทั้งหมดในระบบ) ที่มีความเข้มข้นของคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0%, 0.3% และ 0.5% ตามลำดับ (วิธีการเตรียมเจลสตาร์ชข้าวและเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนดังจะกล่าวในหัวข้อ 3.1) แล้วนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ด้วยวิธี Texture Profile Analysis โดยใช้หัววัด P/100 (ดัดแปลงจาก Yoshimura *et al.*, 1996) ซึ่งวิธีการดังกล่าวไว้ในข้อ 4.2

2.3 การตรวจสอบการเกิดโครงสร้างของเจล

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% ตัวอย่างละ 2 ชิ้น (วิธีการเตรียมเจลจะกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1) ตัดเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 มิลลิเมตร แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง Zoom stereo microscope (400X)

2.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ

เตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวความเข้มข้น 8% (น้ำหนักแห้ง) สารแขวนลอยสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% และ 0.5% (วิธีการเตรียมสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวและสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนดังจะกล่าวในหัวข้อ 3.1) แล้วนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

3. <u>การเตรียมเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งและการคืนรูปจากเยือกแข็ง</u>

3.1 การเตรียมเจลสตาร์ชข้าว

เตรียมเจลสตาร์ชข้าวความเข้มข้น 8% (น้ำหนักแห้ง), เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% และ 0.5% โดยกวนสารแขวนลอยสตาร์ชข้าวหรือสารละลายสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 1,000 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร (สำหรับสารละลายสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน จะเตรียมเป็นสารละลายคอนยักกลูโคแมนแนน 750 มิลลิตร ก่อนนำไปผสมกับสารละลายสตาร์ชข้าว 250 มิลลิลิตร) ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 °ซ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นถ่ายแบ่งใส่ในหลอดขนาด 25 มิลลิลิตร หลอดละ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปนึ่งในหม้อนึ่งเป็นเวลา 9 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิต่ำทีอุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 2 ชม.

3.2 การแช่เยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว

นำเจลสตาร์ชข้าวและเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน ที่เตรียมได้จากข้อ 3.1 ด้วยไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็ง 3 ระดับ โดยอัตราเร็วแบบช้าใช้ตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ –18 °ซ มีอัตราการแช่เยือกแข็งประมาณ 0.20 °ซ/นาที และแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบปานกลางกับเร็วด้วยเครื่องไครโอจินิก โดยมีอัตราการแช่เยือกแข็งประมาณ 1.50 °ซ/นาที และ 4.00 °ซ/นาที ตามลำดับ จากนั้นจะนำตัวอย่างมาเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ –18 °ซ (ตัวอย่างข้อมูลการแช่เยือกแข็งดังภาพผนวกที่ ข6)

3.3 การคืนรูปจากเยือกแข็ง (thawing)

ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งเจลสตาร์ชข้าว และเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโค-แมนแนน ด้วยการนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำเจลออกจากพิมพ์ แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ

4. <u>การศึกษาผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน อัตราการแช่เยือกแข็ง และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง</u>

4.1 การตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%syneresis) ดัดแปลงจากวิธีการของ Sudhakar *et al.* (1992) และ Lee *et al.* (2002)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% จากข้อ 3.2 ที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 0, 3, 10, 17, 30 และ 90 วัน มาคืนรูปจากเยือกแข็งดังข้อ 3.3 โดยนำตัวอย่างเจลใส่ในหลอดที่มีการวางกระดาษกรองวางอยู่ข้างใน เพื่อใช้แยกส่วนของเหลวออกจากเจล นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงแยกในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1050 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จำนวน 3 หลอด แล้วชั่งน้ำหนักน้ำแยกออกมาจากเจล จากนั้นคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำตามสูตร (%syneresis) (ทำการคืนรูปจากเยือกแข็งเพียงรอบเดียว)

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์ของการแยกน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำที่ถูกเหวี่ยงแยกออกมา}}{\text{น้ำหนักของเจลเริ่มต้นก่อนการเหวี่ยงแยก}} \times 100$$

4.2 การตรวจสอบเนื้อสัมผัส ดัดแปลงจากวิธีการของ Yoshimura *et al.* (1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% จากข้อ 3.2 ที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3, 10, 17, 30 และ 90 วัน (ตัวอย่างละ 5 ชิ้น) มาคืนรูปจากเยือกแข็ง (ดังข้อ 3.3) แล้วนำไปตัดให้มีความสูง 20 มิลลิเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร) จากนั้นนำไปตรวจสอบเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ด้วยวิธี Texture Profile Analysis วัดตัวอย่างละ 5 ชิ้น โดยใช้หัววัด P/100 กดเป็นระยะทาง 12 มิลลิเมตร ด้วยอัตราเร็ว (test speed) 0.5 มิลลิเมตร/วินาที อ่านค่าแรงต้านการกดสูงสุด (maximum force) จากการกดครั้งที่ 1 และค่าการยึดเกาะ (cohesiveness) กันภายในโครงสร้างเจล โดยนำพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นบวกจากการกดครั้งที่ 2 หารด้วยพื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นบวกจากการกดครั้งที่ 1

4.3 การตรวจสอบการเกิดรีโทรเกเดชัน ดัดแปลงจากวิธีการของ Ferrero *et al.* (1994) และ Yoshimura *et al.* (1998)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% ที่ผ่านการหมุนเหวี่ยงแล้วจากข้อ 4.1 เฉพาะตัวอย่างซึ่งเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 10, 30 และ 90 วัน (ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ) โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 20-25 มก. ใส่จานสเตนเลส (stainless steel pan) จากนั้นปิดฝา แล้วนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิง แคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเจลด้วยการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °ซ ถึง 100 °ซ (อัตรา 10 °ซ/นาที) เพื่อหาการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินของตัวอย่าง ซึ่งได้จากค่าพลังงานใน การสลายผลึกแอมิโลเพกทิน (enthalpy, •H)

4.4 การตรวจสอบการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% ที่เก็บไว้เป็นเวลา 0, 17 และ 90 วัน ตัวอย่างละ 2 ชิ้น มาคืนรูปจากเยือกแข็ง แล้วตัดเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 มิลลิเมตร แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง Zoom stereo microscope (400X)

4.5 การศึกษาสมบัติด้านความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง ดัดแปลงจากวิธีการของ Sudhakar *et al.* (1992) และ Lee *et al.* (2002)

นำตัวอย่างเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% จากข้อ 3.1 ไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 22 ชม. มาคืนรูปจากเยือกแข็ง (ดังข้อ 3.3) จากนั้นนำตัวอย่างเจลใส่ในหลอดที่มีการวางกระดาษกรองวางอยู่ข้างใน เพื่อใช้แยกส่วนของเหลวออกจากเจล นำหลอดไปหมุนเหวี่ยงแยกในเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1050 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที จำนวน 3 หลอด แล้วชั่งน้ำหนักน้ำแยกออกมาจากเจล (วิธีการเช่นเดียวกันกับข้อ 4.1) จากนั้นคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำตามสูตร ส่วนหลอดที่เหลือนำกลับไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 22 ชม. อีกครั้ง แล้วทำการคืนรูปจากเยือกแข็งอีกครั้ง แล้วแบ่งหลอดมาหมุนเหวี่ยงแยกเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำจำนวน 3 หลอดเช่นเดิม โดยนับเป็นการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 2 และทำซ้ำเช่นเดิมจนครบ 7 รอบ (คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำเช่นเดียวกันกับข้อ 4.1)

5. <u>การวิเคราะห์ผลทางสถิติ</u>

ในการศึกษาผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลขนาด 3x3x2 ตามแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (3x3x2 factorial in CRD) ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ระดับความเข้มข้นของคอนยักกลูโคแมนแนนที่เติมลงในเจลสตาร์ชมี 3 ระดับ คือ 0.0% 0.3% และ 0.5% ปัจจัยที่สองคือ อัตราการแช่เยือกแข็งมี 3 ระดับ คือ อัตราการเยือกแบบช้า ปานกลาง และเร็ว ส่วนปัจจัยที่สามคือ อุณหภูมิในการเก็บรักษามี 2 ระดับ คือ -12 และ -18 ^{o}ซ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลองเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ด้วยโปรแกรม SPSS ถ้ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะนำมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

6. <u>สถานที่ทดลอง</u>

ห้องปฏิบัติการและอาคารแปรรูป ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. <u>ระยะเวลาการทดลอง</u>

ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2547 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2549

8. <u>แหล่งทุนสนับสนุน</u>

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute)

ผลและการวิจารณ์

เจลสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงเมื่อนำไปแช่เยือกแข็งมักประสบปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ การเกิดรีโทรเกรเดชัน การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ การแยกของน้ำ เนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไป (Kim *et al.*, 1997; Varavinit *et al.*, 2002) ซึ่งได้มีการนำเอาการเติมไฮโดรคอลลอยด์ และการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งมาใช้เพื่อปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ (Ferrero *et al.*, 1994; Ferrero and Zaritzky, 2000; Funami *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2002) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาได้เลือกศึกษาการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% 0.3% และ 0.5% ลงในเจลสตาร์ชข้าวก่อนนำไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยความเข้มข้นของสตาร์ชข้าวและชนิดของไฮโดรคอลลอยด์ที่เลือกใช้นี้ถูกกำหนดขึ้นจากข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น (ข้อมูลดังตารางภาคผนวกที่ ข1) พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมเจลสตาร์ชข้าว เพื่อให้ได้เจลที่มีลักษณะคงตัว คือ 8% และจากการทดลองเติมไฮโดรคอลลอยด์ 4 ชนิด คือ คอนยักกลูโคแมนแนน เพกติน อาการ์ และแซนแทนกัมลงในสตาร์ชข้าวแล้วนำไปแช่เย็น และแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 60 ชม. และ 14 วันตามลำดับ พบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของเจลสตาร์ชข้าวได้ดีที่สุดในบรรดาไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 4 ชนิด สำหรับในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของคอนยักกลูโคแมนแนน อัตราการแช่เยือกแข็ง และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็ง โดยจะตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ เนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าว

1. <u>การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของวัตถุดิบ</u>

สตาร์ชข้าวและคอนยักกลูโคแมนแนนที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1 คือ มีปริมาณแอมิโลส 31.57% ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (Juliano, 1992) ส่วนปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้ามีอยู่เท่ากับ 0.94, 0.06 และ 0.04% ตามลำดับ ซึ่งจากรายงานของ Singh *et al.* (2000) ทดลองสกัดสตาร์ชข้าวจากข้าวพันธุ์อินดิก้า (Indica) ที่เป็นข้าวทางการค้าจากประเทศไทย พบว่ามีปริมาณแอมิโลส โปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่เท่ากับ 34.60, 0.45, 0.08 และ 0.22% ตามลำดับ แต่เนื่องจากสตาร์ชข้าวที่นำมาใช้ในการทดลองนี้สกัดมาจากข้าวหลายพันธุ์ผสมกัน (ไม่ทราบสายพันธุ์ที่แน่นอน) อีกทั้งปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ยังขึ้นอยู่กับวิธีการสกัดสตาร์ช (Lumdubwong and Seib, 2000) จึงทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้มีความแตกต่างกันอยู่บ้าง สำหรับผงบุกโดยทั่วไป (konjac flour) จะมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่เท่ากับ 2.2, 2.3 และ 5.2% ตามลำดับ ส่วนผงบุกที่ผ่านการสกัดแล้ว (purified konjac flour) จะมีปริมาณโปรตีน ไขมันและเถ้าอยู่เท่ากับ 0.8, 0.9 และ 1.7%

ตามลำดับ (Takigami, 2000) ดังนั้นคอนยักกลูโคแมนแนนที่นำมาใช้ในการทดลองจึงจัดเป็นคอนยักกลูโคแมนแนนที่มีผ่านการสกัดแล้ว

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าวและคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM)

(หน่วย : เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง)

ตัวอย่าง	ความชื้น	แอมิโลส	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
สตาร์ชข้าว	11.41 ± 0.03	31.57 ± 0.38	0.94 ± 0.05	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.02
KGM	11.71 ± 0.01	-	0.87 ± 0.03	0.95 ± 0.03	1.89 ± 0.03

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สำหรับตัวอย่างสตาร์ชข้าวนี้รูปร่างหลายเหลี่ยม (polygonal) และมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ (ดังภาพผนวกที่ ก2) ซึ่งจากการสุ่มวัดขนาดของเม็ดสตาร์ชข้าวจำนวน 100 เม็ด พบว่ามีขนาดประมาณ 5.74 ± 1.77 ไมครอน ที่สอดคล้องกันกับรายงานของ Zhou *et al.* (2002) ที่ว่าสตาร์ชข้าวมีรูปร่างหลายเหลี่ยม และมีขนาดประมาณ 3-8 ไมครอน ส่วนค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายนั้น จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ดังภาพผนวกที่ ก3) โดยค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายจะเพิ่มสูงขึ้นมากที่อุณหภูมิ 80 °ซ และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มเป็น 90 °ซ เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ประมาณ 80 °ซ แสดงว่าที่อุณหภูมินี้สตาร์ชเริ่มเกิดการเจลาทิไนเซชันเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ทำให้แอมิโลสบางส่วนเริ่มหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ดังนั้นที่อุณหภูมิ 80 °ซ นี้ สตาร์ชข้าวจึงมีค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายเพิ่มสูงขึ้นมาก สำหรับค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และเซตแบคของสตาร์ชข้าว (ดังตารางผนวกที่ ก1 และ ภาพผนวกที่ ก4) โดยจะเห็นได้ว่าตัวอย่างสตาร์ชข้าวมีค่าความหนืดสุดท้ายและค่าเซตแบคสูง แสดงว่าสตาร์ชข้าวนี้สามารถเกิดเจลได้ดีและให้เจลที่มีลักษณะแข็ง (strong gel) ได้ แต่เจลจากสตาร์ชข้าวมีแนวโน้มที่จะเกิดรีโทรเกรเดชันสูงระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแอมิโลสที่มีอยู่สูงในสตาร์ชข้าว (Karim *et al*., 2000; Wang and Wang, 2002; พิณทิพย์, 2547)

2. **<u>ผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน อัตราการแช่เยือกแข็ง และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อการแยกของน้ำ</u>**

เมื่อนำเจลสตาร์ชข้าวไปแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (0.20 °ซ/นาที) เป็นเวลา 22 ชม. แล้วนำไปคืนรูปจากเยือกแข็งทันที (ดังตารางที่ 2 และ 3 ระยะเวลาการเก็บรักษา 0 วัน) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงถึง 64.43% ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงถึง 31.57% (ดังตารางที่ 1) จึงเป็นสาเหตุหลักของการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าว ซึ่ง Varavinit *et al*. (2002) พบว่าเจลจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (28%) นั้นให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำมากกว่าเจลจากแป้งข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง (18%) และต่ำ (5%) ตามลำดับเมื่อแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำจากตารางที่ 2 และ 3 เมื่อแช่เยือกด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำของเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโค-แมนแนน 0.3% และ 0.5% มีค่าน้อยกว่ากว่าเจลสตาร์ชข้าว (0.0% คอนยักกลูโคแมนแนน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 0 วัน ถึง 90 วัน โดยมีค่าประมาณ 30.00, 50.00 และ 65.00% ตามลำดับ แสดงว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชได้ (Yoshimura *et al.*, 1988) จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำมีค่าลดลง สำหรับการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางของทั้งสองอุณหภูมิการเก็บรักษา พบว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ ได้เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า ส่วนกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้นพบว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนในระดับ 0.3% นั้นเพียงพอที่จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำไม่แตกต่าง ($p > 0.05$) กับเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนนในระดับ 0.5% ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (สำหรับตารางที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำที่ระยะเวลาการเก็บ 90 วัน ที่อุณหภูมิ -12 °ซ ไม่สามารถนำมาวิจารณ์รวมได้ ทั้งนี้เพราะระหว่างการเก็บรักษามีช่วงที่ตู้แช่เยือกแข็งมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างผิดปกติ)

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%syneresis) ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%) ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	64.43ens ± 0.55	65.01d ± 2.62	67.18e ± 2.68	67.90e ± 0.42	67.51f ± 0.16	64.36e ± 5.12
	ปานกลาง	33.00cns ± 0.70	33.92b ± 3.85	32.89e ± 1.70	32.21bc ± 3.59	33.66d ± 0.90	35.33c ± 1.83
	เร็ว	26.76bns ± 1.04	27.06b ± 2.16	26.80b ± 1.40	26.21b ± 2.35	26.95c ± 1.73	26.63b ± 1.57
0.3%	ช้า	51.7dns ± 7.57	49.65c ± 7.98	54.04d ± 3.53	51.18d ± 8.52	58.11e ± 2.91	57.96d ± 4.55
	ปานกลาง	4.24ans ± 1.84	4.10a ± 0.90	4.51a ± 0.24	4.18a ± 0.44	4.27b ± 2.34	4.42a ± 0.26
	เร็ว	1.41ans ± 1.13	1.51a ± 0.15	1.24a ± 0.16	1.27a ± 0.11	1.29a ± 0.16	1.53a ± 0.30
0.5%	ช้า	33.45cns ± 1.36	31.06b ± 8.49	31.34bc ± 7.06	34.40c ± 5.70	34.46d ± 2.45	34.09c ± 5.92
	ปานกลาง	1.07ans ± 0.31	0.98a ± 0.19	1.07a ± 0.01	1.06a ± 0.17	1.13a ± 0.13	1.14a ± 0.06
	เร็ว	0.93ans ± 0.17	0.98a ± 0.16	0.92a ± 0.09	0.91a ± 0.06	0.94a ± 0.05	0.92a ± 0.04

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%syneresis) ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%) ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	64.43ens ± 0.55	62.80e ± 1.37	64.96f ± 0.61	64.52g ± 0.62	66.17f ± 0.92	-
	ปานกลาง	33.00cns± 0.70	32.63c ± 0.99	31.38c ± 0.87	31.49d ± 3.56	34.07c ± 0.96	-
	เร็ว	26.76bns ± 1.04	26.05b ± 0.77	26.23b ± 0.24	27.02c ± 1.84	26.49b ± 1.44	-
0.3%	ช้า	51.74dns ± 7.57	51.08d ± 4.12	54.98e ± 2.68	53.41f ± 1.55	57.13e ± 0.78	-
	ปานกลาง	4.24ans ± 1.84	4.44a ± 2.60	4.59a ± 0.86	4.09b ± 0.42	4.01a ± 0.94	-
	เร็ว	1.41ans ± 1.13	1.36a ± 1.13	1.36a ± 0.23	2.04a ± 0.94	2.20a ± 1.18	-
0.5%	ช้า	33.45cns ± 1.36	37.98c ± 8.63	37.32d ± 0.25	38.76e ± 2.42	38.36a ± 5.09	-
	ปานกลาง	1.07ans ± 0.31	0.95a ± 0.15	0.96a ± 0.02	1.14a ± 0.24	1.28a ± 0.32	-
	เร็ว	0.93ans ± 0.17	0.91a ± 0.06	0.86a ± 0.06	1.09a ±0 .23	1.01a ± 0.14	-

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

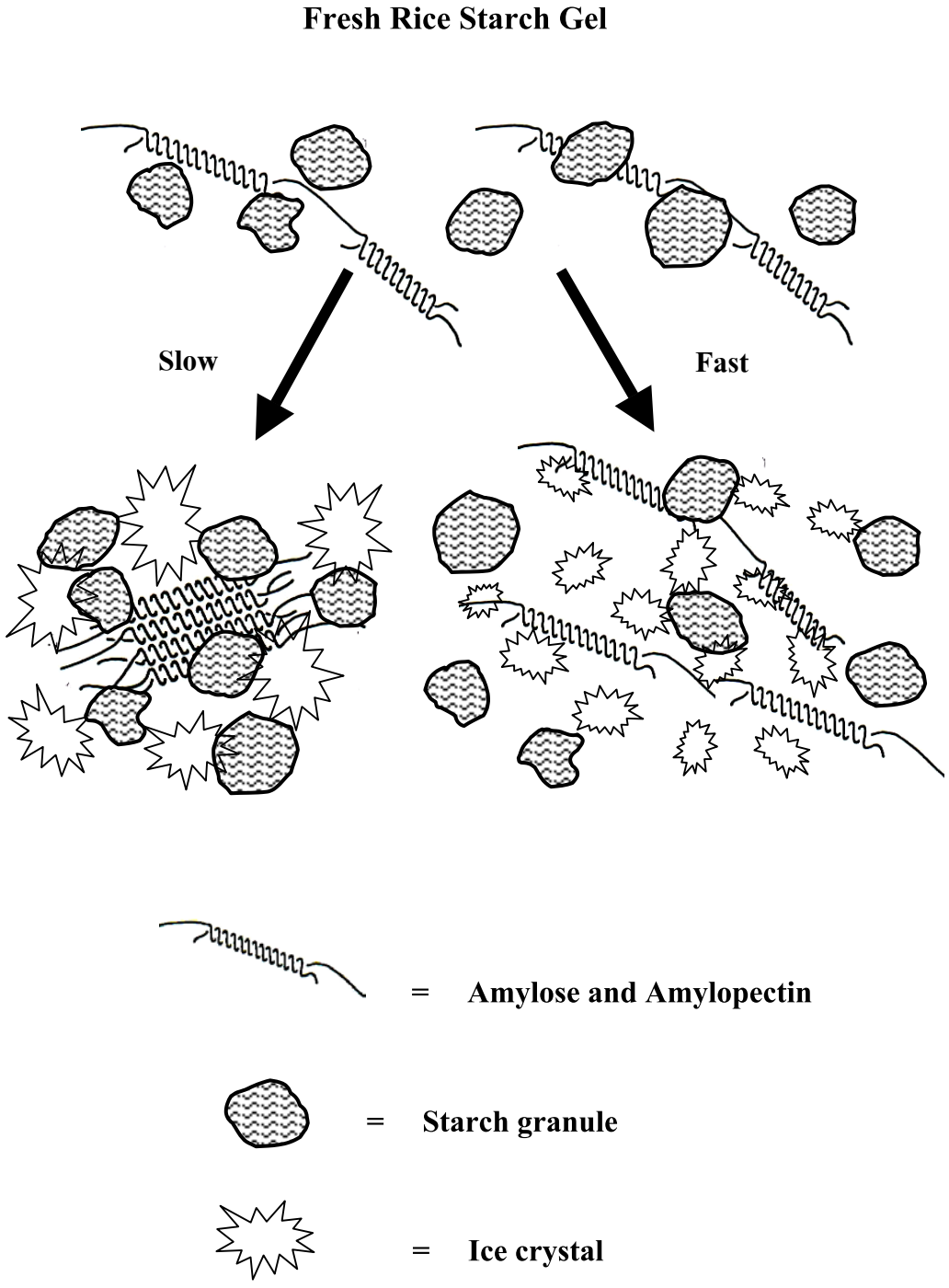
* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* - หมายถึง ตู้แช่เยือกแข็งเสียจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ -12 °ซ ไว้ได้

ส่วนเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน แล้วแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำลดลงเหลือประมาณ 26% ในขณะที่เจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% แต่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้ายังคงมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงถึงประมาณ 32% แสดงว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งจากแบบช้าไปเป็นแบบเร็วมีผลไปลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำได้ดีกว่าการเติม 0.5% คอนยักกลูโคแมนแนนลงในเจลสตาร์ชข้าว ทั้งนี้เนื่องจากการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบเร็ว จะทำให้ระบบผ่านสภาวะรับเบอรีซึ่งเป็นช่วงที่มีการเกิดนิวเคลียส และการโตของผลึกไปได้อย่างรวดเร็ว จึงช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินลงได้ (Ferrero *et al.*, 1994) (ภาพที่ 17) โดยจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำต่ำมาก หากมีการเติม 0.3% คอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว หรือเติม 0.5% คอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราแช่เยือกแข็งแบบปานกลางหรือเร็ว

สรุปแล้วการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนและการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งล้วนมีผลไปลดการแยกของน้ำออกจากเจลสตาร์ชข้าวได้ โดยการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพในการลดการแยกของน้ำได้ดีกว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน สำหรับอุณหภูมิการเก็บรักษา -12 และ -18 ^{o}ซ ไม่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 17 ความเป็นไปได้ของลักษณะการเกิดผลึกน้ำแข็งและการเกิดรีโทรเกรเดชันสตาร์ช เมื่อแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและเร็ว

3. ผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน อัตราการแช่เยือกแข็ง และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อเนื้อสัมผัสและโครงสร้างของเจล

การวัดเนื้อสัมผัสของเจลสตาร์ชข้าวด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) ซึ่งอ่านผลเป็นค่า cohesiveness ที่แสดงถึงความสามารถในการเกาะกันของพอลิเมอร์ภายในโครงสร้างของเจล และค่า maximum force (แรงต้านการกดสูงสุด) ที่แสดงถึงความแข็งของเจล สำหรับเจลสตาร์ชข้าวเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% และ 0.5% ก่อนแช่เยือกแข็งมีค่า cohesiveness เท่ากับ 0.171, 0.281 และ 0.317 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4) โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า cohesiveness ที่ได้ของเจลก่อนการแช่เยือกแข็งกับค่า cohesiveness ของเจลสตาร์ชข้าวหลังแช่เยือกแข็งในกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (ตารางที่ 5 และ 6) จะเห็นได้ว่าค่า cohesiveness ของเจลสตาร์ชข้าว (0.0% คอนยักกลูโคแมนแนน) เพิ่มขึ้นหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง ในขณะที่เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% กลับมีค่า cohesiveness ลดลงหลังการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าเกิดโครงสร้างฟองน้ำขึ้นอย่างชัดเจน (ภาพที่ 25) ส่วนเจลสตาร์ชข้าวที่มีการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% (ตารางที่ 7) เกิดโครงสร้างฟองน้ำขึ้นเพียงเล็กน้อยหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับ Navarro *et al.* (1997) พบว่าตัวอย่างที่ให้สมบัติด้านความยืดหยุ่นลดลงหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง (ค่า cohesiveness หลังจากการแช่เยือกแข็งมีค่าต่ำกว่าก่อนแช่เยือกแข็ง) แสดงว่าโครงสร้างนั้นจะความคงทนต่อการเสียรูปร่าง (deformation) เพิ่มขึ้น โดยเห็นได้จากผลค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (ตารางที่ 2 และ 3) เมื่อให้แรงกระทำด้วยหมุนเหวี่ยงต่อเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าหลังคืนรูปเยือกแข็ง พบว่าตัวอย่างที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนนมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำลงแสดงว่าโครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถคงรูปและอุ้มน้ำไว้อยู่ในโครงสร้างได้ดีกว่าจึงมีความคงทนต่อการเสียรูปร่างเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ค่า cohesiveness และ maximum force ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมน-แนน 0.0%, 0.3% และ 0.5% ก่อนการแช่เยือกแข็ง

เจลสตาร์ชข้าว ผสม KGM	cohesiveness	maximum force (N)
0.0%	0.171a ± 0.026	3.323b ± 0.091
0.3%	0.281b ± 0.018	2.725a ± 0.159
0.5%	0.317c ± 0.012	2.644a ± 0.116

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า cohesiveness ของตัวอย่างเจลก่อนการแช่เยือกแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน โดยค่า cohesiveness ที่แสดงถึงความสามารถในการเกาะกันของพอลิเมอร์ภายในโครงสร้างของเจล แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับการเกิดโครงสร้างฟองน้ำของเจล ในกรณีของเจลสตาร์ชก่อนการแช่เยือกแข็งนี้ (ภาพที่ 18-20) ดังนั้นค่า cohesiveness ที่เพิ่มขึ้น จึงน่าจะมาจากความยืดหยุ่นของคอนยักกลูโคแมนแนนเอง โดย Mandala *et al.* (2002) พบว่าค่า cohesiveness ของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผสมแซนแทนกัม 0.0%, 0.1% และ 0.3% มีค่า cohesiveness สูงขึ้น สำหรับค่า maximum force ที่ลดลงนี้คาดว่าเกิดจากโมเลกุลของกลูโคแมนแนนเข้าไปกีดขวางการจับตัวกันของโมเลกุลสตาร์ช จึงทำให้ความแข็งของเจลลดลง

ตารางที่ 5 ค่า cohesiveness ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	cohesiveness					
		ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	0.603cns ± 0.075	0.556c ± 0.104	0.573c ± 0.033	0.585c ± 0.047	0.605c ± 0.061	0.568c ± 0.063
	ปานกลาง	0.152ans ± 0.047	0.157a ± 0.028	0.159a ± 0.023	0.152a ± 0.032	0.153a ± 0.032	0.151a ± 0.024
	เร็ว	0.149ans ± 0.021	0.154a ± 0.068	0.149a ± 0.024	0.163a ± 0.032	0.160a ± 0.037	0.161a ± 0.033
0.3%	ช้า	0.258bns ± 0.064	0.237b ± 0.072	0.264b ± 0.049	0.263b ± 0.036	0.289b ± 0.060	0.253b ± 0.042
	ปานกลาง	0.144ans ± 0.034	0.158a ± 0.019	0.141a ± 0.016	0.154a ± 0.016	0.141a ± 0.026	0.152a ± 0.030
	เร็ว	0.150ans ± 0.018	0.158a ± 0.011	0.169a ± 0.042	0.171a ± 0.007	0.164a ± 0.026	0.162a ± 0.031
0.5%	ช้า	0.174ans ± 0.017	0.178a ± 0.037	0.169a ± 0.019	0.165a ± 0.037	0.174a ± 0.026	0.188a ± 0.029
	ปานกลาง	0.167ans ± 0.026	0.162a ± 0.035	0.169a ± 0.021	0.155a ± 0.035	0.163a ± 0.020	0.159a ± 0.028
	เร็ว	0.164ans ± 0.017	0.154a ± 0.032	0.162a ± 0.022	0.154a ± 0.010	0.153a ± 0.022	0.165a ± 0.022

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 6 ค่า cohesiveness ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	cohesiveness					
		ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	0.603cns ± 0.075	0.581c ± 0.021	0.582c ± 0.034	0.553c ± 0.050	0.567c ± 0.045	-
	ปานกลาง	0.152ans ± 0.047	0.151a ± 0.019	0.155a ± 0.063	0.156a ± 0.023	0.159a ± 0.036	-
	เร็ว	0.149ans ± 0.021	0.151a ± 0.018	0.156a ± 0.033	0.152a ± 0.017	0.152a ± 0.037	-
0.3%	ช้า	0.258bns ± 0.064	0.241b ± 0.029	0.267b ± 0.047	0.257b ± 0.063	0.280b ± 0.031	-
	ปานกลาง	0.144ans ± 0.034	0.151a ± 0.041	0.152a ± 0.024	0.144a ± 0.016	0.145a ± 0.006	-
	เร็ว	0.150ans ± 0.018	0.152a ± 0.009	0.151a ± 0.027	0.153a ± 0.005	0.155a ± 0.019	-
0.5%	ช้า	0.174ans ± 0.017	0.169a ± 0.039	0.168a ± 0.030	0.184a ± 0.021	0.180a ± 0.016	-
	ปานกลาง	0.167ans ± 0.026	0.151a ± 0.020	0.138a ± 0.014	0.152a ± 0.021	0.156a ± 0.026	-
	เร็ว	0.164ans ± 0.017	0.166a ± 0.018	0.151a ± 0.011	0.153a ± 0.021	0.158a ± 0.010	-

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* - หมายถึง ตู้แช่เยือกแข็งเสียจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ -12 °ซ ไว้ได้

ตารางที่ 7 การเกิดโครงสร้างฟองน้ำของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ

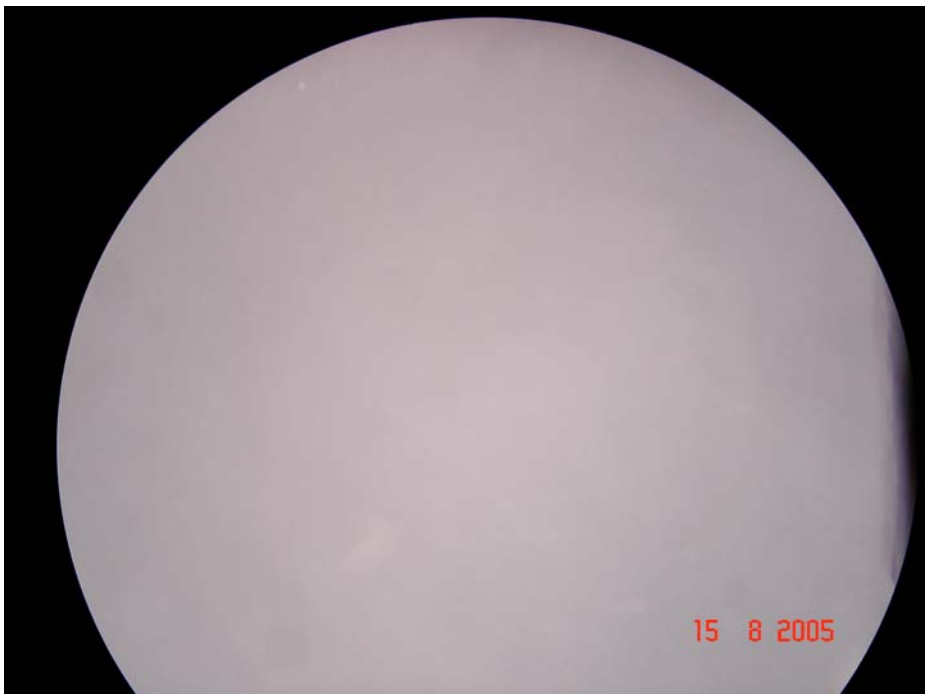
เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	อุณหภูมิการเก็บ-รักษา (°ซ)	การเกิดโครงสร้าง (คะแนน)			
			ก่อนการ-แช่เยือกแข็ง	ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)		
				0	17	90
0.0%	ช้า	-12	0	3	3	-
		-18			3	3
	ปานกลาง	-12		1	1	-
		-18			1	1
	เร็ว	-12		1	1	-
		-18			1	1
0.3%	ช้า	-12	0	2	2	-
		-18			2	2
	ปานกลาง	-12		1	1	-
		-18			1	1
	เร็ว	-12		1	1	-
		-18			1	1
0.5%	ช้า	-12	0	1	1	-
		-18			1	1
	ปานกลาง	-12		1	1	-
		-18			1	1
	เร็ว	-12		1	1	-
		-18			1	1

หมายเหตุ * คะแนนการเกิดโครงสร้างฟองน้ำพิจารณาจากภาพที่ 18-25 โดย

0 = ไม่เกิดโครงสร้างฟองน้ำ 1 = เกิดโครงสร้างฟองน้ำเล็กน้อย

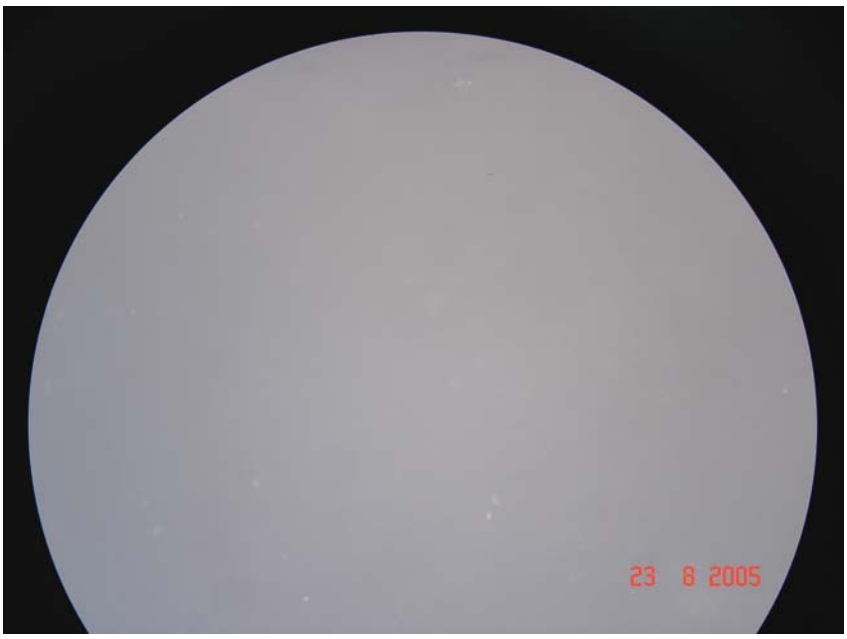
2 = เกิดโครงสร้างฟองน้ำปานกลาง 3 = เกิดโครงสร้างฟองน้ำมาก

* - หมายถึง ตู้แช่เยือกแข็งเสียจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ -12 °ซ ไว้ได้

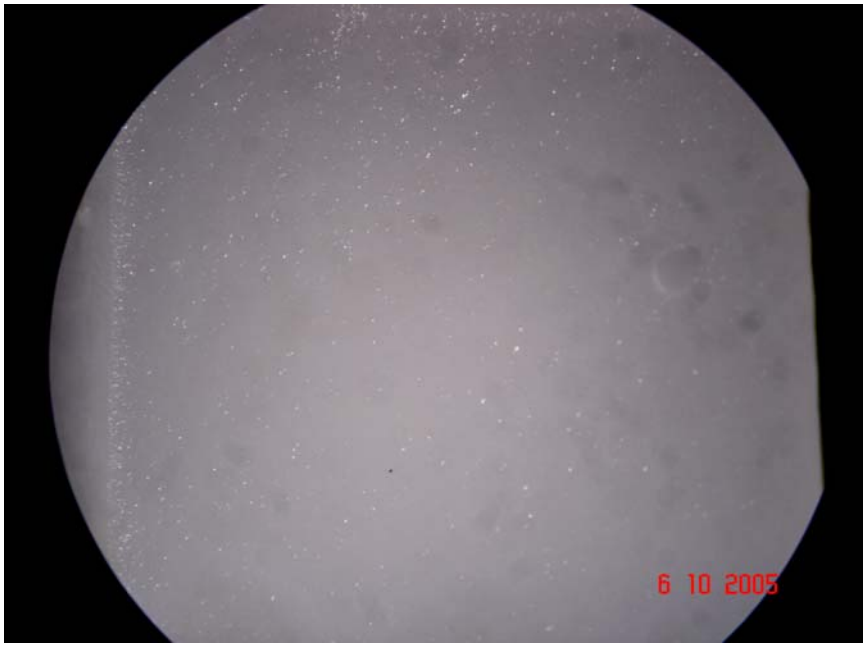


ภาพที่ 18 เจลสตาร์ชข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ไม่มีการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ = 0 คะแนน)

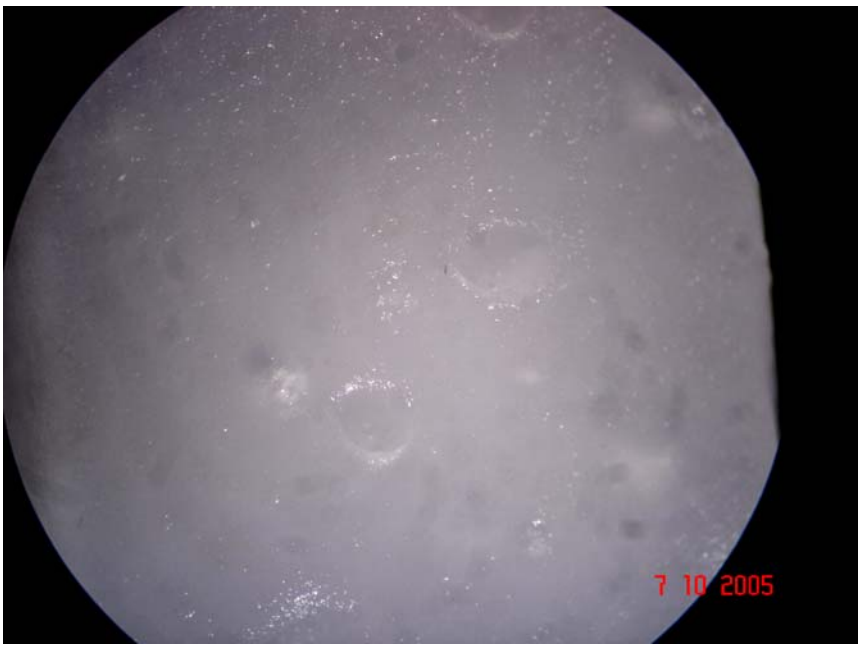
ภาพที่ 19 เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% ก่อนการแช่เยือกแข็ง (ไม่มีการเกิด โครงสร้างฟองน้ำ = 0 คะแนน)



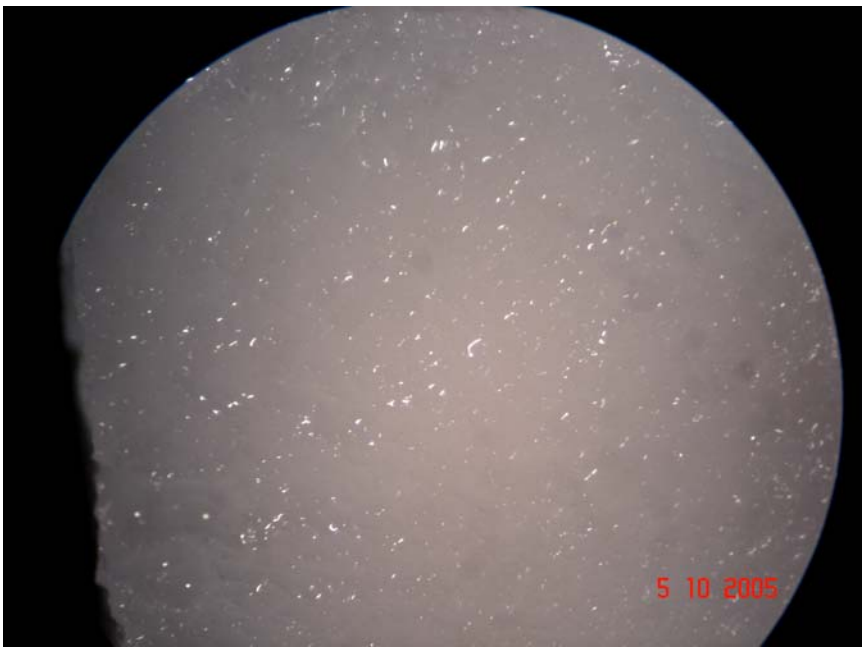
ภาพที่ 20 เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% ก่อนการแช่เยือกแข็ง (ไม่มีการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ = 0 คะแนน)



ภาพที่ 21 เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 ^{o}ซ เป็นเวลา 90 วัน (การเกิดโครงสร้างฟองน้ำเล็กน้อย = 1 คะแนน)

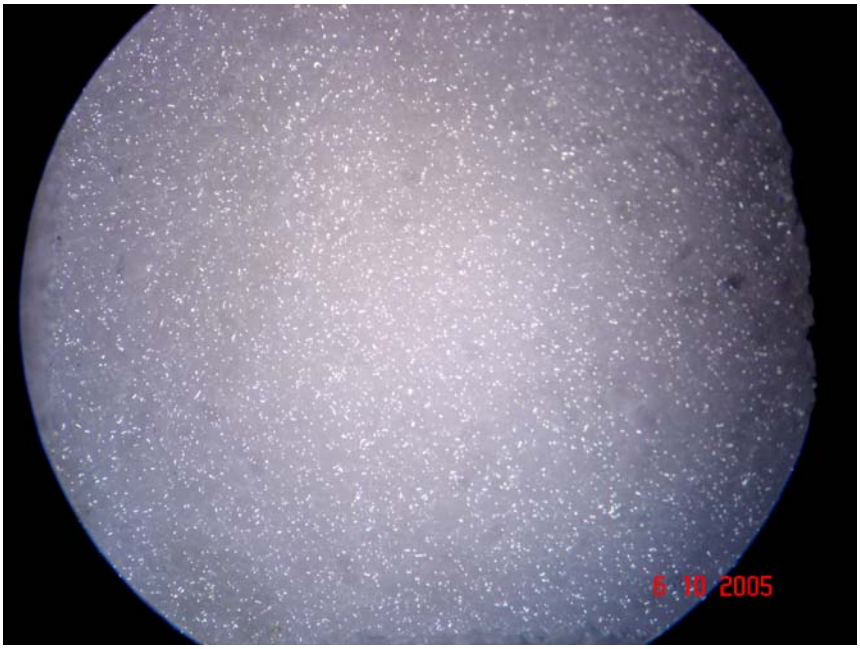


<u>ภาพที่ 22</u> เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% แช่เยือกแข็งด้วยอัตรา
การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 90 วัน
(การเกิดโครงสร้างฟองน้ำเล็กน้อย = 1 คะแนน)



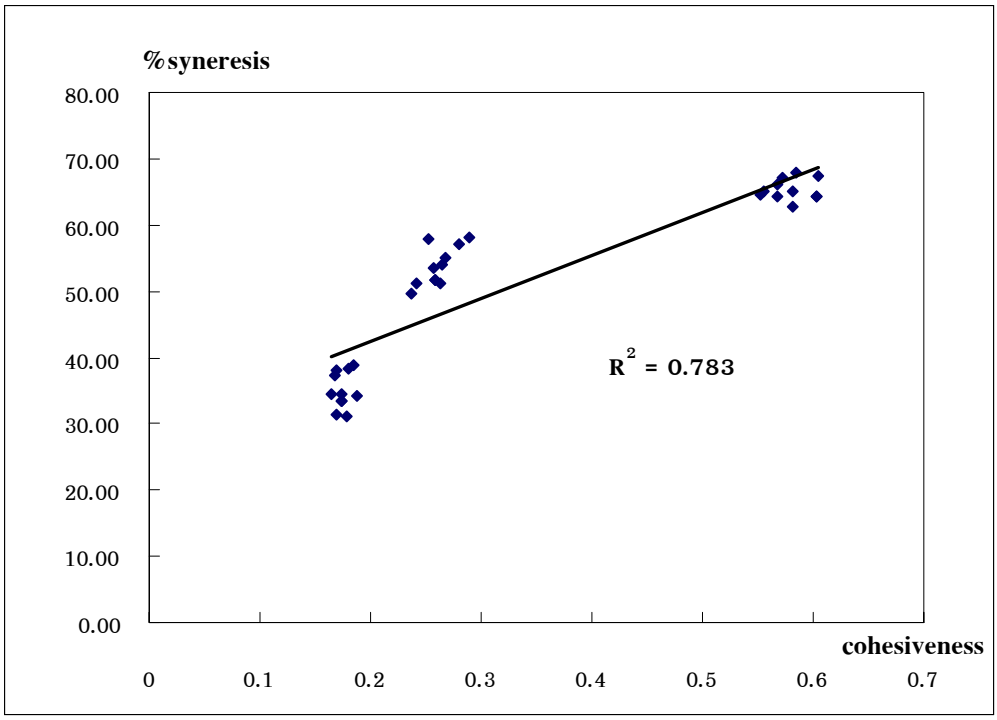
<u>ภาพที่ 23</u> เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% แช่เยือกแข็งด้วยอัตรา
การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 90 วัน
(การเกิดโครงสร้างฟองน้ำเล็กน้อย = 1 คะแนน)

ภาพที่ 24 เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 90 วัน (การเกิดโครงสร้างฟองน้ำปานกลาง = 2 คะแนน)



ภาพที่ 25 เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 90 วัน (การเกิดโครงสร้างฟองน้ำมาก = 3 คะแนน)

เมื่อพิจารณาค่า cohesiveness ของเจลสตาร์ชข้าวหลังผ่านการแช่เยือกแข็ง ดังตารางที่ 5 และ 6 (สำหรับตารางที่ 6 การเก็บรักษาเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -12 °ซ ที่ระยะเวลาการเก็บ 90 วัน นั้นไม่สามารถนำมาวิจารณ์รวมได้เช่นเดียวกันกับค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ) พบว่าตัวอย่างในกลุ่มที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า เมื่อเติมคอนยักกลูโค-แมนแนนเพิ่มขึ้นจาก 0.0%, 0.3% และ 0.5% ตามลำดับ ทำให้ค่า cohesiveness ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 0 ถึง 90 วัน แสดงว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนน่าจะสามารถลดโครงสร้างฟองน้ำลงได้ โดยลักษณะของโครงสร้างฟองน้ำนี้จะพบเมื่อนำเจลสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงไปแช่เยือกแข็ง (Ferrero *et al.*, 1994; Varavinit *et al.*, 2002) ซึ่งจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Zoom stereo (ภาพที่ 18-25 และ ตารางที่ 7) จะเห็นได้ว่าในกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ตัวอย่างที่เกิดโครงสร้างฟองน้ำมากที่สุด คือ เจลสตาร์ชข้าว รองลงมาเป็นเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโค-แมนแนน 0.3% และ 0.5% ตามลำดับ ส่วนกลุ่มอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็วนั้นการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งเพียงอย่างเดียวก็สามารถลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำได้ (Ferrero *et al.*, 1994; Ferrero and Zaritzky, 2000; Varavinit *et al.*, 2000) ถึงแม้ว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางหรือเร็ว หรือการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนในระดับ 0.5% จะเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอต่อการลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำลงได้ เช่นเดียวกับการเติมคอนยัก-กลูโคแมนแนนร่วมกับการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อกลับไปพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (ตารางที่ 2 และ 3) จะเห็นได้ว่ายังคงมีความจำเป็นที่จะต้องเติมคอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็ง จึงจะลดการแยกของน้ำได้ดี



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cohesiveness กับค่าการแยกของน้ำ (%) ของเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำกับค่า cohesiveness ของเจลกลุ่มที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า (ดังภาพที่ 26) พบว่าเมื่อค่า cohesiveness ลดลง ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำก็จะมีแนวโน้มลดลงด้วย เนื่องจากโครงสร้างฟองน้ำเป็นลักษณะของเจลที่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้อย่างหลวม ๆ เมื่อได้รับแรงกระทำเพียงเล็กน้อยจากการเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงน้ำที่อยู่ในโครงสร้างจึงแยกออกมา ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่เกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำจะสามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีกว่า แสดงว่าคอนยักกลูโคแมนแนนน่าจะสามารถขัดขวางการเกิดรีโทรเกรเดชันของโมเลกุลแอมิโลส ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโครงสร้างฟองน้ำและการแยกของน้ำออกจากเจลสตาร์ชข้าวได้

ตารางที่ 8 ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้ายและเซตแบค ของระบบสารละลายสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0%, 0.3% และ 0.5%

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	ความหนืด (RVU)				
	ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง	ความหนืดสุดท้าย	เซตแบค
0.0%	127.92a	102.64a	25.46a	133.88a	31.42a
	± 0.71	± 0.28	± 2.18	± 0.18	± 2.71
0.3%	231.05b	164.29b	66.75b	285.25b	120.96b
	± 5.48	± 5.25	± 0.24	± 3.18	± 2.06
0.5%	330.50c	257.34c	73.17b	400.80c	143.46c
	± 2.83	± 6.24	± 3.42	± 2.30	± 8.54

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

เพื่อให้เข้าใจสาเหตุที่คอนยักกลูโคแมนแนนสามารถช่วยลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำและการแยกของน้ำในระบบเจลสตาร์ชข้าวได้ จึงได้ตรวจสอบสมบัติด้านความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0%, 0.3% และ 0.5% (สารแขวนลอยสตาร์ชข้าว) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (RVA) พบว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนทำให้สมบัติด้านความหนืดของระบบขึ้นตามลำดับ (ดังตารางที่ 8 และ ภาพผนวกที่ ข1) ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากความหนืดของคอนยักกลูโคแมนแนน หรือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของคอนยักกลูโคแมนแนนกับสตาร์ช โดยเมื่อพิจารณาควบคู่ไปกับค่า maximum force ของเจลสตาร์ชข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ตารางที่ 4) ที่มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน ทำให้สันนิษฐานได้ว่าโมเลกุลของคอนยักกลูโคแมนแนนที่เติมลงไปนั้น เข้าไปกีดขวางการจับตัวกันของโมเลกุลสตาร์ช เพราะโดยธรรมชาติแล้วพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันมีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันมากกว่า จึงส่งผลโครงสร้างของเจลมีลักษณะดังภาพที่ 15(ค) คือ สตาร์ชเป็นโครงสร้างหลักของเจลที่แข็งแรง (continuous phase) แล้วมีส่วนของคอนยักกลูโคแมนแนนเป็นตัวเติม (gelled filler) หรือวัฏภาคกระจาย (dipersed phase) (Eidam and Kulicke, 1995) และยังจะเห็นได้ว่าค่า ความหนืดของสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% และ 0.5% นั้นมีค่าความหนืดสูงสุดมากกว่าสตาร์ชข้าว โดยค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดของไฮโดรคอลลอยด์เอง หรือการเกิดอันตรกิริยาของไฮโดรคอลลอยด์

กับส่วนของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว (Rojas *et al.*, 1999) หรือกับแอมิโลเพกทินที่หลุดออกมา (Shi and Bemiller, 2002) ซึ่งจากการทดลองของ Funami *et al.* (2005) เติมคอนยักกลูโค-แมนแนน โลกัสบีนกัม ทารากัม และกัวร์กัมลงในสตาร์ชข้าวสาลี พบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนมีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าความหนืดสุงสุดมากที่สุด ในบรรดาไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 4 ชนิด ส่วนค่าความหนืดลดลงก็มีเพิ่มขึ้นเมื่อเติมคอนยักกลูโคแมนแนน จึงสันนิษฐานว่าคอนยักกลูโคแมน-แนนน่าจะทำให้ความสามารถในการทนต่อความร้อน และแรงเฉือนลดต่ำลง (Lee *et al.*, 2000) ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานของเม็ด สตาร์ชที่เกี่ยวข้องกับการแผ่ขยายของของเม็ดสตาร์ช จนนำไปสู่การถูกทำลาย และค่าเซตแบคก็มีเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อเติมคอนยักกลูโค-แมนแนน แสดงว่าคอนยักกลูโคแมนไปส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในช่วงต้น ๆ อีกทั้งยังทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสารละลายสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันคือ 6.03 ± 0.03 ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่าง จึงไม่ใช่ปัจจัยที่ทำให้สมบัติด้านความหนืดของระบบเปลี่ยนแปลง อีกทั้ง Funami *et al.* (2005) ยังกล่าวว่า ค่าความเป็นกรดด่างไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนไปของสมบัติด้านความหนืดในระบบของ สตาร์ชที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์

ตารางที่ 9 ค่า maximum force ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือก-แข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	maximum force (N)					
		ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	5.193bns ± 0.761	5.171b ± 0.328	5.224b ± 0.330	5.185b ± 0.374	5.033b ± 0.333	5.172b ± 0.322
	ปานกลาง	5.205bns ± 0.460	5.133b ± 0.538	4.941b ± 0.910	5.027b ± 0.838	5.230b ± 0.383	5.079b ± 0.212
	เร็ว	3.213ans ± 0.154	3.216a ± 0.416	3.493a ± 0.346	3.214a ± 0.663	3.468a ± 0.567	3.373a ± 0.252
0.3%	ช้า	3.237ans ± 0.714	3.214a ± 0.164	3.401a ± 0.987	3.118a ± 0.826	3.258a ± 0.938	3.302a ± 1.000
	ปานกลาง	3.747ans ± 0.161	3.548a ± 0.303	3.541a ± 0.365	3.779a ± 0.392	3.751a ± 0.891	3.772a ± 0.267
	เร็ว	3.404ans ± 0.408	3.469a ± 0.239	3.597a ± 0.157	3.605a ± 0.316	3.558a ± 0.250	3.575a ± 0.292
0.5%	ช้า	3.292ans ± 1.389	3.000a ± 0.734	3.257a ± 0.776	3.883a ± 1.328	3.305a ± 1.207	3.238a ± 1.163
	ปานกลาง	3.702ans ± 0.560	3.459a ± 0.237	3.685a ± 0.232	3.850a ± 0.137	3.595a ± 0.273	3.820a ± 0.479
	เร็ว	3.515ans ± 0.402	3.619a ± 0.342	3.721a ± 0.298	3.597a ± 0.517	3.501a ± 0.462	3.578a ± 0.215

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* NS หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 10 ค่า maximum force ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือก-แบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	maximum force (N)					
		ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)					
		0	3	10	17	30	90
0.0%	ช้า	5.193bns ± 0.761	5.245b± 0.129	5.007b ± 0.380	5.170b ± 0.481	5.182b ± 0.598	-
	ปานกลาง	5.205bns ± 0.460	5.265b ± 0.533	4.987b ± 0.927	4.969b ± 0.465	5.042b ± 0.106	-
	เร็ว	3.213ans ± 0.154	3.247a ± 0.435	3.133a ± 0.164	3.320a ± 0.406	3.467b ± 0.386	-
0.3%	ช้า	3.237ans ± 0.714	3.214a ± 0.508	3.048a ± 0.446	3.389a ± 0.389	3.298a ± 0.158	-
	ปานกลาง	3.747ans ± 0.161	3.646a ± 0.323	3.519a ± 0.282	3.486a ± 0.126	3.356a ± 0.148	-
	เร็ว	3.404ans ± 0.408	3.414a ± 0.381	3.597a ± 0.157	3.435a ± 0.195	3.567a ± 0.346	-
0.5%	ช้า	3.292ans ± 1.389	3.289a ± 0.701	3.187a ± 0.507	3.262a ± 0.630	3.598a ± 0.978	-
	ปานกลาง	3.702ans ± 0.560	3.711a ± 0.618	3.777a ± 0.333	3.743a ± 0.506	3.695a ± 0.520	-
	เร็ว	3.515ans ± 0.402	3.332a ± 0.518	3.545a ± 0.457	3.335a ± 0.724	3.216a ± 0.200	-

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 5 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* - หมายถึง ตู้แช่เยือกแข็งเสียจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ -12 °ซ ไว้ได้

ส่วนค่า maximum force (ตารางที่ 9 และ 10) ของตัวอย่างเจลแช่เยือกแข็งซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกันกับค่า cohesiveness และค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ โดยเมื่อพิจารณาในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน พบว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าและปานกลางให้ค่า maximum force สูงกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตรการการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เพราะการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ทำให้ระบบผ่านอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของระบบไปได้อย่างรวดเร็ว จึงสามารถลดการเกิดรีโทรเกเดรชันลงได้ (Kim *et al.*, 1997) ทำให้เจลมีความแข็งลดลง ส่วนค่า maximum force ของเจลสตาร์ชในกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วซึ่งเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.0%, 0.3% และ 0.5% ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่กลุ่มที่ใช้อัตราเร็วแบบปานกลางและช้า พบว่าการเติมกลูโคแมนแนนที่ระดับ 0.5% ทำให้แรงต้านการกดสูงสุดของเจลสตาร์ชข้าวมีค่าต่ำกว่าเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยัก-กลูโคแมนแนน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า cohesiveness และ maximum force ของเจลที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง (ตารางที่ 5, 6, 9 และ 10) เทียบกับเจลสตาร์ชข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง (ตารางที่ 4) จะเห็นได้ว่าเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ซึ่งเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% กับเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางซึ่งเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% หรือ 0.5% รวมทั้งกลุ่มที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทั้งหมดนั้น พบว่าค่า cohesiveness กับ maximum force ที่แสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลมีความใกล้เคียงกันกับเจลสตาร์ชข้าวก่อนการแช่เยือกแข็ง อีกทั้งยังเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 0 ถึง 90 วัน อีกด้วย

โดยสรุปแล้วการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน และการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และโครงสร้างฟองน้ำของเจลสตาร์ชข้าวได้ สำหรับอุณหภูมิการเก็บรักษา -12 และ -18 °ซ ไม่ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสที่ได้แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$)

4. <u>ผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน อัตราการแช่เยือกแข็ง และอุณหภูมิการเก็บรักษาต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน</u>

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทิน ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน (ตารางที่ 11 และ 12) พบว่าค่าที่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 30 และ 90 วัน ทั้งนี้เพราะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ น่าจะอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลสตาร์ชข้าว (ยกเว้นที่อุณหภูมิ -12°ซ ไม่สามารถนำผลการทดลองที่ 90 วัน มาวิจารณ์ได้เช่นเดียวกันกับเรื่องการแยกของน้ำและเนื้อสัมผัสของเจล แต่โดยภาพรวมจะเห็นว่าค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินจะลดลง เมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งเพิ่มขึ้น) โดย Charoenrein *et al.* (2004) พบว่าเจลสตาร์ชข้าวมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอยู่ในช่วง -2.5 ถึง -3.0 °ซ ส่วนการเติมไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งเป็นสารโมเลกุลใหญ่ลงในเจลสตาร์ชข้าวนั้น น่าจะทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น (Ferrero and Zaritzky 2000; Roos, 1995a; Roos and Karel, 1991) ดังนั้นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยักกลูโคแมนแนน จึงควรจะสูงกว่าเจลสตาร์ชข้าว ทำให้ระบบของตัวอย่างเจลแช่เยือกแข็งทั้งหมด 18 สภาวะ อยู่ในสภาวะกลาส จึงตรวจไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทิน เช่นเดียวกันกับค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ ค่า cohesiveness, maximum force, และการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ

ตารางที่ 11 ค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่เยือกแข็ง	ค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทิน (J/g dry weight) ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)		
		10	30	90
0.0%	S	5.31bns ± 0.05	4.66b ± 0.31	5.33b ± 0.84
	M	1.61ans ± 0.06	1.44a ± 1.10	1.69b ± 1.09
	F	1.00ans ± 0.71	0.91a ± 0.21	1.44b ± 0.21
0.3%	S	5.04bns ± 1.29	4.72b ± 0.67	4.76b ± 1.01
	M	1.51ans ± 0.35	1.71a ± 0.11	1.69a ± 0.06
	F	1.68ans ± 0.29	1.71b ± 0.38	1.52a ± 0.83
0.5%	S	4.41bns ± 0.12	4.56b ± 0.38	4.38b ± 0.49
	M	1.70ans ± 0.67	2.32a ± 0.21	1.62a ± 0.70
	F	1.12ans ± 1.02	1.52a ± 0.45	1.03a ± 1.06

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

วิธีการเตรียมตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้จะเตรียมเป็นระบบเจลให้มีความใกล้เคียงกับระบบจริงของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของระบบและ การเกิดรีโทรเกรเดชันมีความถูกต้อง โดยจะมีการนำไปหมุนเหวี่ยงเอาน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ก่อนนำไปตรวจสอบค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินด้วย สำหรับงานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่จะเตรียมเจลสตาร์ชในจานอลูมิเนียม (aluminium pan ของเครื่อง DSC) ซึ่งใส่ตัวอย่างได้น้อยมาก หรืออีกวิธีก็คือทำให้สตาร์ชเกิดการเจลทิไนเซชันก่อน จากนั้นจึงทำแห้งแล้วนำไปเก็บรักษาก่อนนำไปตรวจสอบการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง DSC (Kim *et al.*, 1997; Yook *et al.*, 1993; Yoshimura *et al.*, 1996) ซึ่งการเจลด้วยวิธีการทั้งสองนี้ อาจทำให้ปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันที่วัดได้ไม่ถูกต้องมากนัก เพราะเจลที่เตรียมไม่มีความใกล้เคียงกับระบบเจลจริง

ตารางที่ 12 ค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 °ซ

เจลสตาร์ชข้าวผสม KGM	อัตราการแช่-เยือกแข็ง	ค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทิน (J/g dry weight) ระยะเวลาการเก็บรักษา (วัน)		
		10	30	90
0.0%	S	5.51bns ± 0.94	5.78b ± 0.29	-
	M	2.46ans ± 1.96	2.43a ± 0.29	-
	F	0.85ans ± 0.41	0.90a ± 0.69	-
0.3%	S	5.02bns ± 0.58	4.39b ± 0.29	-
	M	2.51ans ± 0.29	1.88a ± 0.65	-
	F	1.14ans ± 0.53	1.17a±1.18	-
0.5%	S	4.60bns ± 1.05	4.56b ± 1.60	-
	M	2.51ans ± 1.03	1.56a ± 0.16	-
	F	1.56bns ± 0.94	1.15a ± 0.04	-

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยตามแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* - หมายถึง ตู้แช่เยือกแข็งเสียจึงไม่สามารถรักษาอุณหภูมิที่ -12 °ซ ไว้ได้

และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทิน ในแต่ละสภาวะที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเดียวกัน (ตารางที่ 11 และ 12) พบว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนไม่มีผลไปช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน ในขณะที่การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินลงได้ ซึ่งจากผลค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (ตารางที่ 2 และ 3) ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2 ว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งเพียงอย่างเดียว (ในกลุ่มที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนนระดับเดียวกัน) สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำได้มากกว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน เนื่องจากเมื่อความร้อนของถูกดึงออกอย่างรวดเร็ว น้ำแข็งในระบบจึงเกิดขึ้นเร็วกว่าการเกิดผลึกขององค์ประกอบอื่นในระบบ (Ferrero *et al.*, 1994) ซึ่งในที่นี้ก็คือแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน แสดงว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถ

ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน อีกทั้งยังช่วยให้ผลึกน้ำแข็งที่ได้มีขนาดเล็กลงอีกด้วย (กลไกดังภาพที่ 17) ในขณะที่การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถยับยั้งได้เพียงรีโทรเกรเดชันของแอมิโลส ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งร่วมกับการเติมคอนยัก-กลูโคแมนแนน จึงสามารถลดการเกิดโครงสร้างฟองน้ำ (ตารางที่ 5) และค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำลงได้อย่างมาก แต่งานวิจัยที่มีผู้ศึกษาก่อนหน้านี้กลับพบว่าคอนยักกลูโคแมนแนนจะไปส่งเสริมการเกิดรีโทรเกรดในระยะต้น (รีโทรเกรเดชันของแอมิโลส) แต่สามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรดในระยะยาวได้ (รีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน) (Khanna and Tester, 2005; Funami *et al.*, 2005; Yoshimura *et al.*, 1996, 1998) ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากชนิดของสตาร์ช วิธีการ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมเจลที่ใช้ โดยการทดลองของ Yoshimura *et al.* (1996, 1998) จะกวน (ให้แรงเฉือน) สารแขวนลอยสตาร์ชข้าวโพดผสมคอนยักกลูโคแมนแนนที่อุณหภูมิ 95 °ซ ในขณะที่ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างที่ใช้คือสตาร์ชข้าวและจะกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 80 °ซ จากนั้นจึงนำไปนึ่งในหม้อน้ำเดือด (ดังในหัวข้อวิธีการ ข้อ 3.1) ซึ่งสาเหตุที่ต้องเตรียมเจลด้วยวิธีนี้ เนื่องมาจากสตาร์ชข้าวเกิดเจลได้เร็ว และความหนืดของระบบสตาร์ชข้าวที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับคอนยักกลูโคแมนแนน ทำให้ไม่สามารถเทลงในพิมพ์มีมีขนาดเล็กได้ (หลอดขนาด 25 มิลลิลิตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 มิลลิเมตร และเหตุผลที่ใช้พิมพ์ขนาดเล็กนี้ก็เพื่อความเหมาะสมในการวัดเนื้อสัมผัส และเป็นการประหยัดตัวอย่างที่ใช้เพราะต้องเตรียมเจลเป็นจำนวนมาก) โดยการทดลองเบื้องต้นเมื่อทดลองกวนเจลที่ 90 และ 95 °ซ พอยกบีกเกอร์ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ สารละลายนั้นมีความหนืดสูงมากเมื่อเทลงพิมพ์ได้ประมาณ 2 ชิ้น ส่วนที่เหลือในอยู่ก็เกิดเป็นเจลทำให้ไม่สามารถเทต่อไปได้

ในปี 2002 Mandala *et al.* ศึกษาสภาวะการเตรียมเจลจากสารละลายสตาร์ชมันฝรั่งผสมแซนแทนกัม พบว่าเมื่อเตรียมสารละลายที่อุณหภูมิ 75 °ซ เม็ดสตาร์ชจะอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องของแซนแทนกับแอมิโลส แต่หากเตรียมที่อุณหภูมิ 90 °ซ ระบบจะประกอบด้วยชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชที่แตกหักกับเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ หรือรวมตัวกันกระจายอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องที่เป็นแอมิโลส แอมิโลเพกทิน และแซนแทน ทำให้สันนิษฐานได้ว่าในระบบเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนของงานวิจัยนี้ว่า เม็ดสตาร์ชข้าวน่าจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องของคอนยักกลูโคแมนแนนกับแอมิโลส ดังนั้นคอนยักกลูโคแมนแนนจึงสามารถยับยั้งได้เฉพาะรีโทรเกรดของแอมิโลส ซึ่งต่างจากผลการทดลองในเบื้องต้น (ตารางผนวกที่ ข1) ที่เตรียมเจลโดยกวนสารละลายสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนที่อุณหภูมิ 95 °ซ แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้แช่เยือกแข็งเป็นเวลา 14 วัน เมื่อสังเกตจากลักษณะปรากฏพบว่าไม่เกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำและแทบจะไม่มีน้ำแยกออกมาเลย จึงสันนิษฐานได้ว่าระบบเจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนนในส่วนนี้มีมีวัฏภาคต่อเนื่องเป็นส่วนของแอมิโลส แอมิโลเพกทิน และคอนยักกลูโคแมนแนน ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้คอนยักกลูโคแมนแนนสามารถยับยั้งได้ทั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน

โดยสรุปแล้ว การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถช่วยลดปริมาณการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินได้ แต่การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนนั้นไม่ได้ผลไปลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทิน สำหรับอุณหภูมิการเก็บรักษา -12 และ -18 °ซ ไม่ทำให้ค่าพลังงานในการสลายผลึกแอมิโลเพกทินที่ได้แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$)

5. <u>การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนและอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง</u>

การตรวจสอบความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำจากการแช่เยือกแข็งแล้วคืนรูปจากเยือกแข็งทั้งหมด 7 รอบ ซึ่งเป็นเร่งการเกิดรีโทรเกร-เดชันของเจลสตาร์ช (Biliaderis, 1998; Brennan *et al.*, 2004; Jacobson and BeMiller, 1998) ทำให้เกิดการแยกของน้ำเร็วขึ้น (Varavinit *et al.*, 2000, 2002) เพื่อหาระดับการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนและอัตราการแช่เยือกแข็งที่เหมาะสม โดยเทียบกับผลของค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำที่หาได้จากการเก็บตัวอย่างเจลไว้ในสภาวะปกติ (หัวข้อที่ 2) ซึ่งจากค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำในหัวข้อที่ 2 (ตารางที่ 2 และ 3) พบว่าสภาวะที่สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำได้ดีที่สุดมีอยู่ 3 สภาวะด้วยกันคือ (1) เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว (2) เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง (3) หรือเร็ว แต่เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำด้วยวิธีแช่เยือกแข็งแล้วคืนรูปจากเยือกแข็ง (ดังตารางที่ 13) เพื่อดูผลการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน และอัตราการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็ง จะเห็นว่าเมื่อคืนรูปจากเยือกแข็งครบ 7 รอบ แล้วจะเหลืออยู่เพียง 2 สภาวะ คือ การเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราแช่เยือกแข็งแบบปานกลางหรือเร็วเท่านั้นที่ยังคงให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำน้อยที่สุดในบรรดา 9 สภาวะ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำประมาณ 39%

ตารางที่ 13 ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%syneresis) ในการคืนรูปจากเยือกแข็ง 1-7 รอบ ของเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน (KGM) 0.0%, 0.3% และ 0.5% ที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า ปานกลาง และเร็ว

เจลสตาร์ชข้าวผสมกับKGM	อัตราการแช่เยือก-แข็งแบบ	ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ (%)						
		รอบที่						
		1	2	3	4	5	6	7
0.0%	ช้า	62.50d_{A} ± 0.82	66.22d_{B} ± 0.60	65.96e_{B} ± 0.35	66.60c_{BC} ± 1.15	66.93d_{BC} ± 0.41	67.33c_{BC} ± 0.50	68.27d_{D} ± 0.24
	ปานกลาง	33.31c_{A} ± 5.21	60.51cd_{B} ± 2.70	62.69e_{B} ± 0.79	61.94c_{B} ± 1.26	60.98cd_{B} ± 1.51	62.45c_{B} ± 2.04	62.52c_{B} ± 5.22
	เร็ว	26.38bc_{A} ± 5.27	63.47cd_{B} ± 2.18	60.12de_{B} ± 5.26	63.35c_{B} ± 4.23	64.26cd_{B} ± 3.90	62.81c_{B} ± 5.64	63.14cd_{B} ± 3.64
0.3%	ช้า	32.02c_{A} ± 6.85	57.78c_{B} ± 8.41	56.62c_{B} ± 5.47	62.57c_{B} ± 3.77	64.91b_{B} ± 2.95	63.70c_{B} ± 2.67	65.33cd_{B} ± 2.90
	ปานกลาง	4.32a_{A} ± 3.07	46.17b_{B} ± 2.06	48.73b_{BC} ± 2.60	51.80b_{C} ± 4.49	51.15b_{C} ± 0.67	51.82b_{C} ± 1.73	50.59b_{C} ± 0.56
	เร็ว	1.34a_{A} ± 0.70	46.76b_{B} ± 2.23	49.55b_{BC} ± 2.83	52.69b_{C} ± 1.44	52.02b_{C} ± 3.40	52.19b_{C} ± 3.12	52.13b_{C} ± 4.90
0.5%	ช้า	21.53b_{A} ± 6.40	44.65b_{B} ± 2.91	43.53b_{B} ± 3.31	49.33b_{BCD} ± 0.01	49.68b_{CD} ± 2.17	49.78b_{CD} ± 1.37	52.55b_{D} ± 2.00
	ปานกลาง	1.11a_{A} ± 0.04	27.10a_{B} ± 0.97	31.95a_{C} ± 1.28	34.19a_{CD} ± 0.67	36.07a_{DE} ± 1.24	38.03a_{E} ± 2.64	38.06a_{E} ± 1.73
	เร็ว	0.99a_{A} ± 0.16	28.91a_{B} ± 3.06	32.76a_{BC} ± 3.63	34.01a_{BCD} ± 7.72	37.51a_{CD} ± 3.03	37.96a_{CD} ± 4.72	39.83a_{D} ± 2.09

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

* ค่าเฉลี่ยตามด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

สำหรับเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำในการคืนรูปจากเยือกแข็งรอบที่ 1 สูงถึง 62.50% และค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอีกเล็กน้อย ($p \leq 0.05$) ระหว่างการคืนรูปรอบที่ 2 ถึง 7 (ภาพผนวกที่ ข3) ซึ่งจากงานวิจัยของ Jacobson and BeMiller (1998) ศึกษาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเมื่อคืนรูปเจลสตาร์ชข้าวโพดจากเยือกแข็งเพียงแค่รอบแรก สายโมเลกุลของแอมิโลสจะเกิดการเคลื่อนเข้ามาจับกัน (aggregate) ทำให้เม็ดสตาร์ชที่พองตัวถูกทำลายจนเหลือเพียงชิ้นส่วนที่แตกหักจำนวนมาก และจะถูกทำลายจนมากที่สุดที่การคืนรูปรอบที่ 3 และในปี 2003 Jeong and Lim ทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจลสตาร์ชข้าวโพดที่แช่เยือกแข็ง แล้วคืนรูปจากเยือกแข็งทั้งหมด 5 รอบ ด้วยกล้องอิเลคตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมมเบรนของโครงสร้างเจลมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 รอบ เป็น 3 รอบ และ 5 รอบ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการตรวจสอบความสามารถในการทนต่อการคืนรูปของเจลสตาร์ช โดยการหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำนั้นค่อนข้างมีความไว (sensitivity) ในการแยกความแตกต่างระหว่างตัวอย่างใกล้เคียงกันกับการส่องกล้องดูโครงสร้างของเจล อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็ว แต่จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งของเจลสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง มักใช้วิธีการหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำด้วยการหมุนเหวี่ยง โดยพบว่าเมื่อจำนวนรอบของการคืนรูปจากเยือกแข็งเพิ่มมากขึ้น จะไม่สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำได้ เนื่องจากการเกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้หลังจากหมุนเหวี่ยงแล้วเจลก็จะเกิดการดูดน้ำกลับ (พิณทิพย์, 2547; Varavinit *et al.*, 2000) หรือการใช้ปั๊มดูดแยกน้ำออก (suction) (Lee *et al.*, 2002) หรือการใช้กระดาษกรองเพื่อดูดซับน้ำจากเจล (Ferrero *et al.*, 1994) ทำให้สามารถหาค่าน้ำออกจากเจลที่เกิดลักษณะโครงสร้างฟองน้ำได้ แต่เป็นวิธีการค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลามาก จึงไม่เหมาะสมในการทดลองกับตัวอย่างเจลจำนวนมาก ซึ่งวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์รวมกันระหว่างหลักการหมุนเหวี่ยง (Sudhakar *et al.*, 1992) และการใช้ปั๊มดูดแยกน้ำออกเข้าด้วย จึงทำให้น้ำไม่ถูกดูดกลับเข้าไปหลังจากการหมุนเหวี่ยง อีกทั้งยังสะดวกรวดเร็วอีกด้วย

ในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน เมื่อใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็ว (จากภาพผนวกที่ ข3) จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อรอบการคืนรูปจากเยือกเพิ่มจากรอบที่ 1 เป็นรอบที่ 2 และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยระหว่างการคืนรูปไปจนถึงรอบที่ 7 ซึ่งต่างจากตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงมากตั้งแต่การคืนรูปในรอบแรก (รอบที่ 1 ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งต่างกัน ส่วนรอบที่ 2 ถึง 7 จะแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าทั้งหมด) เพราะการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้านั้น จะทำให้ช่วงเวลาที่เจลสตาร์ชอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก (maximum nucleation) การต่อตัวกัน และจับตัวกันของผลึก

ยาวนานขึ้น (Jacobson and BeMiller, 1998) กว่าตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการ แช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็ว ส่วนเมื่อพิจารณาในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่เติม 0.3%, และ 0.5% คอนยักกลูโคแมนแนน พบว่าการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งก็ให้ผลคล้ายกับเจลสตาร์ชข้าว แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำจากรอบที่ 1 ไปรอบที่ 2 (ดูจากความชันของกราฟภาพผนวกที่ ข4 และ ข5) โดยตัวอย่างเจลที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนนแล้วแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำที่ได้ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็ว (แตกต่างกับเจลสตาร์ชข้าวที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งต่ำจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำสูงตั้งแต่รอบที่ 1 แล้ว ทำให้ค่าที่ได้จากรอบที่ 1 และ 2 ไม่ค่อยแตกต่างกัน) แสดงว่าคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถเพิ่มความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าวได้ และยังเห็นได้ว่าในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่มีการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน แม้จะคืนรูปจากเยือกแข็งถึง 7 รอบแล้ว แต่เจลที่เริ่มต้นด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็ว ยังคงมีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำต่ำกว่าตัวอย่างที่เริ่มการแช่เยือกแข็งในรอบแรกด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า

ส่วนผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนต่อความคงตัวของของการคืนรูปจากเยือกแข็งนั้น จะเห็นได้ชัดเจนในกลุ่มอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แม้ว่าจะเติมคอนยักกลูโคแมนแนนถึงระดับ 0.5% แล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำก็คงสูงถึง 44.65% (ตารางที่ 13 การคืนรูปรอบที่ 2) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทั้งการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน และการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งล้วนมีผลไปช่วยเพิ่มความคงตัวของเจลสตาร์ชข้าว แต่การทำให้เจลสตาร์ชข้าวมีความคงตัวสูง ยังมีความจำเป็นต้องมีเติมคอนยักกลูโคแมนแนนร่วมกับการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็ง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 5 นี้ และแม้ว่าวิธีการเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชันเพื่อดูผลของอัตราการแช่เยือกแข็งและการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนที่ใช้นี้ จะมีความสะดวกและรวดเร็ว แต่ก็ยังไม่สามารถบ่งชี้ถึงผลของการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนได้อย่างชัดเจน หากเปรียบเทียบกับการเก็บเจลแช่เยือกแข็งในสภาวะจริง

นอกจากนี้แล้ว จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำในตัวอย่างเจลแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าในรอบที่ 1 นั้น มีค่าเท่ากับ 62.50, 32.02 และ 21.53% (0.0%, 0.3%, และ 0.5% คอนยักกลูโคแมนแนนตามลำดับ) ซึ่งต่ำกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำหลังการแช่เยือกแข็งวันที่ 0 วัน (ตารางที่ 2 และ 3) ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้าด้วยตู้แช่เยือกแข็งนั้นทำได้ยาก โดยในการทดลองหัวข้อที่ 2, 3 และ 4 นั้น เป็นการเตรียมตัวอย่างในช่วงเดียวกัน ทำให้ปริมาณของในตู้แช่เยือกแข็งจึงมีเป็นจำนวนมาก โดยมีอัตราการแช่เยือกแข็งประมาณ 0.20 °ซ/นาที ซึ่งต่ำกว่าในช่วงที่ทำการทดลองในส่วนนี้ (ประมาณ 0.35 °ซ/นาที ข้อมูลการแช่เยือกแข็งดังภาพผนวกที่ ข7) ส่วนการใช้เครื่อง

แช่เยือกแข็งแบบไคโอจินิกสามารถควบคุมอัตราการแช่เยือกแข็งได้ดี ทำให้ไม่พบปัญหานี้ในกลุ่มของอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและสูง

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการแช่เยือกแข็ง และการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน ที่ได้จากวิธีการเร่งการเกิดการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้ จึงสรุปได้ว่าเจลที่มีความคงตัวต่อการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งสูงที่สุดคือ เจลสตาร์ชข้าวผสมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% หรือ 0.5% ที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งสูง

สรุป

1. การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งสามารถลดการแยกของน้ำ การเปลี่ยนเปลี่ยนเนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวรวมทั้งเจลสตาร์ชข้าวที่ผสมคอนยักกลูโคแมนแนนลงได้ โดยในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนนนั้น การใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วนั้นมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสได้ดีกว่าการใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและช้าตามลำดับ ส่วนการเกิดโครงสร้างฟองน้ำและการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนนนี้ ไม่ว่าจะแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางหรือเร็วนั้นไม่มีความแตกต่างกัน สำหรับกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% และ 0.5% นั้น การเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งก็มีแนวโน้มไปการลดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ คล้ายกันกับเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน แต่ค่าที่ได้อาจไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเท่ากับในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ไม่ได้เติมคอนยักกลูโคแมนแนน

2. การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนสามารถลดการแยกของน้ำ การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเจล การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ และการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลสลงได้หากพิจารณาในกลุ่มที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า โดยการเติมคอนยักกลูโคแมนแนนในระดับ 0.5% จะสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และการเกิดโครงสร้างฟองน้ำได้ดีกว่าการเติมในระดับ 0.3% และ 0.0% ตามลำดับ แต่คอนยักกลูโคแมนไม่สามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ สำหรับในกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลางและเร็วนั้น การเติมคอนยักกลูโคแมนแนนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นก็มีแนวโน้มไปลดค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส และการเกิดโครงฟองน้ำคล้ายกันกับกลุ่มเจลสตาร์ชข้าวที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า แต่ค่าที่ได้อาจไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนดังในกลุ่มเจลที่ใช้อัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า และจากผลการทดลองต่าง ๆ ทำให้สันนิษฐานได้ว่าคอนยักกลูโคแมนแนนน่าจะเข้าไปอยู่เป็นส่วนของวัฏภาคกระจายในโครงสร้างหลักของสตาร์ชข้าว จึงสามารถเพิ่มความคงตัวให้แก่เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้

3. โดยสรุปแล้วการเพิ่มอัตราการแช่เยือกแข็งมีประสิทธิภาพต่อการลดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในระบบเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ดีกว่าการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน

4. การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -12 และ -18 °ซ ไม่มีผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของน้ำ การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ ค่า cohesiveness ค่า maximum force รวมไปถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกทินแตกต่างกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 0 ถึง 90 วัน เช่นเดียวกันกับผลของทุกสภาวะอัตราการแช่เยือกแข็งและการเติมคอนยักกลูโคแมนแนน ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 0 ถึง 90 วัน (ในกรณีอุณหภูมิการเก็บ -12 °ซ ยังไม่สามารถสรุปผลที่ 90 วันได้ เนื่องจากตู้ที่ใช้เก็บตัวอย่างเกิดการขัดข้องขึ้น)

5. เจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งที่ให้ค่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกันกับเจลสตาร์ชข้าวก่อนนำไปแช่เยือกแข็งมีดังนี้ คือ เจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% แล้วแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบช้า, เจลสตาร์ชข้าวที่เติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.3% หรือ 0.5% แล้วแช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง และกลุ่มที่แช่เยือกแข็งด้วยอัตราการแช่เยือกแข็งแบบเร็วทั้งหมด

6. สภาวะที่สามารถลดการแยกของน้ำ การเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส การเกิดโครงสร้างฟองน้ำ และการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชข้าวแช่เยือกแข็งได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ การเติมคอนยักกลูโคแมนแนน 0.5% ร่วมกับการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราแช่เยือกแข็งแบบปานกลาง หรือเร็ว

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

ในกรณีการแช่เยือกแข็งด้วยอัตราเร็วแบบช้า ถ้าเป็นไปได้ควรจะหาตู้แช่เยือกแข็งเพิ่มอีกใบไว้สำหรับเก็บเจลในช่วงแรกของการแช่เยือกแข็ง โดยต้องควบคุมปริมาณเจลที่จะใส่ในแต่ละครั้ง เพื่อให้อัตราการแช่เยือกแข็งในแต่ละรอบมีความใกล้เคียงกัน จากนั้นค่อยย้ายไปรวมกับตัวอย่างอื่น ๆ ระหว่างการเก็บรักษา