บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการดำเนินการวิจัย

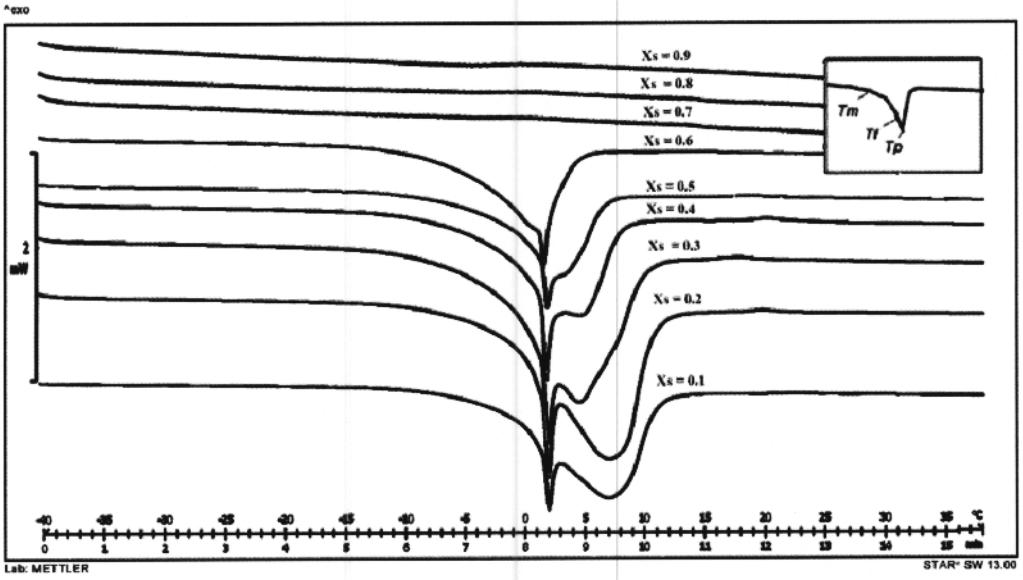
4.1 ไดอะแกรมสถานะของข้าว

เนื่องจากไดอะแกรมสถานะของอาหาร เป็นแผนภาพที่บ่งบอกสถานะของอาหาร อันเป็นผลจากปริมาณน้ำหรือของแข็ง และอุณหภูมิ ซึ่งสามารถช่วยบอกการเปลี่ยนแปลงสถานะของอาหาร เช่น จุดเยือกแข็ง และการเกิดกลาสทรานซิชันได้ ลักษณะของไดอะแกรมสถานะของอาหารโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยเส้นกราฟที่สำคัญ 2 เส้น คือ เส้นกราฟของกลาสทรานซิชัน (glass line) และเส้นกราฟของจุดเยือกแข็งหรือจุดหลอมเหลว (freezing/melting curve) โดยเฉพาะเส้นกราฟของกลาสทรานซิชันจะเป็นเส้นแบ่งสถานะที่เป็นสถานะคล้ายแก้ว และสถานะคล้ายยาง อาหารหรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นอสัณฐานหรือกึ่งผลึกในสภาวะใต้เส้นกราฟของกลาสทรานซิชันจะมีสถานะคล้ายแก้ว หากอยู่เหนือเส้นกราฟกลาสทรานซิชันจะแสดงสถานะคล้ายยาง

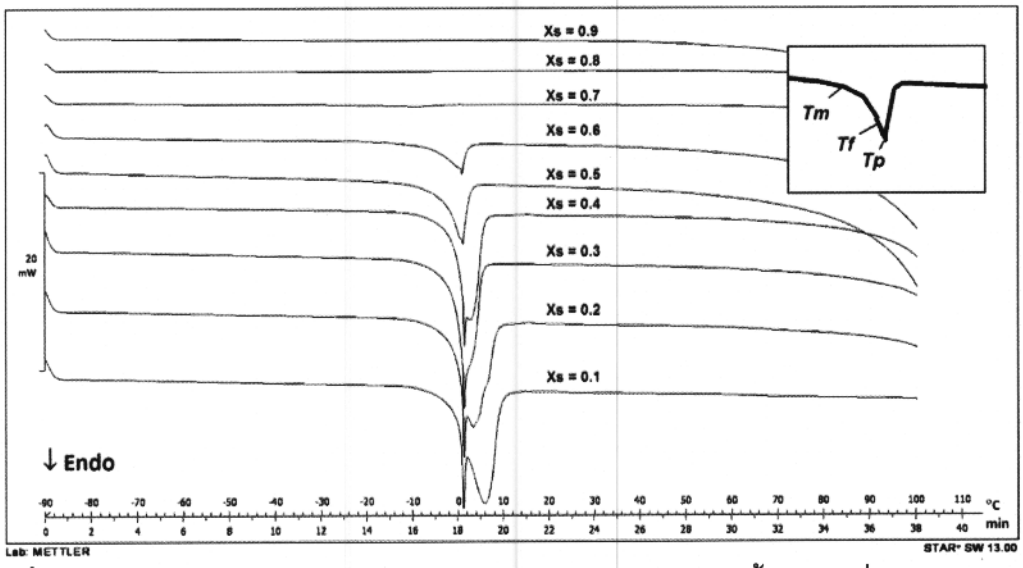
4.1.1 กราฟของจุดเยือกแข็งหรือจุดหลอมเหลว

เมื่อนำตัวอย่างข้าวที่มีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง90 (น้ำหนักเปียก) หรือสัดส่วนของแข็ง (X_s) ตั้งแต่ 0.9 (ความชื้นร้อยละ 10) ลดลงมาจนถึง 0.1 (ความชื้นร้อยละ 90) มาตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC จากนั้นวัดค่าการไหลของพลังงานความร้อนทั้งหมด โดยกำหนดให้เครื่อง DSC ทำการให้ความร้อนตั้งแต่ -90 องศาเซลเซียส ถึง 120 องศาเซลเซียส จะได้เทอร์โมแกรมของตัวอย่างข้าวดังแสดงในภาพที่ 43

a) Waxy rice (Sun-pah-tawng)



b) Non-waxy rice (Phitsanulok 2)



ภาพที่ 43 เทอร์โมแกรมแสดงค่าการไหลของพลังงานความร้อนทั้งหมด เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC ของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2

จากภาพที่ 43 จะเห็นว่าตัวอย่างข้าวทั้งสองพันธุ์แสดงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน สังเกตได้จากพีคของกราฟเทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิใกล้กับ 0 องศาเซลเซียส โดยจะพบการเกิดพีคของกราฟเทอร์โมแกรมในตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 เป็นต้นไป (สัดส่วนของแข็งน้อยกว่า 0.6) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 40 อาจมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอที่จะทำให้ตรวจสอบพบจุดเยือกแข็งหรือตัวอย่างมีปริมาณน้ำที่เชื่อมกับองค์ประกอบอื่น (bound water) เพียงอย่างเดียวไม่มีในส่วนของ

ปริมาณน้ำอิสระ (free water) เพียงพอที่จะทำให้เกิดการแข็งตัวของน้ำได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวอย่างที่มีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไปหรือมีสัดส่วนของแข็งตั้งแต่ 0.6 ลงมา เพื่อนำไปตรวจสอบหาจุดเยือกแข็ง โดยทำการวิเคราะห์จุดเยือกแข็ง และรายงานอุณหภูมิ 3 จุด ได้แก่ T_m, T_f และ T_p ผลการวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของตัวอย่างข้าวเหนียวพันธุ์สันปาตองดังแสดงในตารางที่ 8 และผลการวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของตัวอย่างข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2 ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์จุดเยือกแข็งแสดงอุณหภูมิ T_m, T_f และ T_p ของตัวอย่างข้าวเหนียว

Solid Fraction (X_s)	T_m (°C)	T_f (°C)	T_p (°C)	ΔH (J/g)
0.1	-1.55 ± 0.14^{a}	-0.05 ± 0.03^{a}	3.29 ± 0.23^{a}	95.84 ± 0.66^{a}
0.2	-2.71 ± 0.37^{ab}	-0.08 ± 0.04^{a}	2.26 ± 0.17^{b}	83.73 ± 0.55^{b}
0.3	-3.39 ± 0.38^{b}	-1.62 ± 0.41^{ab}	1.63 ± 0.08^{c}	74.80 ± 0.45^{c}
0.4	-4.95 ± 0.23^{c}	-2.59 ± 0.57^{b}	1.32 ± 0.05^{c}	64.21 ± 0.06^{d}
0.5	-5.47 ± 0.39^{cd}	-4.40 ± 0.59^{c}	1.38 ± 0.00^{c}	63.05 ± 0.00^{d}
0.6	-6.70 ± 0.39^{d}	-6.51 ± 0.56^{d}	1.42 ± 0.01^{c}	31.18 ± 0.45^{e}

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์จุดเยือกแข็งแสดงอุณหภูมิ T_m, T_f และ T_p ของตัวอย่างข้าวเจ้า

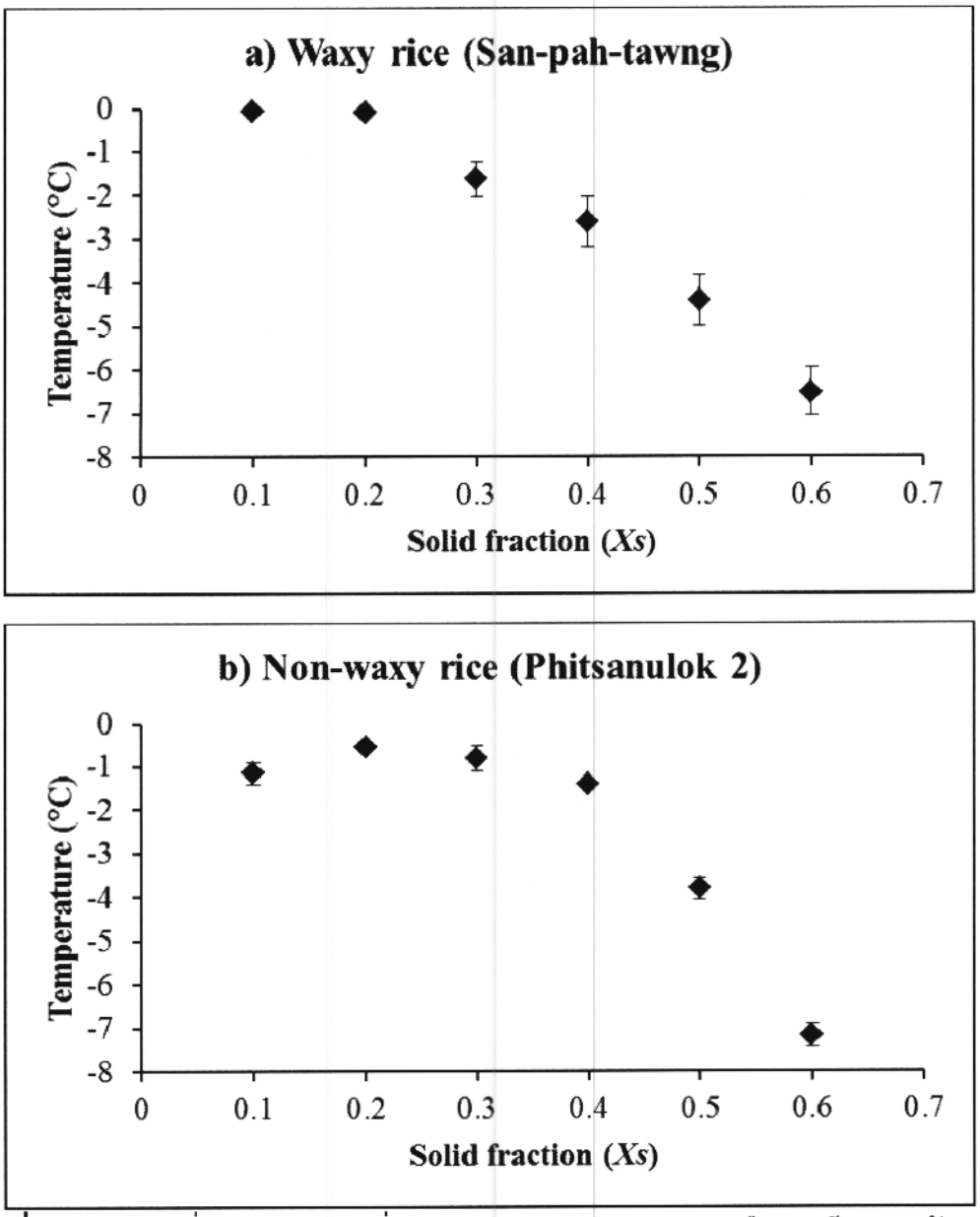
Solid Fraction (X_s)	T_m (°C)	T_f (°C)	T_p (°C)	ΔH (J/g)
0.1	-6.81 ± 0.23^{a}	-1.14 ± 0.25^{a}	0.93 ± 0.09^{a}	102.97 ± 3.68^{a}
0.2	-7.30 ± 0.23^{a}	-0.55 ± 0.01^{a}	1.08 ± 0.23^{a}	97.22 ± 1.65^{a}
0.3	-7.63 ± 0.54^{a}	-0.81 ± 0.29^{a}	1.18 ± 0.22^{a}	81.81 ± 3.09^{b}
0.4	-7.83 ± 0.05^{a}	-1.41 ± 0.04^{a}	0.91 ± 0.04^{a}	66.78 ± 3.59^{c}
0.5	-9.73 ± 0.22^{b}	-3.80 ± 0.25^{b}	0.90 ± 0.10^{a}	38.53 ± 1.53^{d}
0.6	-10.99 ± 0.42^{b}	-7.17 ± 0.28^{c}	-0.58 ± 0.23^{b}	16.84 ± 0.36^{e}

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

จากตารางจะเห็นว่าจุดเยือกแข็งของตัวอย่างทั้งข้าวเหนียว และข้าวเจ้า เมื่อพิจารณาจาก T_f จะอยู่ในช่วง -7 ถึง 0 องศาเซลเซียส โดยเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้น จุดเยือกแข็งจะลดลง เช่น ตัวอย่างข้าวเหนียว จุดเยือกแข็งลดลงจาก -0.05, -0.08, -1.62, -2.59, -4.40 และ -6.51 องศาเซลเซียส ตามลำดับเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นจาก 0.1 ถึง 0.6 ในขณะที่ตัวอย่างข้าวเจ้า จุดเยือกแข็งลดลงจาก -1.14, -0.55, -8.81, -1.41 -3.80 และ -7.17 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นจาก 0.1 ถึง 0.6

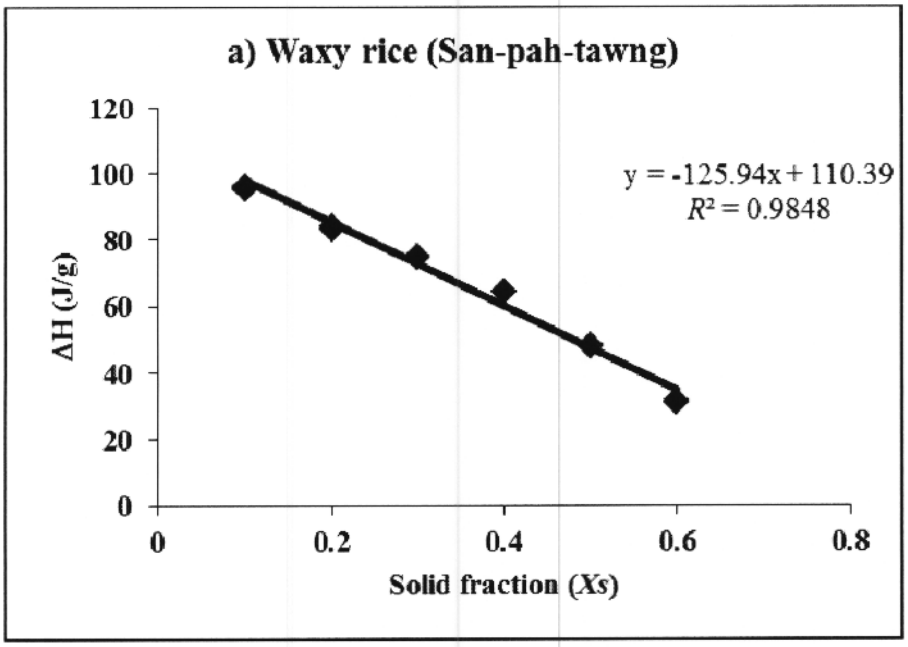
ทิศทางการเปลี่ยนแปลงของจุดเยือกแข็งนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับจุดอื่น ๆ ทั้งในส่วนของ T_m และ T_p ซึ่งทั้ง T_m และ T_p มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างข้าวเหนียว จุด T_m ลดลงจาก -1.55, -2.71, -3.39, -4.95, -5.47 และ -6.70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจุด T_p ลดลงจาก 3.29, 2.26, 1.63, 1.32, 1.38 และ 1.42 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างข้าวเจ้า จุด T_m ลดลงจาก -6.81, -7.30, -7.63, -7.83, -9.73 และ -10.99 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจุด T_p ลดลงจาก 0.93, 1.08, 1.18, 0.91, 0.90 และ -0.58 องศาเซลเซียส ตามละดับ จะเห็นได้จากตารางที่ 8 และ 9 ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าจุดเยือกแข็งจะลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของแข็งในตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน กราฟแสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเยือกแข็งของตัวอย่างข้าวเหนียว และข้าวเจ้า เมื่อสัดส่วนของแข็งเปลี่ยนไปแสดงได้ดังภาพที่ 44

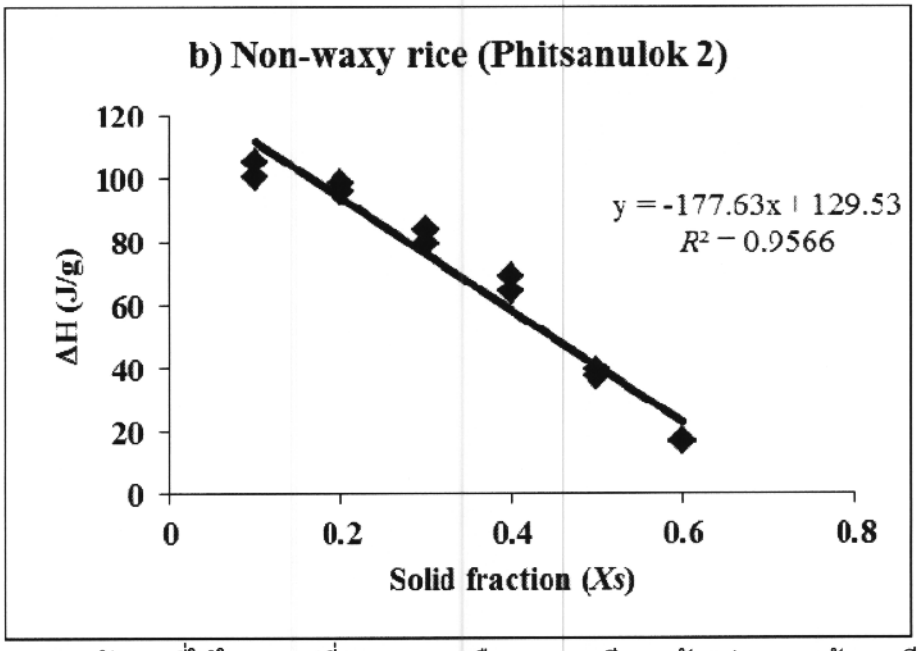
หากเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างข้าวเหนียว และข้าวเจ้าแล้ว จะพบว่าตัวอย่างข้าวเจ้าจะมีการลดลงของจุดเยือกแข็งที่มากกว่าตัวอย่างข้าวเหนียว ที่สัดส่วนของแข็งระดับเดียวกัน (ตารางที่ 8-9 และ ภาพ 44)



ภาพที่ 44 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเยือกแข็งของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2 (เส้นในแนวตั้งแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจาณาจากค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะหรือเอนทาลปี (ΔH) จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวของน้ำ เมื่อให้ความร้อนผ่านช่วงจุดเยือกแข็ง มีการใช้พลังงานลดลง เมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้น (ตาราง 8 ถึง 9 และภาพ 45) โดยกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำเป็นสมการ-เส้นตรงจะแสดงได้ดังภาพ 45 โดยข้อมูลที่ได้มีค่า R^2 มากกว่า 0.95 จึงถือว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ





ภาพที่ 45 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะหรือเอนทาลปีของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก2

น้ำในอาหารทุกชนิดประกอบด้วยน้ำที่อยู่แบบอิสระ และสามารถแช่แข็งได้ (freezable water) นอกจากนั้นจะมีน้ำบางส่วนที่ไม่สามารถแช่แข็งได้ (un-freezable water) โดยน้ำกลุ่มนี้อาจเป็นน้ำที่โมเลกุลเชื่อมโยงกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในอาหาร (Farroni & Buera, 2014)

ค่าพลังงานเอนทาลปี ของตัวอย่างข้าวที่มีปริมาณสัดส่วนของแข็งที่ระดับต่าง ๆ เมื่อนำมาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาจัดทำเป็นสมการเส้นตรงแล้ว สามารถใช้ในการประมาณ

ปริมาณของน้ำในตัวอย่างที่ไม่สามารถแช่แข็งได้ โดยหาได้จากจุดตัดแกน X ของสมการ-เส้นตรงที่ได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างข้าวข้าวเหนียว และข้าวเจ้ามีปริมาณน้ำที่ไม่สามารถแช่แข็งได้คือ 12.35 และ 27.08 กรัมต่อ100 กรัม ตามลำดับ

Rahman, Sablani, Al-Habsi, Al-Maskri & Al-Belushi (2005) และ Sablani, Bruno, Kasapis, & Symaladevi (2009) รายงานปริมาณน้ำที่ไม่สามารถแข็งตัวของข้าวอยู่ในช่วงประมาณ 36 กรัมต่อ100 กรัม ซึ่งค่าที่รายงานจะสูงกว่าค่าที่ตรวจสอบได้จากงานวิจัยนี้ค่อนข้างมาก นอกจากนั้นยังมีรายงานปริมาณน้ำที่ไม่สามารถแข็งตัวได้ของเจลแป้ง ซึ่งจะมีช่วงค่อนข้างกว้าง ประมาณ 25 ถึง 32 กรัมต่อ100 กรัม ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง แหล่งที่มา กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิต และแปรรูปแป้ง (Li, Dickinson & Chinachoti, 1998)

งานวิจัยนี้พบว่าปริมาณน้ำที่ไม่สามารถแข็งตัวของข้าวเหนียวมีค่าต่ำกว่าข้าวเจ้าค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบที่ต่างกันของข้าวเหนียว และข้าวเจ้า ปริมาณอะไมโลส และอะไมโลเพกติน สภาวะในการตรวจสอบ และวัดค่า เป็นต้น โดยมีรายงานว่าปริมาณน้ำอิสระมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานเอนทาลปี ในกรณีที่น้ำรวมตัวกับเจลสตาร์ชแบบร่างแหเป็นจำนวนมาก จะทำให้เจลแข็งแรงขึ้น ในขณะเดียวกันน้ำอิสระจะลดลง นั่นคือ มีน้ำที่สามารถแช่แข็งได้ลดลงตามลงไปด้วย (Chung, Woo & Lim, 2004) แป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงจะสามารถรวมตัวกับน้ำได้มากกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง ทั้งนี้เนื่องจากอะไมโลเพกตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า และเป็นกิ่งก้านสาขา จึงอาจจะเก็บกักน้ำไว้ในโมเลกุลได้ดีกว่า ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถแช่แข็งได้ลดลง (Suzuki & Kitamura, 2008) นอกจากนั้น ยังมีรายงานพบว่าแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์หรือทำให้เกิดเรโทรเกรเดชัน จะใช้น้ำในการพองตัวหรือเก็บกักไว้จากการเปลี่ยนโครงสร้างของแป้งในกระบวนการเรโทรเกรเดชัน ทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถแช่แข็งได้ลดลง (Chung, Lee & Lim, 2002; Tananuwong & Reid, 2004).

4.1.2 กราฟของกลาสทรานซิชัน

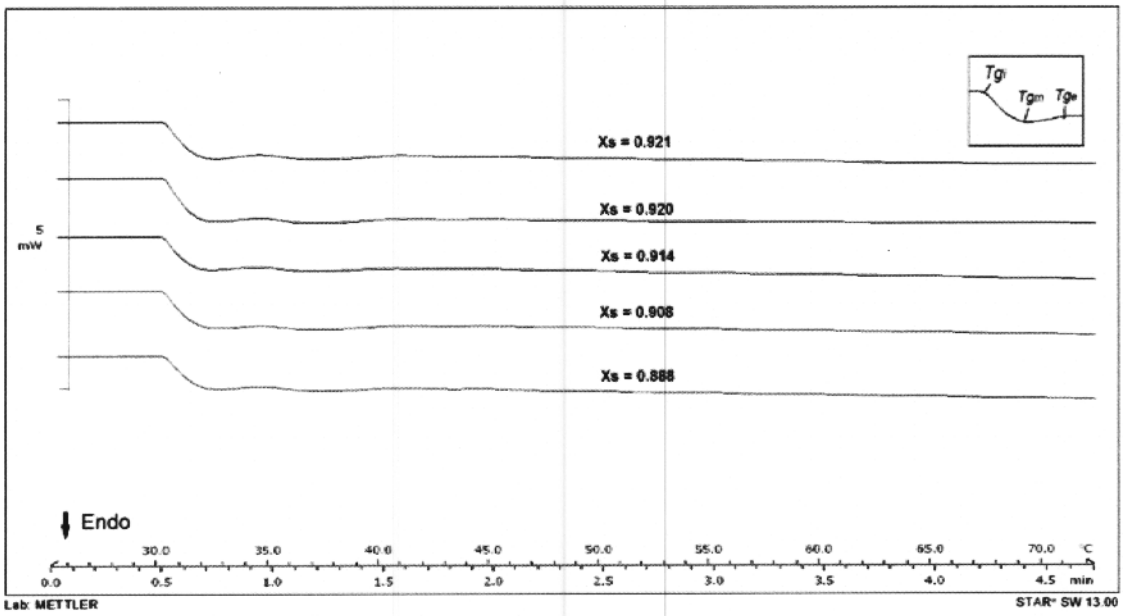
ในส่วนของกราฟของกลาสทรานซิชันจะทำการหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างข้าวเหนียว และข้าวเจ้า โดยเลือกใช้ตัวอย่างที่มีค่าความชื้นต่ำกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 20 (น้ำหนักเปียก) หรือมีค่าสัดส่วนของแข็งมากกว่า 0.80 ทั้งนี้เนื่องจากอยู่ในช่วงที่จะนำไปศึกษาในตอนต่อไป คือ ศึกษาผลการเก็บรักษา และผลคุณภาพการสี ซึ่งข้าวเปลือกโดยทั่วไปมักจะเก็บรักษาที่ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 (น้ำหนักเปียก) หากเก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้นมากกว่านี้จะเกิดการเสื่อมเสียได้ (ความชื้นร้อยละ 13 ค่าสัดส่วนของแข็งของตัวอย่างข้าว คือ 0.87)

นอกจากนั้นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างอาหารจะหาได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความซับซ้อนของระบบอาหาร ที่ไม่ได้มีแต่เฉพาะสตาร์ชซึ่งเป็นโพลิเมอร์ และมีการแสดงสมบัติของโครงสร้างเป็นกึ่งผลึกหรืออสัณฐาน แต่ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ อีก เช่น โปรตีน ไขมัน ฯลฯ

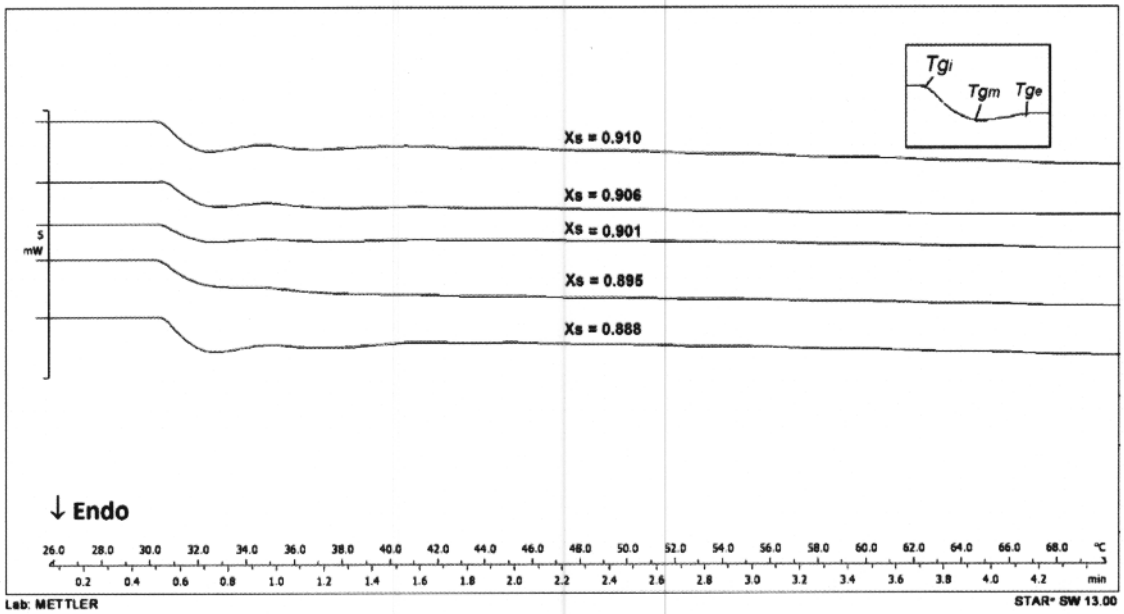
ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลให้การหาค่าอุณหภูมิกลาสซิชันทำได้ยาก โดยเฉพาะการวิเคราะห์ด้วย DSC มักจะมีสัญญาณรบกวน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานน้อยมาก จนยากแก่การสังเกต (Perdon, Siebenmorgen & Mauromoustakos, 2000; Sablani, Bruno, Kasapis & Symaladevi, 2009; Sun, Yang, Siebenmorgen, Stelwagen & Cnossen, 2002). ในงานวิจัยทั่วไปมักจะใช้เทคนิคอื่น ๆ ช่วยในการตรวจสอบกลาสทรานซิชัน เช่น Thermal Mechanical Analysis (TMA) Dynamic Mechanical Analyses (DMA) และ Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้มีการตั้งค่า DSC เพื่อที่จะทดสอบหาอุณหภูมิกลาส-ทรานซิชันของตัวอย่างข้าว ทั้งในส่วนของข้าวเหนียวและข้าวเจ้า โดยจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ DSC เทอร์โมแกรมในลักษณะดูดความร้อน โดยเลือกใช้เฉพาะสัญญาณการส่งผ่านความร้อน DSC แบบย้อนกลับได้ (reversible heat flow) เท่านั้น ไม่ใช่สัญญาณการส่งผ่านความร้อน DSC แบบค่าความร้อนทั้งหมด (total heat flow) เหมือนกับการหาจุดเยือกแข็งที่อธิบายไปก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์กลาสทรานซิชันเป็นปรากฏการณ์ที่ย้อนกลับได้ ซึ่งการตั้งค่าของ DSC สามารถที่จะตรวจสอบหาอุณหภูมิกลาส-ทรานซิชันได้ดังภาพที่ 46 โดยจะแสดงให้เห็นจุดในการเกิดพีค 3 จุด ได้แก่ onset (T_{gi}), mid (T_{gm}) และ end-point (T_{ge}) โดยข้อมูลอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ตรวจสอบพบทั้งของตัวอย่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้าดังแสดงในตารางที่ 10 และตารางที่ 11

a) Waxy rice (Sun-pah-tawng)



b) Non-waxy rice (Phitsanulok 2)



ภาพที่ 46 ลักษณะของ DSC เทอร์โมแกรมแสดงพีคของสัญญาณการส่งผ่านความร้อนแบบย้อนกลับได้ ซึ่งแสดงให้เห็นจุดที่เกิดอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2

ตารางที่ 10 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันแสดงค่า onset (T_{gi}), mid (T_{gm}) และ end-point (T_{ge}) ของตัวอย่างข้าวเหนียว

Solid fraction (X_s)	T_{gi} (°C)	T_{gm} (°C)	T_{ge} (°C)
0.800	26.93 ± 0.07^{f}	27.32 ± 0.11^{e}	30.60 ± 0.05^{g}
0.888	27.07 ± 0.06^{f}	29.20 ± 0.15^{d}	33.80 ± 0.06^{f}
0.908	27.60 ± 0.26^{f}	30.24 ± 0.23^{cd}	34.78 ± 0.16^{e}
0.910	29.45 ± 0.39^{e}	30.79 ± 0.18^{c}	35.18 ± 0.09^{e}
0.914	30.06 ± 0.25^{de}	31.40 ± 0.22^{c}	35.45 ± 0.20^{de}
0.920	30.63 ± 0.33^{cd}	33.27 ± 1.00^{b}	36.14 ± 0.07^{cd}
0.921	31.62 ± 0.32^{b}	34.59 ± 0.56^{ab}	36.46 ± 0.17^{bc}
0.930	31.52 ± 0.17^{bc}	34.47 ± 0.15^{ab}	36.49 ± 0.51^{bc}
0.950	32.20 ± 0.06^{b}	35.52 ± 0.20^{a}	37.18 ± 0.09^{ab}
0.970	33.71 ± 0.25^{a}	35.14 ± 0.22^{a}	37.85 ± 0.06^{a}

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ตารางที่ 11 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันแสดงค่า onset (T_{gi}), mid (T_{gm}) และ end-point (T_{ge}) ของตัวอย่างข้าวเจ้า

Solid fraction (X_s)	T_{gi} (°C)	T_{gm} (°C)	T_{ge} (°C)
0.800	28.84 ± 0.06^{g}	29.37 ± 0.09^{f}	31.08 ± 0.08^{e}
0.888	29.53 ± 0.39^{f}	30.39 ± 0.01^{e}	32.89 ± 0.11^{d}
0.895	29.87 ± 0.00^{f}	31.18 ± 0.19^{e}	33.53 ± 0.35^{d}
0.900	29.27 ± 0.01^{f}	30.38 ± 0.13^{e}	32.77 ± 0.04^{d}
0.901	30.36 ± 0.10^{e}	32.46 ± 0.52^{d}	34.65 ± 0.23^{c}
0.906	31.01 ± 0.00^{d}	33.35 ± 0.09^{c}	35.43 ± 0.61^{c}
0.910	32.41 ± 0.24^{c}	34.24 ± 0.30^{b}	36.82 ± 0.15^{b}
0.930	32.74 ± 0.06^{bc}	34.37 ± 0.20^{b}	36.94 ± 0.06^{b}
0.950	33.13 ± 0.01^{b}	35.07 ± 0.07^{b}	37.43 ± 0.16^{ab}
0.970	34.87 ± 0.16^{a}	36.06 ± 0.06^{a}	38.11 ± 0.06^{a}

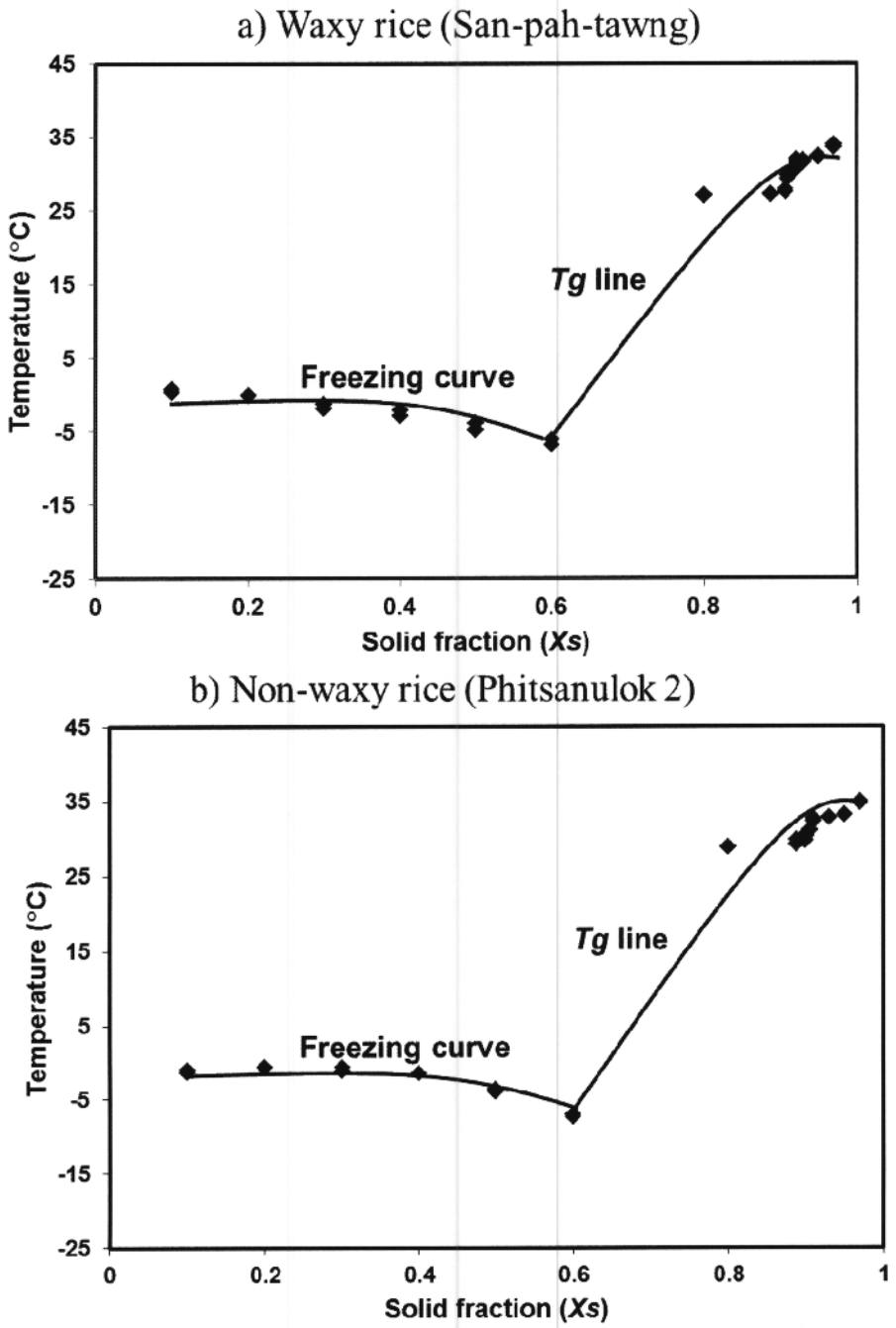
หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

จากตาราง 10 และ 11 จะเห็นว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่พบ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในส่วนของข้าวเหนียว และข้าวเจ้า ในภาพรวมจะพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้น (หรือค่าความชื้นลดลง) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเกิดจากเมื่อความชื้นของตัวอย่างข้าวลดลงเนื่องจากสมบัติการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของน้ำ (plasticizer) ในส่วนโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของตัวอย่างข้าว มีรายงานพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหารสามารถพบได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ($\Delta T_g = T_{ge}-T_{gi}$~50 °C) ทั้งนี้เนื่องจากอาหารมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมากกว่าโพลิเมอร์ทั่วไป ดังนั้นการรายงานค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของอาหารจึงนิยมรายงานให้ครบทั้ง 3 จุด คือ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุด (Sablani, Bruno, Kasapis, & Symaladevi, 2009)

ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างข้าวทั้งในส่วนของข้าวเหนียว และข้าวเจ้าที่ตรวจสอบพบในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ Sablani, Bruno, Kasapis, & Symaladevi (2009) ใช้เทคนิค Modulated DSC ในการหาค่า และรายงานค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_{gm}) ของข้าวพันธุ์บาสมาติ (ข้าวอินเดีย) อยู่ในช่วง 32-48 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างมีความชื้นอยู่ในช่วง 7-17 กรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่ Tajaddodi Talab, Ibrahim, Spotar, Talib & Muhammad (2012) ใช้เทคนิค DSC ในการตรวจสอบ และรายงานค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวพันธุ์ MR219 (ข้าวจีน) อยู่ในช่วง 10-62 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างมีความชื้นอยู่ในช่วง 7-27 กรัมต่อ 100 กรัม นอกจากนั้นยังมีการใช้เทคนิค TMA และ DMTA ในการหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของข้าวเมล็ดเดี่ยว ๆ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 22-58 องศาเซลเซียส เมื่อข้าวมีความชื้น 3-27 กรัมต่อ 100 กรัม (Perdon, Siebenmorgen & Mauromoustakos, 2000; Siebenmorgen, Yang, & Sun, 2004; Sun, Yang, Siebenmorgen, Stelwagen & Cnossen, 2002)

4.1.3 ไดอะแกรมสถานะของตัวอย่างข้าว

เมื่อนำข้อมูลกราฟจุดเยือกแข็ง และกราฟกลาสทรานซิชัน ที่ได้จากตอน 4.1.1-4.1.2 มาประกอบกันจะได้เป็นไดอะแกรมสถานะของตัวอย่างข้าว ดังแสดงในภาพ 47 โดยในส่วนของเส้นกราฟอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ผลการทดลองจะมีข้อมูลเฉพาะตัวอย่างที่มีค่าสัดส่วนของแข็งตั้งแต่ 0.8 เป็นต้นไป (ปริมาณความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 20) ในส่วนของตัวอย่างที่มีสัดส่วนของแข็งต่ำกว่า 0.8 หรือปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 20 เครื่อง DSC ไม่สามารถตรวจสอบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันได้ ดังนั้น ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในช่วงสัดส่วนของแข็ง 0.6 ถึง 0.8 จะได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Gordon-Taylor (สมการที่ 9)



ภาพที่ 47 ไดอะแกรมสถานะของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2

จากภาพที่ 47 จะเห็นว่าไดอะแกรมสถานะของตัวอย่างข้าวเหนียว และข้าวเจ้ามีลักษณะคล้ายกัน และผลที่ได้สอดคล้องกับไดอะแกรมสถานะของข้าวพันธุ์อื่น ๆ ที่มีการรายงานไว้ ซึ่งพันธุ์ที่มีรายงานไว้ ได้แก่ ข้าวบาสมาติ (Sablani, Bruno, Kasapis, & Symaladevi, 2009) ข้าวพันธุ์เบงกอล และดริว (Siebenmorgen, Yang, & Sun, 2004)

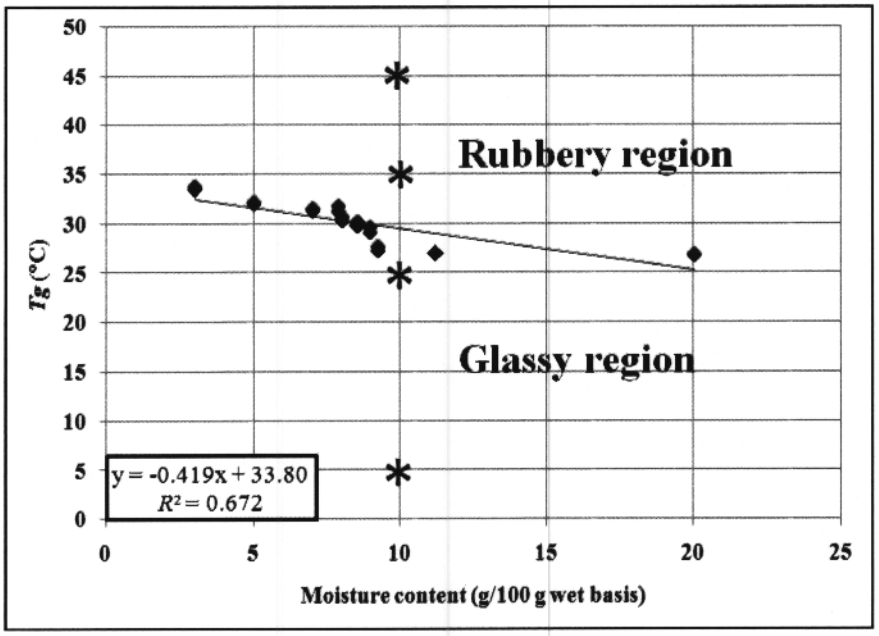
พันธุ์ดริว (Sun, Yang, Siebenmorgen, Stelwagen & Cnossen, 2002) และพันธุ์เบงกอลและไซเพรส (Perdon, Siebenmorgen & Mauromoustakos, 2000)

เนื่องจากไดอะแกรมสถานะของอาหาร เป็นแผนที่บ่งบอกสถานะของอาหารที่จะมีสถานะแตกต่างกันออกไป เมื่อความชื้น และอุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนไป สามารถใช้ในการออกแบบกระบวนการ การยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร รวมถึงหาสภาวะการเก็บที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงมีการใช้ประโยชน์ไดอะแกรมสถานะของข้าวในกระบวนการบ่ม อบแห้งหรือการเก็บรักษาข้าวในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน สตาร์ชในข้าวจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้วซึ่งมีการขยายตัว และมีปริมาตรจำเพาะต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสตาร์ชในข้าวจะอยู่ในสถานะคล้ายยาง ซึ่งในสถานะนี้สตาร์ชจะมีความยืดหยุ่น มีปริมาตรจำเพาะสูง (Slade, Levine & Reid, 1991)

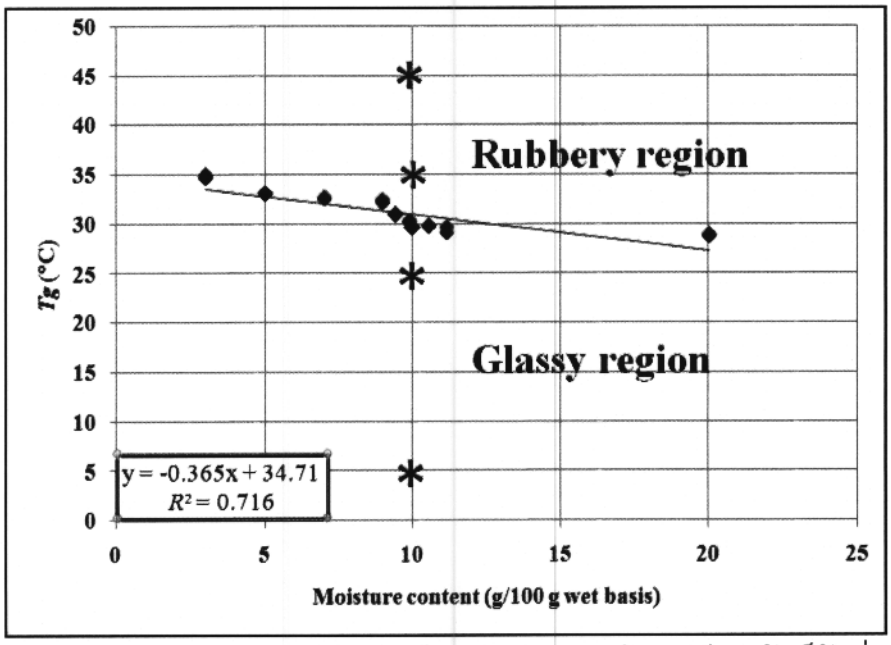
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาไดอะแกรมสถานะของข้าว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบ่มข้าวที่ผ่านการเก็บเกี่ยว และลดความชื้นในสภาพที่ไม่เหมาะสม มีปริมาณข้าวต้นต่ำ จากนั้นนำตัวอย่างข้าวดังกล่าวไปเก็บในสภาวะต่าง ๆ ทั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า และสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และตรวจสอบหาปริมาณข้าวต้นเมื่อบ่มไปที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยทำการศึกษาในระยะยาว (เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์)

ผลการวัดอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของตัวอย่างข้าวเหนียว และข้าวเจ้า นำมาจัดทำเป็นเส้นกราฟกลาสทรานซิชันเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการศึกษาการบ่ม ส่วนความชื้นของข้าวจะใช้ข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 10 (น้ำหนักเปียก) เนื่องจากเป็นความชื้นที่แนะนำสำหรับการเก็บรักษาข้าวโดยทั่วไป เส้นกราฟกลาสทรานซิชันของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 48

a) Waxy rice (Sun-pah-tawng)



b) Non-waxy rice (Phitsanulok 2)



ภาพที่ 48 เส้นกราฟกลาสทรานซิชันของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2

*แสดงอุณหภูมิที่เลือกสำหรับเก็บรักษาข้าว 4 ตำแหน่ง

จากภาพที่ 48 จะได้บริเวณที่ตัวอย่างข้าวจะแสดงสถานะคล้ายแก้ว และบริเวณที่ตัวอย่างข้าวจะแสดงสถานะคล้ายยาง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเก็บรักษาข้าวสภาวะละ 2 อุณหภูมิ ได้แก่ 5 และ 25 องศาเซลเซียส สำหรับบริเวณที่มีสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส สำหรับบริเวณที่มีสถานะคล้ายยาง จากนั้นสุ่มตัวอย่างข้าวมาทำการสีและวัดปริมาณข้าวต้น ซึ่งจะรายงานผลในตอนต่อไป

4.2 ผลการทดสอบการสี

เมื่อนำข้าวที่มีความชื้นเท่ากัน คือ ร้อยละ 10 ใส่ในถุงสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นสุ่มตัวอย่างมาทำการสีและวัดปริมาณข้าวต้นทุกสัปดาห์ ได้ผลดังตารางที่ 12-13 และภาพที่ 49

ตารางที่ 12 ปริมาณข้าวต้นของข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4 ระดับ

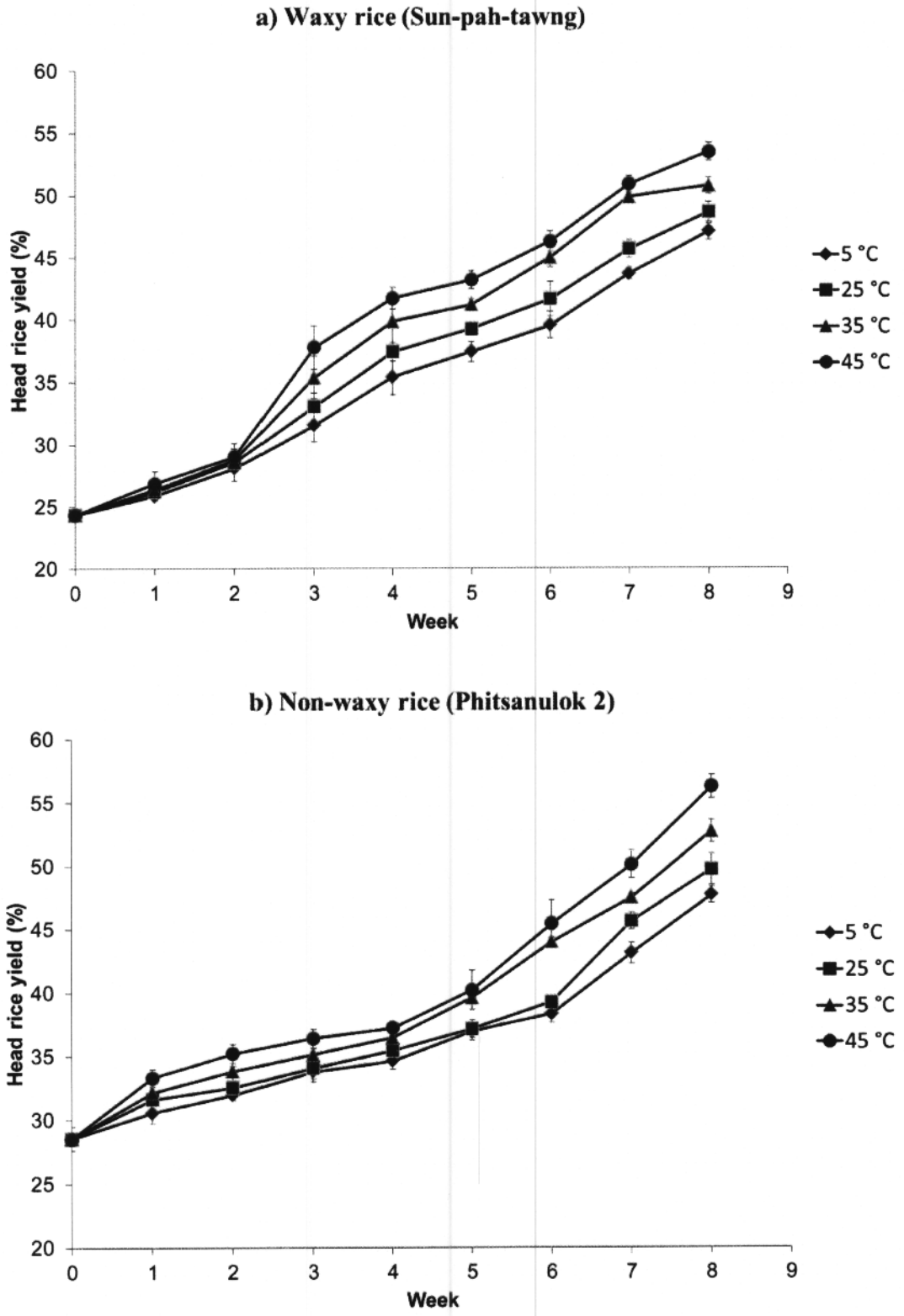
Time (Week)	Head rice yield (%)			
	5 (°C)	25 (°C)	35 (°C)	45 (°C)
0	24.34 ± 0.39^{h}	24.34 ± 0.39^{i}	24.34 ± 0.39^{g}	24.34 ± 0.39^{h}
1	25.85 ± 0.26^{h}	26.18 ± 0.36^{h}	26.39 ± 0.90^{f}	26.87 ± 1.00^{g}
2	28.08 ± 1.03^{g}	28.55 ± 0.71^{g}	28.77 ± 0.95^{e}	29.03 ± 1.08^{f}
3	31.53 ± 1.31^{f}	33.03 ± 1.12^{f}	35.37 ± 1.71^{d}	37.79 ± 1.75^{e}
4	35.42 ± 1.46^{e}	37.44 ± 0.73^{e}	39.85 ± 1.69^{c}	41.72 ± 0.85^{d}
5	37.43 ± 0.83^{d}	39.26 ± 0.50^{d}	41.19 ± 0.44^{c}	43.17 ± 0.75^{d}
6	39.54 ± 1.05^{c}	41.63 ± 1.39^{c}	45.00 ± 0.74^{b}	46.31 ± 0.83^{c}
7	43.65 ± 0.48^{b}	45.69 ± 0.72^{b}	49.85 ± 0.14^{a}	50.88 ± 0.67^{b}
8	47.08 ± 0.68^{a}	48.63 ± 0.79^{a}	50.75 ± 0.64^{a}	53.45 ± 0.73^{a}

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ตารางที่ 13 ปริมาณข้าวต้นของข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2 เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4 ระดับ

Time (Week)	Head rice yield (%)			
	5 (°C)	25 (°C)	35 (°C)	45 (°C)
0	28.54 ± 0.91^{h}	28.54 ± 0.91^{h}	28.54 ± 0.91^{i}	28.54 ± 0.91^{h}
1	30.55 ± 0.86^{g}	31.62 ± 0.11^{g}	32.15 ± 0.69^{h}	33.31 ± 0.70^{g}
2	31.95 ± 0.41^{f}	32.55 ± 0.76^{g}	33.84 ± 0.40^{g}	35.22 ± 0.77^{f}
3	33.78 ± 0.55^{e}	34.09 ± 1.12^{f}	35.14 ± 0.44^{f}	36.43 ± 0.74^{ef}
4	34.63 ± 0.66^{e}	35.46 ± 0.54^{e}	36.47 ± 0.62^{e}	37.24 ± 0.19^{e}
5	36.97 ± 0.72^{d}	37.16 ± 0.69^{d}	39.63 ± 0.39^{d}	40.23 ± 1.54^{d}
6	38.34 ± 0.71^{c}	39.29 ± 0.46^{c}	43.99 ± 0.37^{c}	45.43 ± 1.87^{c}
7	43.10 ± 0.83^{b}	45.63 ± 0.64^{b}	47.49 ± 0.33^{b}	50.12 ± 1.10^{b}
8	47.70 ± 0.65^{a}	49.75 ± 1.23^{a}	52.76 ± 0.92^{a}	56.27 ± 0.93^{a}

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในแนวตั้ง แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)



ภาพที่ 49 ปริมาณข้าวต้นของตัวอย่าง (a) ข้าวเหนียวพันธุ์สันปาตอง และ (b) ข้าวเจ้าพันธุ์พิษณุโลก 2 เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4 ระดับ

จากตารางที่ 12 และ 13 และภาพที่ 49 จะเห็นว่าปริมาณข้าวตันจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (สัปดาห์ที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8) โดยปริมาณข้าวตันที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ สภาวะการเก็บรักษา

ในส่วนของอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงต่ำกว่ากลาสทรานซิชัน (5 และ 25 องศาเซลเซียส) ของตัวอย่างข้าวเหนียวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 24.34, 25.85, 28.08, 31.53, 35.42, 37.43, 39.54, 43.65 และ 47.08 ตามลำดับ ในส่วนของอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 24.34, 26.18, 28.55, 33.03, 37.44, 39.26, 41.63, 45.69 และ 48.63 ตามลำดับ ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (35 และ 45 องศาเซลเซียส) ของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 24.34, 26.39, 28.77, 35.37, 39.85, 41.19, 45.00, 46.85 และ 50.75 ตามลำดับ ในส่วนของอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 24.34, 26.87, 29.03, 37.79, 41.72, 43.17, 46.31, 50.88 และ 53.45 ตามลำดับ

ซึ่งในส่วนของอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงต่ำกว่ากลาสทรานซิชัน (5 และ 25 องศาเซลเซียส) ของตัวอย่างข้าวเจ้าที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 28.54, 30.55, 31.95, 33.78, 34.63, 36.97, 38.34, 43.10 และ 74.70 ตามลำดับ ในส่วนของอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 28.54, 31.62, 32.55, 34.03, 35.46, 37.16, 39.29, 45.63 และ 49.75 ตามลำดับ ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (35 และ 45 องศาเซลเซียส) ของตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 28.45, 32.15, 33.84, 35.14, 36.47, 39.63, 43.99, 47.49 และ 52.76 ตามลำดับ ในส่วนของอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณข้าวตันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 28.54, 33.31, 35.22, 36.43, 37.24, 40.23,45.43, 50.12 และ 56.27 ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวตันจะมีมากกว่า

เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงจลนพลศาสตร์ที่ชัดเจน ข้อมูลของปริมาณข้าวตันที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งดังนี้

$$\ln (HRY) = -kt + \ln C \qquad (11)$$

โดย k คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่ง (สัปดาห์$^{-1}$)

t คือ ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)

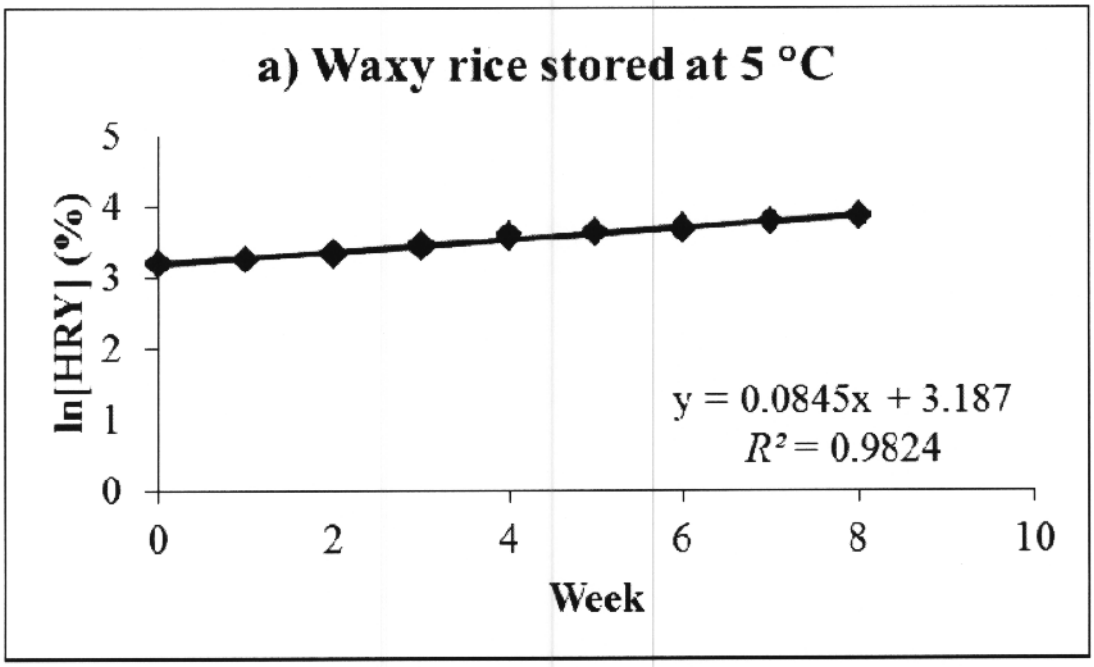
C คือ ค่าคงที่

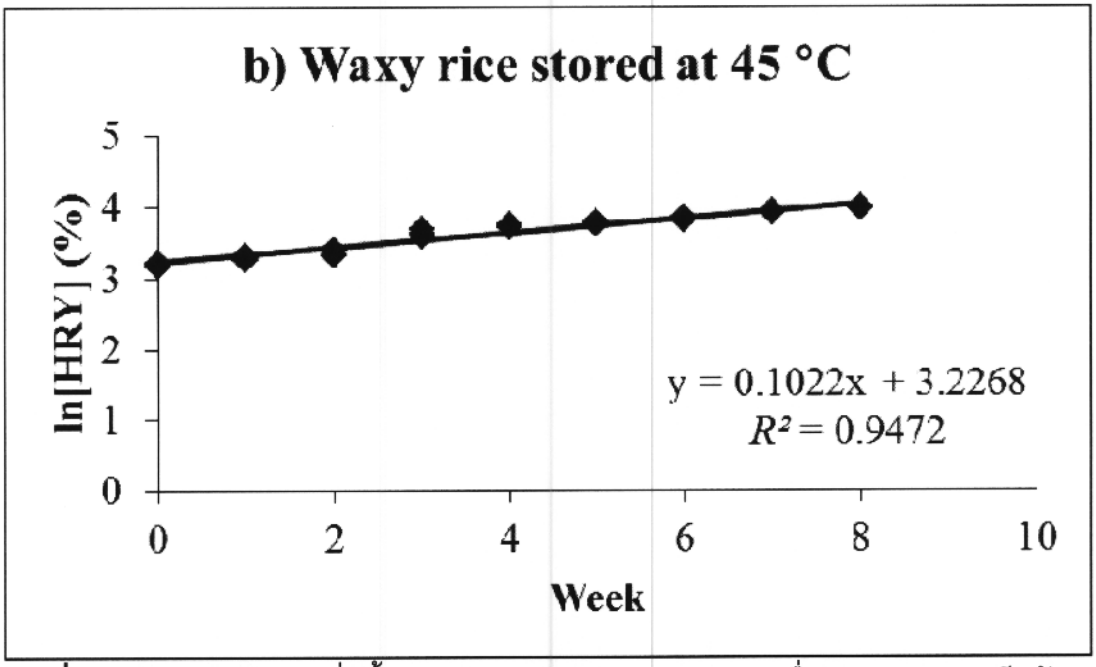
ค่าคงที่ต่าง ๆ จากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งดังกล่าวข้างต้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 14 และตัวอย่างกราฟอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้น สามารถสังเกตได้ในเชิงเส้นตรงจากกราฟระหว่าง ln(HRY) กับระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์) ดังแสดงในภาพที่ 50 โดยในส่วนของกราฟแสดงค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่ง หรือความชันของสมการ เมื่อเก็บรักษาข้าวทั้งที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (5 และ 25 องศาเซลเซียส) และสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (35 และ 45 องศาเซลเซียส) ดังแสดงในภาพที่ 51

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ต่าง ๆ จากสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (*k*) จากการพลอตค่า ln (*HRY*) กับระยะเวลาการเก็บรักษาของตัวอย่างข้าวที่ความชื้นร้อยละ 10 (ค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.94)

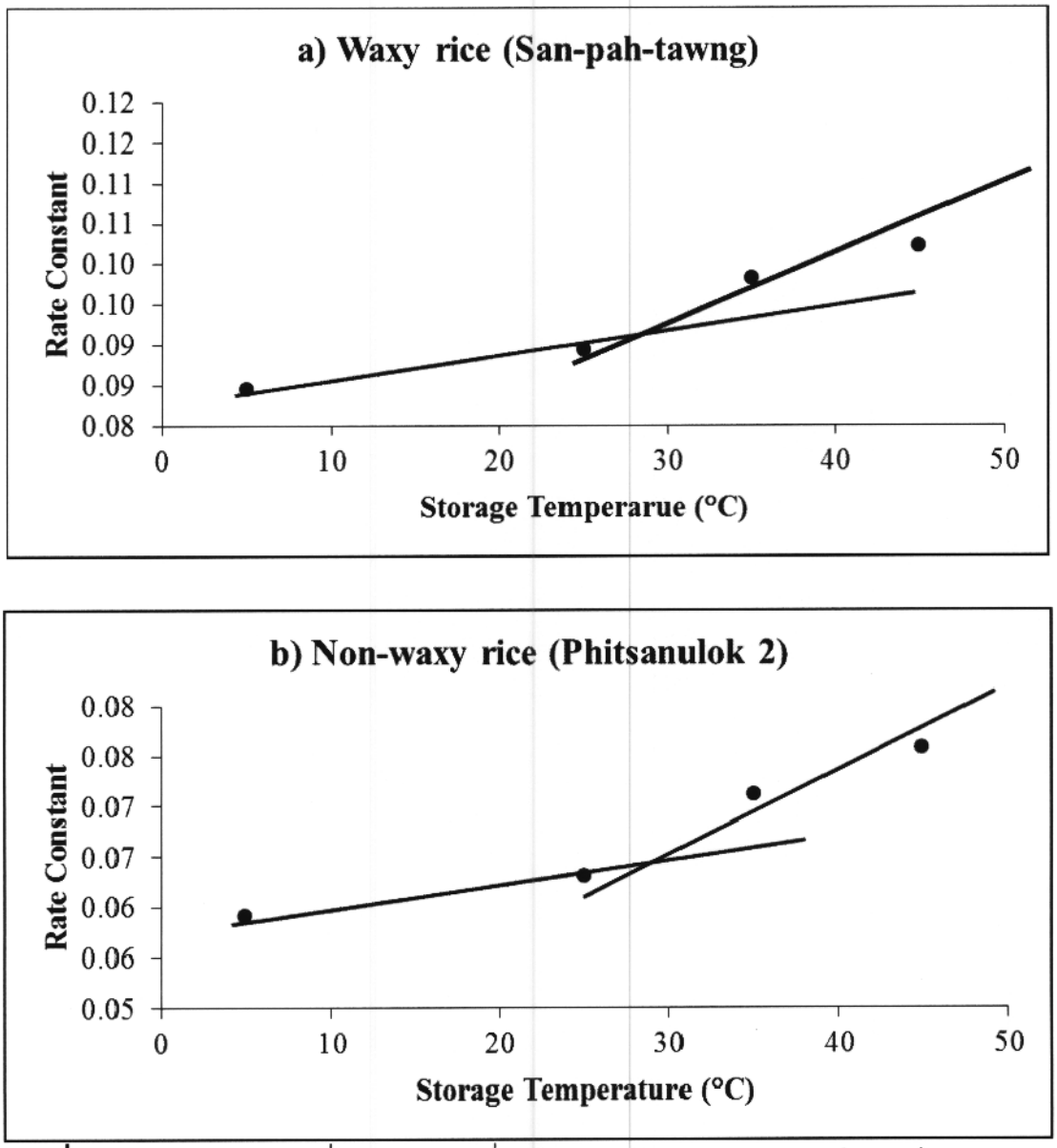
Storage Temperature (°C)	Waxy rice (San-pah-Tawng) ($Week^{-1}$)	Non-waxy rice (Phitsanulok 2) ($Week^{-1}$)
5	8.45×10^{-2}	5.91×10^{-2}
25	8.94×10^{-2}	6.31×10^{-2}
35	9.83×10^{-2}	7.12×10^{-2}
45	10.22×10^{-2}	7.58×10^{-2}

หมายเหตุ : ร้อยละของข้าวเต็มเมล็ด (%) และ ระยะเวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์) แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) และค่า r^2 values ต่ำสุด คือ 0.94





ภาพที่ 50 กราฟอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวต้น ln (*HRY*) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยยกตัวอย่างการเก็บรักษาที่ (a) 5 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทราน-ซิชัน และ (b) 45 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน



ภาพที่ 51 กราฟแสดงค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งหรือความชันของสมการ (a) ข้าวเหนียว และ (b) ข้าวเจ้า เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 25 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน) และ 35, 45 องศาเซลเซียส (สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน)

จากตารางที่ 14 จะเห็นว่าสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณข้าวต้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นได้เป็นอย่างดี ข้อมูลที่ได้มีค่า R^2 มากกว่า 0.90 โดยค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของตัวอย่างข้าวเหนียวจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างข้าวเจ้าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเดียวกัน ค่าความชันของสมการ ln (*HRY*) กับระยะเวลาการเก็บรักษามีค่า 0.0845 สำหรับข้าวเหนียว และ 0.1022 สำหรับข้าวเจ้า โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่ง กับอุณหภูมิการเก็บรักษา จะพบว่าเส้นกราฟในช่วงของอุณหภูมิ

การเก็บรักษาที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะมีค่าความชันน้อยกว่าเส้นกราฟในช่วงของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (ภาพที่ 51) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเก็บรักษาข้าวในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะทำให้เมื่อนำข้าวไปสีมีปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้น

ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดข้าว ที่เกิดขึ้นจากสภาพการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา ส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเมล็ดข้าว และทำให้เกิดรอยร้าว เมื่อข้าวเกิดรอยร้าว และถูกนำไปสีจะทำให้คุณภาพการสีต่ำ ข้าวมีเมล็ดหักสูงหรือมีปริมาณข้าวต้นต่ำ

ข้าวที่เก็บเกี่ยวมาแล้วจำเป็นต้องมีการลดความชื้น ไม่ว่าจะเป็นการตากแดดหรือการอบลดความชื้นด้วยเครื่องจักร การอบลดความชื้นดังกล่าวจะทำให้เกิดความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดข้าว รวมถึงข้าวมีการเปลี่ยนสถานะกลับไปมาระหว่างสถานะคล้ายแก้วและสถานะคล้ายยาง เมื่ออุณหภูมิของข้าวเพิ่มขึ้นหรือลดลงผ่านอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน กระบวนการเหล่านี้ส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดความเครียด และหากไม่มีวิธีการปรับสภาพ เมื่อนำข้าวไปสี ข้าวจะมีปริมาณข้าวต้นต่ำ ดังนั้นการบ่มหรือเก็บรักษาข้าวในระยะเวลาที่เหมาะสมก่อนนำไปสี เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องดำเนินการ เพื่อช่วยลดความแตกต่างของความชื้นภายในข้าว และช่วยปรับสภาพข้าวให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม เมื่อนำไปสีจะช่วยปรับปรุงคุณภาพการสีเพิ่มปริมาณข้าวต้นได้ (Cnossen & Siebenmorgen, 2000; Zhang, Yang & Jia, 2003)

ในรายงานวิจัยส่วนใหญ่มักจะศึกษาการบ่มข้าวเพื่อปรับปรุงคุณภาพการสีไว้ในระยะเวลาจำกัด ไม่เกิน 2 ถึง 3 วัน (Yang, Zhang & Jia, 2005) ปัจจุบันยังไม่มีรายงานผลการศึกษาวิจัยการเก็บรักษาข้าวโดยใช้ข้อมูลจากไดอะแกรมสถานะ เพื่อหาสภาพการบ่มหรือเก็บรักษาสำหรับการปรับสภาพข้าวที่มีความแตกต่างของความชื้นหรือมีอัตราการแตกหักสูง เพื่อปรับสภาพให้สามารถนำมาสีให้มีปริมาณข้าวต้นเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาข้าวในสภาวะอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน จะทำให้ข้าวที่มีสภาพไม่เหมาะสมในการสี สามารถคืนสภาพ และเมื่อนำมาสีจะมีปริมาณข้าวต้นเพิ่มขึ้นได้ โดยระยะเวลาที่เก็บรักษาจะสัมพันธ์ในทางตรงกับปริมาณข้าวต้นที่เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีข้อแนะนำสำหรับอุตสาหกรรมการสีข้าว หากต้องการปรับสภาพข้าวที่มีคุณภาพการสีต่ำ เช่น ข้าวที่ผ่านการอบแห้งในสภาวะที่ไม่เหมาะสมหรือข้าวที่ผ่านสภาพการเก็บเกี่ยวไม่เหมาะสม มีความแตกต่างของความชื้นภายในเมล็ดข้าวสูง หากนำมาสีจะทำให้อัตราการแตกหักสูง หากต้องการคืนสภาพ ปรับปรุงคุณภาพการสี ควรนำมาบ่มเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 2 สัปดาห์ โดยหากสามารถเก็บรักษาในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันได้ จะช่วยเร่งการคืนสภาพของเมล็ดข้าวได้เร็วขึ้น โดยสภาวะที่แนะนำจากผลการวิจัยนี้คืออยู่ในช่วง 30 ถึง 45 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมหรือผู้ใช้ต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ และเครื่องจักรที่มีอยู่ด้วย การเก็บรักษาที่อุณหภูมิดังกล่าวอาจใช้ลมร้อน

จากแสงอาทิตย์ได้ในบางพื้นที่ โดยต้องออกแบบไซโลเก็บรักษาให้สามารถเก็บรักษาความร้อนในระดับดังกล่าวได้ตลอดเวลา โดยเฉพาะช่วงเวลากลางคืนที่อุณหภูมิลดลง เนื่องจากหากใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแหล่งอื่นอาจทำให้สิ้นเปลืองได้ เพราะการบ่มต้องใช้ระยะเวลายาวนาน

อีกประเด็นที่ต้องคำนึง คือ สภาวะการบ่ม ข้าวที่จะนำมาบ่มต้องมีความชื้นที่เหมาะสมตามที่แนะนำ คือ ไม่เกินร้อยละ 10 ถึง 13 (น้ำหนักเปียก) หากข้าวมีความชื้นมากกว่านี้จะทำให้เกิดการเน่าเสียได้ระหว่างการบ่ม และสภาพความชื้นสัมพัทธ์ในไซโลเพื่อบ่มข้าวก็ต้องมีสภาพความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ หากมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ข้าวซึ่งเป็นวัสดุที่ดูดความชื้นได้ดี จะดูดความชื้นจากสภาพบรรยากาศภายนอก และทำให้ความชื้นของเมล็ดข้าวสูงขึ้น ก็จะเกิดการเน่าเสียได้ระหว่างการบ่ม